**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE EDIFICACIÓN**

**COMPORTAMIENTO FÍSICO-MECÁNICO Y TÉRMICO DE
LOS MORTEROS DE CEMENTO ADITIVADOS CON FIBRAS
MINERALES PROCEDENTES DE RESIDUOS DE
CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN**

TESIS DOCTORAL

Autora
Carolina Piña Ramírez

Directoras
Mercedes del Río Merino - Doctora Arquitecta
Carmen Viñas Arrebola – Doctora en Ciencias Físicas

Programa de Doctorado en Innovación Tecnológica en Edificación
Madrid, 2018

TESIS DOCTORAL

TÍTULO: “Comportamiento físico-mecánico y térmico de los morteros de cemento aditivados con fibras minerales procedentes de residuos de construcción y demolición”

Tribunal nombrado por el Sr. Rector Magfco. De la Universidad Politécnica de Madrid, el día.....de.....de 2018.

Presidente

D/D^a.....

Vocales

D/D^a.....

D/D^a.....

D/D^a.....

Secretario

D/D^a.....

Realizado el acto de defensa y lectura de Tesis el
día.....de.....de.....en la Escuela Técnica Superior de Edificación,
acuerda otorgarla la calificación de:

EL PRESIDENTE

LOS VOCALES

EL SECRETARIO

A mis padres.

Agradecimientos

Quiero aprovechar estas líneas para expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que me han apoyado en el desarrollo de este trabajo, tanto en el plano científico-técnico como en el plano personal.

A mi compañera, amiga y directora de Tesis Mercedes por enseñarme, guiarme, motivarme y por ser el espejo donde me quiero mirar. Sin su profesionalidad, su experiencia y su entusiasmo este logro no hubiese sido posible.

A mi codirectora Carmen, por su amabilidad y buen humor, y por su inestimable apoyo y colaboración.

A Evangelina por su carácter metódico y su gran ayuda en gran parte de los ensayos de esta Tesis Doctoral.

A Marta Kossior-Kazberuk por su hospitalidad y apoyo en mi estancia en la Universidad Tecnológica de Białystok en Polonia.

A la Escuela Técnica Superior de Edificación por la beca concedida para la realización de la estancia predoctoral.

Al Departamento de Construcciones Arquitectónicas y su Control por su cooperación siempre que la he necesitado.

A Alejandra, Patri y Sheila, las mejores amigas de viaje que he podido tener, por haber estado siempre a mi lado. Gracias por las terapias, el blog, las risas, los viajes, etc., habéis convertido la experiencia en inolvidable.

A Gemma, Raúl y Víctor, por su interés constante, los mejores compañeros con los que uno siempre puede contar.

A Santi y a Javi, del Laboratorio de Materiales de Construcción por su gran ayuda para la realización de los ensayos del proceso experimental.

A Rubén, por su ayuda desinteresada para llevar a cabo los ensayos al fuego del presente trabajo de investigación.

A Cesar y Paola, por sus siempre amables consejos.

A mis mejores amigas, sin ellas todo esto hubiese sido más difícil.

A Víctor, por animarme a creer en mí y tener siempre palabras llenas de amor y energía.

A Patri, Tete, Ana, Javier, Clara y Cris, por ser mi familia y estar siempre ahí.

A mis padres, no solamente por dármele todo, sino también porque sin su ayuda nada de esto sería realidad. Gracias por el continuo apoyo y confianza.

A mi hijo Pablo, mi luz en el camino.

RESUMEN

Este trabajo de investigación pretende servir como referencia para la concienciación social sobre el respeto al medio ambiente y la utilización responsable de los recursos naturales, mediante la búsqueda de alternativas de menor impacto ambiental para los materiales empleados en la industria de la construcción. Actualmente, la construcción de edificios es una de las principales actividades generadoras de contaminación en la Comunidad Europea, por lo que es fundamental que el sector se oriente y evolucione hacia un modelo de economía circular que pase por reutilizar, reparar y reciclar los residuos de construcción y demolición (RCD), y utilizarlos como subproductos, pudiendo resultar una opción altamente viable, en oposición a la situación actual del depósito en vertedero.

El uso de materiales aislantes está en auge actualmente debido al incremento de los requerimientos térmicos y acústicos marcados por las normativas en la construcción de viviendas, que buscan contribuir al ahorro energético y mejorar el confort térmico. Este aumento en la utilización de materiales aislantes ha provocado un alarmante crecimiento de los residuos de lanas minerales al ser el aislante más empleado en la Unión Europea, por lo que resulta imprescindible su reciclaje o reutilización que es inexistente a día de hoy, incorporando los criterios de economía circular.

La técnica de adición de fibras en construcción, en matrices de mortero de cemento, es una técnica empleada desde la antigüedad. Sin embargo, aunque en los últimos tiempos se han realizado numerosas investigaciones acerca de la inclusión de fibras en hormigones, hay escasos estudios sobre el empleo de residuos de fibras minerales en morteros de cemento. Por esto se entiende de gran importancia estudiar la viabilidad, desde el punto de vista de la afectación a las propiedades físicas, mecánicas y térmicas de los morteros, de utilizar fibras procedentes del reciclaje para su refuerzo y de esta forma poder ser una alternativa ecológica al uso de las fibras de refuerzo utilizadas en la actualidad.

Además, estos residuos sustituirán parte del árido del mortero, cuestión fundamental si tenemos en cuenta que la extracción de arena a nivel mundial se ha disparado en los últimos 30 años siendo el recurso natural más demandado del mundo después del agua, especialmente por el sector de la construcción que demanda alrededor del 85% de la misma. Con ello, se conseguirá reducir también los RCD generados por la industria de la construcción.

Por todo esto, el objetivo principal de esta investigación es estudiar la posibilidad del reciclaje de fibras de lanas minerales, procedentes de residuos de construcción y demolición, mediante la incorporación de las mismas en una matriz de mortero de cemento como sustituto de parte de la arena empleada para su fabricación.

Para ello en primer lugar se realiza una profunda investigación sobre los tipos de aislantes térmicos, analizando los tipos de fibras que se utilizan en la actualidad en la construcción de edificios en función de su naturaleza u origen.

Posteriormente, se hace una búsqueda bibliográfica y documental sobre los trabajos existentes en este campo, no encontrándose investigaciones que analicen en profundidad la incorporación de distintos tipos de residuos de lanas minerales en morteros de cemento.

Para la constatación de la hipótesis, se diseña y desarrolla un plan experimental en el que se elaboran probetas de mortero de cemento con diferentes porcentajes de tres tipos distintos de residuos de fibras procedentes de lanas minerales, con el fin de encontrar las dosificaciones adecuadas para poder sustituir parte del árido empleado en su fabricación. Se realiza la completa caracterización tanto de los materiales que componen dichos morteros reciclados, como el nuevo material compuesto resultante, con el fin de conocer su comportamiento mecánico, físico, químico, de durabilidad, térmico, así como su comportamiento ante el fuego.

Mediante los ensayos se determinan las propiedades de estos morteros de cemento reforzados, tanto en estado fresco como en estado endurecido comprobándose su adecuación a las prescripciones de la normativa en vigor y

así poder ser empleados en el campo de la construcción sostenible, destacándose el mejor comportamiento de las probetas con adición de residuos de fibras de lana de roca al 30%. Así mismo, con el fin de conseguir un material más ecológico se ha analizado la opción de realizar estos compuestos con árido reciclado en sustitución del árido convencional, descartándose esta opción a la vista de los resultados de los ensayos. Para hacer una comparación se elaboran morteros con fibras sintéticas de polipropileno en los mismos porcentajes que en el resto de la investigación, observándose que con estas fibras comerciales se produce un importante deterioro de las propiedades mecánicas mucho mayor que con los residuos de fibras minerales.

Por último, a la vista de la viabilidad física y mecánica, se analiza el comportamiento térmico del nuevo material de mortero de cemento con residuos de fibras minerales en su aplicación en bloques de mortero para fachadas mediante simulación numérica, comparándola con una fachada de bloques de mortero tradicional.

ABSTRACT

This research aims to serve as reference for social awareness about environmental respect and responsible use of natural resources, through the search for alternative materials used in the construction industry with lower environmental impact. Currently the construction of buildings is one of the main pollution-generating activities in the European Union, so it is essential that the sector orients itself and evolves towards a circular economy model based on reuse, repair and recycling construction and demolition waste (CDW), and to use them as by-products, being able to convert them in a highly viable option, as opposed to the current situation of landfilling.

The use of insulating materials is currently booming due to the increase of thermal and acoustic requirements marked by regulations about the construction of buildings, which seek to contribute to energy savings and improve thermal comfort. This increase in the use of insulating materials has caused an alarming growth of mineral wool waste -as it is the mostly used insulation in the European Union-, so it is essential to recycle or reuse it, something that is not happening today, incorporating those materials to the circular economy criteria.

The construction technique of adding fibers in cement mortar matrices, is used since ancient times. However, although in recent times there have been numerous investigations about the inclusion of fibers in concrete, there are few investigations on the use of mineral fiber waste in cement mortars. This is why it is of great importance to study the feasibility, -from the point of view of its influence on the physical, mechanical and thermal properties of the mortars-, to use fibers from recycling for their reinforcement and, in this way, to be an ecological alternative to the reinforcement fibers used today.

In addition, this waste will replace part of the natural aggregate of the mortar, a fundamental issue if we take into account that the extraction of sand worldwide has skyrocketed in the last 30 years, being the most demanded natural resource in the world after water, especially by the construction sector, that

demands about 85% of sand This will also reduce the CWD generated by the construction industry.

For all of this, the main objective of this research is to study the possibility of recycling mineral wool fibers from construction and demolition waste, by incorporating them in a matrix of cement mortar as a substitute for a part of the sand used for its manufacture.

First of all, an in-depth investigation is carried out about the types of thermal insulation analyzing the types of fibers currently used in the construction of buildings, according to their nature or origin.

Subsequently, a literature review and documentary search are made on the existing works in this field, there is no research that analyzes in depth the incorporation of different types of residues of mineral wools in cement mortars.

For the verification of the hypothesis, an experimental plan is designed and cement mortar test samples with different percentages of three different types of fiber waste from mineral wool are developed, in order to find the appropriate dosages to be able to replace part of the aggregate used in its manufacture. The complete characterization is made of both the materials used for the recycled mortars, and the new resulting composite material, in order to know their mechanical, physical, chemical, durability, and thermal behavior, as well as their behavior as exposed to fire.

The properties of these reinforced cement mortars are determined through testing, both in fresh and hardened state, checking their suitability to the prescriptions of the current regulations and thus being able to be used in the field of sustainable construction, highlighting the best behavior of the test pieces with addition of 30% rock wool fiber waste. Likewise, in order to achieve a more environmentally friendly material it has analyzed the option of recycling these compounds instead of conventional aggregates, discarding this option to view the test results. To make a comparison, mortars are made with synthetic fibers of polypropylene in the same percentages as in the rest of the investigation, observing that with these commercial fibers there is a significant deterioration of

the mechanical properties -much greater than with the residues of mineral fibers.

Finally, in view of the physical and mechanical feasibility, the thermal behavior of the new material of cement mortar with waste mineral fibers, as applied in mortar blocks for facades, is analyzed by numerical simulation in comparison with a block façade made of traditional mortar.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1. CONTEXTUALIZACIÓN Y MARCO DE REFERENCIA	1
1.1. LA CONSTRUCCIÓN SOSTENIBLE	1
1.1.1 La construcción y el medioambiente.....	2
1.1.2 La construcción y el ahorro energético	5
1.2. LOS RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN	7
1.2.1. Marco legal	9
1.2.2. Situación actual	11
1.2.3. La gestión de los RCD	15
1.3. LOS AISLAMIENTOS TÉRMICOS EN EDIFICACIÓN	19
1.3.1. Clasificación y características de los aislamientos	20
1.4. LAS FIBRAS MINERALES	27
1.4.1. Clasificación y características de las lanas minerales	28
1.4.2. Proceso de fabricación de las lanas minerales.....	30
1.4.3. Los residuos de lanas minerales	32
1.5. LOS MORTEROS DE CEMENTO EN LA CONSTRUCCIÓN	33
1.5.1. Origen y evolución	34
1.5.2. Clasificación de los morteros de cemento	36
1.5.4. Propiedades de los morteros	45
1.5.5. Morteros con fibras	49
1.6. CONSIDERACIONES PARCIALES	51
TRABAJOS CITADOS	52
CAPÍTULO 2. ESTADO DE LA CUESTIÓN	57
2.1. ESTUDIOS SOBRE COMPUESTOS DE CEMENTO CON REFUERZOS DE FIBRAS.....	57
2.2. ESTUDIOS SOBRE COMPUESTOS DE CEMENTO CON CARGAS DE RESIDUOS	62
2.3. ESTUDIOS DE COMPUESTOS DE CEMENTO CON ADICIONES QUE MEJORAN EL COMPORTAMIENTO TÉRMICO	66
2.4. CONSIDERACIONES PARCIALES	67
TRABAJOS CITADOS	68
CAPÍTULO 3. JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO.....	75
CAPÍTULO 4. OBJETIVOS	77
CAPÍTULO 5. METODOLOGÍA	79
5.1. PLAN EXPERIMENTAL	79
5.1.1. Fase 1: Caracterización de las materias primas	81
5.1.2. Fase 2: Caracterización inicial de los morteros y ensayos previos	83
5.1.3. Fase 3: Análisis de la viabilidad de la incorporación de áridos reciclados	88
5.1.4. Fase 4: Selección y caracterización final de los morteros	90
5.1.5. Fase 5: Estudio de la durabilidad de los morteros más sostenibles	92
5.1.6. Fase 6: Simulación numérica.....	95

5.2. MATERIALES UTILIZADOS	97
5.2.1. Conglomerante	97
5.2.2. Arena de río	98
5.2.3. Agua	99
5.2.4. Árido reciclado	101
5.2.5. Fibras de polipropileno	101
5.2.6. Residuos de lanas minerales	101
5.3. ENSAYOS REALIZADOS	102
5.3.1. Ensayos físicos	102
5.3.2. Ensayos químicos	116
5.3.3. Ensayos mecánicos	119
5.3.4. Ensayos de durabilidad	126
5.3.5. Análisis térmico	128
5.3.6. Resistencia al fuego	129
TRABAJOS CITADOS	130
CAPÍTULO 6. RESULTADOS OBTENIDOS Y DISCUSIÓN	132
6.1. FASE 1: CARACTERIZACIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS	132
6.1.1. Densidad aparente	132
6.1.2. Densidad real	134
6.1.3. Granulometría de los áridos de río y porcentaje de finos	134
6.1.4. Granulometría de los áridos reciclados y porcentaje de finos	135
6.1.5. Análisis químico (FRX)	137
6.1.6. Difracción de Rayos X (DRX)	138
6.1.7. Termogravimetría (TG)	139
6.1.8. Microscopía electrónica de barrido SEM	143
6.2. FASE 2: CARACTERIZACIÓN INICIAL DE LOS MORTEROS Y ENSAYOS PREVIOS	145
6.2.1. PRIMERA PARTE FASE 2: ENSAYOS CON ANÁLISIS ESTADÍSTICO	145
6.2.1.1. Densidad real	145
6.2.1.2. Dureza superficial Shore D	147
6.2.1.3. Resistencia a flexión	150
6.2.1.4. Resistencia a compresión	153
6.2.2. SEGUNDA PARTE FASE 2: RESTO DE ENSAYOS	157
6.2.2.1. Consistencia y densidad aparente del mortero en estado fresco	157
6.2.2.2. Absorción de agua por capilaridad	159
6.2.2.3. Densidad aparente del mortero en estado endurecido	159
6.2.2.4. Análisis térmico	160
6.3. FASE 3: ANÁLISIS DE LA VIABILIDAD DE LA INCORPORACIÓN DE ÁRIDOS RECICLADOS	162
6.3.1. Dureza superficial Shore D	162
6.3.2. Resistencia a flexión	163
6.3.3. Resistencia a compresión	165
6.4. FASE 4: PORCENTAJES ADECUADOS Y CARACTERIZACIÓN FINAL DE LOS MORTEROS	167
6.4.1. Microscopía electrónica de barrido (SEM)	167
6.4.2. Porosimetría por inyección de mercurio	170
6.4.3. Adsorción/Desorción de nitrógeno	173
6.4.4. Difracción de rayos X (DRX)	177

6.4.5.	Termogravimetría de los morteros (TG).....	178
6.4.6.	Energía de fractura	181
6.4.7.	Módulo de Young.....	184
6.5.	FASE 5: ESTUDIO DE LA DURABILIDAD DE LOS MORTEROS MÁS SOSTENIBLES	185
6.5.1.	Resistencia al fuego	185
6.5.2.	Heladicidad	190
6.5.3.	Cristalización de sales	192
6.5.4.	Determinación de la permeabilidad al vapor de agua del mortero endurecido	194
6.5.5.	Resistencia a la adhesión	195
6.5.6.	Contenido de aire ocluido del mortero en estado fresco.....	196
6.5.7.	Periodo de trabajabilidad del mortero en estado fresco.....	197
6.5.8.	Morteros con fibras comerciales sintéticas de polipropileno	197
6.6.	FASE 6: ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO POR SIMULACIÓN NUMÉRICA.....	201
	TRABAJOS CITADOS	205
	CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES.....	209
	CHAPTER 7. CONCLUSIONS.....	213
	CAPÍTULO 8. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	217
	BIBLIOGRAFÍA	218
	INDICIOS DE CALIDAD	229
	SIGLAS Y ACRÓNIMOS	231
	LISTADO DE TABLAS Y FIGURAS.....	233
	ANEXOS	239

CAPÍTULO 1. CONTEXTUALIZACIÓN Y MARCO DE REFERENCIA

Con este capítulo se contextualizará el tema objeto de la tesis, describiendo además los conceptos necesarios para la comprensión del problema al que se pretende dar respuesta.

1.1. LA CONSTRUCCIÓN SOSTENIBLE

En la actualidad el crecimiento poblacional y la economía de mercado han aumentado la demanda mundial de energía, creciendo la huella ecológica de la humanidad, y siendo el cambio climático una de sus consecuencias más importantes (Yáñez, 2008).

Las circunstancias globales tienen su reflejo en el campo de la edificación (López-Moreno, 2015), por lo que los factores de ahorro energético y una mayor atención a la selección de los materiales, teniendo en cuenta su impacto ambiental, tienen que ser tenidos cada vez más en cuenta en el diseño y en la construcción de los edificios.

Esta tendencia de diseñar una construcción más sostenible adaptándola al medio ambiente y reduciendo su dependencia energética, se rige por unos principios básicos: la consideración del ecosistema del entorno, la eficacia y el uso racional de los materiales, la reducción en el consumo de energía, el cumplimiento de los requisitos de confort y la eficiencia energética global del proceso constructivo (Terrados & Moreno, 2014).

Desde el punto de vista económico, esta eficiencia global del proceso constructivo es conocida actualmente con el nombre de “economía circular”, y se define como una estrategia que tiene por objeto reducir tanto la entrada de los materiales como la producción de desechos de materias primas, cerrando los flujos económicos y ecológicos de los recursos. En la actualidad es la principal estrategia de Europa para generar crecimiento y empleo, con el

respaldo del Parlamento Europeo y el Consejo Europeo. De hecho, la Comisión Europea, como órgano colegiado, ha adoptado la eficiencia de los recursos como un pilar central de su estrategia económica estructural Europa 2020 (Europea, 2010).

El modelo económico europeo actual consistente en un proceso lineal de “tomar-fabricar-consumir-eliminar” ya no es sostenible (Crespo, 2016). Este modelo, se viene aplicando desde la revolución industrial, y supone una abundancia de recursos, que no existen, y una eliminación casi sin coste económico, que no es posible. Por lo tanto, resulta indispensable el cambio a un modelo en el que se reduzcan los residuos generados y en el que el valor de los recursos se mantenga el mayor tiempo posible.

La Estrategia europea hacia una economía circular se basa en una Comunicación titulada “Cerrando el círculo: un plan de acción para una economía circular en Europa” y un anexo en el que se incluyen más de 50 acciones clave en las principales áreas de acción, sectores y medidas para fomentar la innovación (Europea, 2015). En cuanto al campo de la edificación, esta estrategia pretende considerar toda la vida útil de los productos de construcción y demolición, desde las materias primas y el diseño inicial, hasta su eliminación mediante su reciclado.

1.1.1 La construcción y el medioambiente

Según el último informe del Panel Internacional de Recursos (IRP), del 2016 del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), la cantidad de materias primas extraídas en el planeta se ha triplicado en las últimas cuatro décadas (Figura 1).

Esto sucede porque existe una relación entre el uso de los materiales y el crecimiento económico, desacoplar esta relación, según el informe, deberá ser el imperativo de la política ambiental moderna, puesto que es esencial para la prosperidad de la sociedad humana en un entorno natural saludable.

El informe también indica, que el gran aumento en el uso de los combustibles fósiles y otros materiales agudizarán el cambio climático, produciendo un

aumento de la contaminación atmosférica, un agotamiento de los recursos naturales y una reducción de la biodiversidad (UNEP, 2016).

En España en el 2017 se han incrementado las emisiones contaminantes de CO₂ un 4,4%, su mayor aumento en 15 años por lo que la situación resulta alarmante.

Figura 1. Global material extraction (DE) by four material categories, 1970–2010, million tonnes. Fuente: UNEP (2016).

La construcción de edificios no es solo una de las mayores causas de contaminación en Europa, sino que además es una de las mayores fuentes de producción de residuos, que se sitúan entre un 20% y un 30% del total de los mismos. Por este motivo resulta fundamental la búsqueda de alternativas que promuevan y fomenten la minimización de la utilización de recursos naturales, en pro de la reutilización, reciclaje o valorización de los residuos procedentes de la construcción y la demolición.

El reciclaje o reutilización de los residuos de construcción no solamente es fundamental para reducir la cantidad de materias primas extraídas, sino también para evitar la emisión de los gases de efecto invernadero a la atmósfera como consecuencia de su no producción.

Pero hoy en día muchas de las emisiones de dióxido de carbono proceden de este sector de la construcción, por lo que algunos países europeos ya están planteando soluciones para la protección del medio ambiente (Figura 2) y para que el impacto medioambiental producido por el sector sea lo menos dañino posible (Villoria Sáez et al., 2012)

Figura 2. Límites de las emisiones de gases de efecto invernadero de los Estados miembros en 2020 en el marco de la Decisión de Reparto del Esfuerzo. Fuente: Decisión n.º 406/2009/CE.

Además en el sector de la construcción se debe buscar la máxima durabilidad, evitando así la generación y el vertido de más residuos, es decir, se debe mantener el mayor tiempo posible el valor añadido de los productos.

En consecuencia, entenderemos que estaremos construyendo edificaciones con bajo impacto ambiental cuando estemos cumpliendo con los siguientes condicionantes: cuando optemos por productos con contenido en materiales reciclados, que permitan minimizar la extracción de materias primas; cuándoelijamos materiales con alta capacidad de reutilización o de reciclaje; y cuándo optemos por materiales con altas prestaciones en cuanto a durabilidad y mantenimiento que permitan reducir el consumo de energía y las emisiones a la atmósfera (Team, 2012).

1.1.2 La construcción y el ahorro energético

Las emisiones de CO₂ a la atmósfera en el ámbito de la edificación no corresponden únicamente al proceso constructivo, si no que también el entorno construido final, donde pasamos más del 90% de nuestra vida, es, en gran medida, culpable de dicha contaminación (Alavedra, 1997).

Actualmente, en Europa el sector de la edificación es la primera actividad en consumo de energía seguido por la industria y el transporte (IDAE, 2011).

Los edificios representan el 40% del consumo de energía final de la Unión Europea, por ello la Directiva 2012/27/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, en el artículo 4 obliga a que los Estados miembros diseñen una estrategia a largo plazo, que alcance más allá del 2020, destinada a movilizar inversiones para mejorar el rendimiento energético del parque inmobiliario (Ministerio de Fomento, 2014).

Además Europa se caracteriza por su elevada dependencia energética. Su tasa promedio de dependencia de fuentes externas de energía es del 52%, y España con el 76% (Albert Cuchí, Peter Sweatman, 2014), se encuentra dentro las naciones de la UE con mayor dependencia energética, solo superado por Italia entre los países grandes de la UE.

En España el consumo de energía ha crecido conjuntamente con el PIB de manera clara (Figura 3), en cambio las mejoras en la eficiencia energética de los edificios han permitido a otros países, como Dinamarca o Japón, crecer sin incrementar sustantivamente sus necesidades energéticas y las emisiones de gases de efecto invernadero.

Figura 3. Correlación entre consumo energético y PIB en España. Fuente: Investigación y Ciencia, 2012.

Por lo tanto, para disminuir el consumo energético de nuestro país surge la necesidad de buscar nuevas soluciones que mejoren el aislamiento térmico, especialmente en la envolvente del edificio, que a su vez mejoren el confort de los habitantes en el interior de las edificaciones.

Nuestro país está caracterizado en actualmente por un parque de viviendas con importantes deficiencias en el aislamiento, ya que más del 50% de las viviendas fueron edificadas con anterioridad a los años 80, sin ninguna regulación normativa que obligase a una exigencia térmica que contribuyera a limitar su demanda energética (Tejedor, 2013).

Basándonos en estos datos, resulta fundamental la búsqueda de nuevos materiales que contribuyan tanto a reducir la demanda energética en la rehabilitación de estos edificios ya construidos, como para su uso en edificaciones de nueva planta. También sería interesante que estos nuevos materiales, con prestaciones térmicas mejoradas, puedan ser de aplicación tanto para poder resolver patologías relacionadas con la salubridad y habitabilidad en las viviendas construidas, como para alcanzar las prestaciones necesarias para mejorar el confort en las nuevas edificaciones.

1.2. LOS RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN

Según el RD 105/2008 que regula la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición (España, 2008), el residuo de construcción y demolición (RCD) se define como *“cualquier sustancia u objeto que, cumpliendo con la definición de “Residuo” incluida en la Ley 10/1998, se genere en una obra de construcción o demolición”*.

Los residuos de construcción y demolición (RCD) se producen como consecuencia de las construcciones y demoliciones tanto en el ámbito de la ingeniería civil como de la edificación, siendo estos últimos los que representan una mayor dificultad para su reutilización o reciclaje debido a su mayor heterogeneidad (Río Merino, 2010).

En la actualidad el sector de la construcción supone un 34,7 % de los residuos generados en Europa (Figura 4), por lo que independientemente de la crisis económica, que ha incidido fuertemente en el sector provocando un descenso en el volumen de RCD (Coronado et al., 2011), esta cifra sigue resultando alarmante.

Figura 4. Generación de residuos por actividades económicas y hogares, EU-28, 2014.
Fuente: Eurostat, 2017.

En los RCD se incluyen una amplia gama de materiales de procedencia, de los cuales la mayoría son inertes, por lo que no representan peligro para la salud

humana ni contaminan el entorno, pero si es verdad que una pequeña parte de ellos pueden contaminar zonas del subsuelo y acuíferos mediante lixiviación (Alonso et al., 2005).

Los residuos pueden también contaminar la atmósfera en los procesos de incineración que se llevan a cabo en los vertederos, en la Figura 5 se observan las millones de toneladas incineradas en la UE, por lo que resulta fundamental que estos procesos se regulen correctamente.

	Total (million tonnes)	Landfill	Incineration	Energy recovery (%)	Backfilling	Recycling
EU-28	2 319.5	47.4	1.5	4.7	10.2	36.2
Belgium	42.8	8.2	4.3	13.6	0.0	73.9
Bulgaria	175.7	97.9	0.0	0.1	0.0	2.0
Czech Republic	19.9	17.3	0.4	5.1	29.1	48.1
Denmark	17.7	21.7	0.0	20.7	0.0	57.6
Germany	370.7	19.2	2.3	10.5	25.3	42.7
Estonia	20.7	65.6	0.0	2.5	11.9	20.0
Ireland	10.0	42.6	0.1	7.2	37.4	12.7
Greece	67.1	88.4	0.0	0.2	8.1	3.2
Spain	103.4	47.9	0.0	3.4	12.6	36.1
France	299.7	29.3	2.0	4.5	10.7	53.6
Croatia	3.5	51.1	0.0	1.4	2.0	45.5
Italy	129.2	16.0	5.2	1.6	0.2	76.9
Cyprus	1.8	58.9	0.0	1.7	25.9	13.5
Latvia	1.9	34.8	0.0	8.7	0.9	55.5
Lithuania	4.5	67.6	0.1	4.1	2.5	25.8
Luxembourg	8.5	38.3	0.0	2.5	16.0	43.3
Hungary	13.7	39.4	0.7	8.9	3.7	47.3
Malta	1.6	28.9	0.4	0.0	37.5	33.3
Netherlands	130.6	45.4	1.0	7.9	0.0	45.7
Austria	53.9	38.6	0.2	6.5	20.1	34.7
Poland	182.4	24.9	0.4	2.7	21.5	50.5
Portugal	9.9	31.8	10.0	3.1	0.0	55.0
Romania	172.2	94.4	0.0	1.3	0.6	3.7
Slovenia	5.4	9.2	0.6	4.9	33.5	51.8
Slovakia	7.1	53.8	0.8	4.4	0.0	40.9
Finland	93.3	80.9	0.5	4.8	0.0	13.8
Sweden	163.3	84.4	0.1	4.7	1.6	9.3
United Kingdom	209.0	41.5	3.6	0.9	10.4	43.6
Iceland (*)	0.5	30.7	0.0	2.7	0.6	66.0
Norway	11.7	17.9	0.5	35.8	5.3	40.5
Montenegro	1.0	98.8	0.0	0.1	0.0	1.0
FYR of Macedonia	1.5	98.7	1.3	0.0	0.0	0.0
Albania	1.2	74.8	3.1	0.5	0.0	21.6
Serbia	49.4	97.3	0.0	0.1	0.0	2.6
Turkey	79.3	70.2	0.0	0.7	;	29.0

Figura 5. Tratamiento de residuos en la UE-28, 2014 (millones de toneladas). Fuente: European Comission, 2017.

Por tanto, en este sentido la unión europea está invirtiendo grandes esfuerzos en el estudio de la gestión de los RCD, ya que pretende que se reduzcan los impactos medioambientales y de salud producidos por los residuos generados, y a su vez mejorar la eficiencia en el uso de los recursos de la UE.

En consecuencia, el objetivo fundamental es tratar de minimizar la producción de residuos, en segundo lugar, cuando ya se hayan generado, promover la utilización de los residuos como recursos, y en tercer lugar la eliminación

segura de los residuos no reciclables (Principio de Jerarquía), tal y como contempla en el RD 105/2008.

1.2.1. Marco legal

A nivel europeo en el marco de la Estrategia 2020” Una hoja de ruta para una Europa que emplee de forma eficiente los recursos”, la gestión de los residuos se ha convertido en uno de sus pilares fundamentales.

Sobre los objetivos concretos que se marca la Comisión Europea, se relacionan los que han sido revisados (Europea C., 2015):

- Objetos comunes de la UE de 2015 a 2030:
 - o Reciclado del 65% de los residuos municipales.
 - o Reciclado del 75% de los residuos de envases.
- Objetivo vinculante de la UE de 2015 a 2030:
 - o Reducción de la eliminación en vertedero a un máximo del 10% de todos los residuos.
- Medidas para promover la reutilización y estimular la cooperación industrial, convirtiendo los subproductos de una industria en materias primas de otras.
- Se darán incentivos económicos para que los fabricantes pongan en el mercado productos más ecológicos. También se apoyarán a los regímenes de recuperación y reciclado.
- Los métodos de cálculo de los porcentajes de reciclado en toda la UE se simplificarán y mejorarán para una mejor armonización.

Desde la Directiva Marco Europea 2008/98/CE (Europea U., 2008) se ha pretendido eliminar la correlación que existe entre el crecimiento económico y la generación de residuos. Los países miembros han materializado este hecho mediante el desarrollo de marcos normativos que incentivan la gestión de los RCD a lo largo de su ciclo de vida, reduciendo las emisiones de CO₂.

A pesar de todo, estos incentivos políticos no han sido suficientes, ya que la tasa media de reutilización de RCD de la UE se sitúa en el 46% (Calvo, 2014), muy por debajo del 70% que es el objetivo marcado en la Directiva Marco de Residuos para el año 2020.

En España la gestión de los Residuos de construcción y demolición (RCD) está regulado por: el Real Decreto 105/2008 (Presidencia, 2008), la Ley 22/2011 de residuos y suelos contaminados (Jefatura del Estado, 2011), Programa Estatal de Prevención de Residuos 2014-2020 y el Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos (PEMAR) 2016-2022 (Ministerio de Agricultura, 2015).

Por tanto, a nivel estatal el régimen jurídico de los RCD viene definido por el Real Decreto 105/2008, de 1 de febrero, por el que se regula la producción y gestión de los RCD, que establece tres nuevas figuras en la política española sobre RCD: el productor de RCD, el poseedor de RCD, y el gestor de RCD.

Además, el Real Decreto establece el orden de preferencia con respecto a la gestión de los RCD, en primer lugar, prevenir, luego reutilizar, reciclar, valorizar y por último el depósito en vertedero (Principio de Jerarquía).

En cambio, no fue hasta la Ley 22/2011 de residuos y suelos contaminados (Jefatura del Estado, 2011), cuándo se establecieron objetivos cuantitativos en la prevención, reciclado o vertido de los RCD. La ley concluye que antes del 2020 se debe garantizar que el 70% en peso de los residuos no peligrosos, procedentes de construcción y demolición, sean destinados a la preparación para la reutilización, el reciclado y otras formas de valorización de los materiales.

Con posterioridad a la Ley 22/2011 se elaboró el Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos (PEMAR) 2016-2022 (Ministerio de Agricultura, 2015), para orientar la política de residuos a nivel estatal, promoviendo las medidas para mejorar las deficiencias detectadas en la legislación existente, y promoviendo las actuaciones que proporcionen un mejor resultado ambiental a la vez que aseguren la consecución de los objetivos legales. Se desarrolla un apartado específico de los RCD y otro de los suelos contaminados. Además, este Plan incluye los residuos domésticos y comerciales, los residuos industriales, los residuos con legislación específica, los residuos agrarios y los residuos sanitarios. También se establecen una serie de objetivos cuantitativos específicos sobre los RCD.

Todo este régimen jurídico se complementa con el Programa Estatal de Prevención de Residuos 2014-2020, que desarrolla la política de prevención de residuos conforme a la normativa vigente para avanzar en el cumplimiento del objetivo de reducción de los residuos generados en 2020 en un 10 % respecto del peso de los residuos generados en 2010. Este Programa Estatal describe la situación actual de la prevención en España y hace un análisis de las medidas de prevención existentes, valorando su eficiencia.

Estas normas pretenden fomentar las medidas necesarias para prevenir, reutilizar, valorizar y gestionar correctamente los RCD, definiendo las obligaciones de todos los agentes implicados en el proceso constructivo.

Cabe mencionar que en el territorio español la gestión de los RCD corresponde a las Comunidades Autónomas, a excepción de los RCD procedentes de las obras menores domiciliarias (Río Merino, 2010), por tanto, las Comunidades Autónomas han tenido que desarrollar su propia legislación adaptándola a las particularidades de su territorio.

1.2.2. Situación actual

Más de la mitad de los residuos generados en el planeta son residuos de construcción y demolición (RCD) (Tam, 2009), pero estos tienen la ventaja de que poseen altas posibilidades de recuperación y reutilización en aplicaciones propias al ámbito del que se produjeron.

La cantidad de residuos generados en Europa en el sector de la construcción durante el año 2014, expresado en toneladas, puede observarse en la Figura 6, constatándose que ha habido diferencias considerables entre la producción de RCD en los distintos Estados miembros.

Figura 6. Cantidad total de residuos generados en el sector de la construcción, en toneladas, en los países de la UE en el 2014. Fuente: Eurostat 2016.

Francia es el país de la UE que más residuos generó, seguida por Alemania, Reino Unido, Países Bajos e Italia.

Por la importancia de la gran cantidad de RCD generados, los países de la Unión Europea (Figura 6) están poniendo en marcha políticas de cara a reducir los efectos negativos de la mala gestión de los residuos que se producen en el medio ambiente y en la salud humana.

Por otro lado, cabe destacar que la mayor práctica del reciclado de productos de construcción y demolición la llevan a cabo los países del norte de Europa (Alemania, Dinamarca, Finlandia y Holanda), frente a los países de sur (España, Francia e Italia) que son los que menos reciclan.

Generalmente esto es debido a que estos primeros países están caracterizados por tener históricamente un mayor respeto al medio ambiente, ya que llevan realizando más tiempo políticas y prácticas sostenibles (Montenegro, 2016).

La tasa de reciclaje está muy vinculada también al procesamiento de los RCD. Las plantas de reciclaje de estos productos presentan una variada cantidad de

equipos, procesos y características técnicas. Mientras algunas instalaciones de reciclaje poseen varias líneas de producción con una amplia gama de subproductos y calidades, otras están formadas por una simple unidad móvil.

Como promedio el porcentaje de RCD reciclado en Europa es aproximadamente del 36,2% sobre el total generado (Figura 6). Esto queda muy alejado aún del objetivo exigible en la Directiva Marco de residuos que marca que el 70% de RCD debe ser reciclado (excluyendo las tierras).

Según el Instituto Nacional de Estadística (INE) en España el sector de la construcción ha sufrido en los últimos años uno de sus peores ciclos de recesión, agravado porque el ciclo anterior fue de una gran expansión. Ese descenso tiene su reflejo en la cantidad de residuos generados durante este último periodo, que según las estadísticas del INE realizadas conforme al Reglamento Europeo 2150/2002 (con exclusión de los residuos peligrosos y del material en estado natural como se define en la categoría 17 05 04”), de 25 de noviembre, relativo a las estadísticas sobre residuos, en el periodo 2007-2012 se ha reducido en gran medida la generación de RCD en nuestro país; se ha pasado de unos 42 millones de toneladas en el año 2007 a 27 millones de toneladas de RCD en 2012, como se puede observar en la Tabla 1.

	Residuos Generados (t)	Residuos destinados a Valorización material (t)	Residuos destinados a Operaciones de relleno (t)	Residuos destinados a Incineración (t)	Residuos depositados en vertedero (t)
No Peligrosos	27.637.698	19.007.146	4.328.999	0	4.301.553
Peligrosos	66.156	3.878	0	0	62.278
Totales	27.703.854	19.011.024	4.328.999	0	4.363.831

Tabla 1. Generación y gestión de residuos de construcción y demolición en 2012.
Fuente: Plan estatal marco de gestión de residuos (PEMAR 2016-2022).

Una correcta gestión de los RCD se realiza, a través de las plantas de transferencia, de las plantas de tratamiento (fijas o móviles) y de los vertederos. Estas instalaciones deben cumplir los requisitos del Real Decreto 1481/2001, de 27 de diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero. A continuación, se muestra en la Tabla 2 la distribución

por Comunidades Autónomas de las instalaciones de tratamiento incluidos los vertederos que reciben RCD.

COMUNIDAD AUTÓNOMA	Plantas de transferencia (nº)	Plantas de tratamiento fija (nº)	Plantas de tratamiento móvil (nº)	Vertederos (nº)
Andalucía	92	119	21	71
Aragón	18	6	1	5
Asturias	3	4	5	1
Baleares*	6	2	s/d	1
Canarias	0	23	s/d	7
Cantabria	12	4	12	2
Castilla-la Mancha	s/d	28	27	12
Castilla y León	0	45	0	3
Cataluña	12	50**	0	57
Ceuta	s/d	s/d	s/d	s/d
Comunidad Valenciana	s/d	s/d	s/d	s/d
Extremadura	16	21	1	0
Galicia	3	43	21	5
La Rioja	s/d	16	0	2
Madrid	10	14	0	4
Melilla	s/d	s/d	s/d	s/d
Murcia	2	4	32	19
Navarra	s/d	7	3	7
País Vasco	s/d	s/d	11	s/d
Total	174	386	134	196

Tabla 2. Número de instalaciones de transferencia, de tratamiento y vertederos que reciban RCD en 2013. Fuente: Plan estatal marco de gestión de residuos (PEMAR 2016-2022).

Nota: (s/d: sin datos; * 45 disponen de partes móviles).

La gestión de estos residuos, tanto peligrosos como no peligrosos, se debe realizar mediante gestores autorizados (Figura 7), y en la obra se ha de realizar una separación de los diferentes tipos de residuos, y no mezclar ni diluir cada tipo de los residuos peligrosos con otros tipos de residuos, tanto peligrosos como no peligrosos.

En la Comunidad de Madrid existen un total de 14 plantas de tratamiento fijas de residuos, como el Complejo de Tratamiento Integral de Residuos de Construcción y Demolición situado en la localidad de El Molar.

Figura 7. Complejo de Tratamiento Integral de Residuos de Construcción y Demolición en El Molar. Fuente: Elaboración propia.

La cantidad de empresas interesadas en el reciclado de RCD ha ido creciendo gradualmente desde 1998, alcanzando su máximo en el año 2004, pero recientemente este crecimiento ha disminuido debido al desplome que ha sufrido la industria de la construcción (Eloy Asensio et al., 2016).

La disminución de generación de residuos RCD en España en los últimos años, también ha provocado que algunas plantas de tratamiento no reciban suficientes residuos para continuar con su actividad.

Además de fomentar el reciclaje de los residuos generados, también será importante la creación de nuevos mercados de productos reciclados, o productos que incorporen residuos pudiendo minimizar el vertido de estos. Esto necesitará apoyo y medidas gubernamentales, ya que hoy en día la participación del gobierno se limita a promulgar y hacer cumplir la legislación orientada a la gestión de RCD.

1.2.3. La gestión de los RCD

Los países miembros de la UE están obligados a cumplir los principios y objetivos introducidos por la legislación comunitaria en materia de residuos.

Se pretende convertir Europa en una sociedad eficiente en el uso de los recursos, basada en el principio de las 3R (Yeheyis, 2013) donde la reducción

o prevención es la primera opción de gestión, seguida de la reutilización del reciclado, y de otras formas de valorización, y, por último, de la eliminación de los residuos (Figura 8).

La gestión de los RCD se realiza en función del origen de los mismos, domiciliario o industrial, ya que su régimen jurídico es diferente. Así, los RCD domésticos son residuos urbanos de competencia municipal y de las administraciones correspondientes, mientras que la correcta gestión de los RCD industriales recae sobre el poseedor (Comunidad Valenciana, 2008).

De cualquier manera, el sistema de gestión de RCD está basado en el principio de “el que contamina paga”, según el cual el titular del residuo está obligado a gestionarlo correctamente, dando prioridad al reciclado frente a otras formas de valorización y frente a la eliminación.

Figura 8. Jerarquía de los residuos. Fuente: Agencia Europea de Medio Ambiente, 2014.

La entrada en vigor del Real Decreto 105/2008 cambia significativamente la situación jurídica de los RCD en España, especialmente en lo referente a las obligaciones de cada uno de los agentes involucrados en su gestión:

- El productor de RCD tiene la obligación de incluir en el proyecto de ejecución de obra un Estudio de gestión de RCD. Este debe incluir una estimación de la cantidad y una clasificación de los residuos, con su valoración del coste previsto de su gestión. Así mismo incluirán las medidas para la prevención de residuos en la obra, las operaciones de reutilización, valorización o eliminación a que se destinarán esos

residuos, las medidas para su separación, los planos con las instalaciones previstas para tal efecto y las prescripciones del pliego de prescripciones técnicas particulares en relación con las operaciones de gestión de los residuos. También debe hacer un inventario de residuos peligrosos y disponer de la documentación que acredite la correcta gestión de los residuos de su obra.

- El poseedor tiene la obligación de presentar a la propiedad de la obra un Plan de gestión de residuos en el que se especifique como se aplicará el Estudio, también está obligado a sufragar los costes de la gestión de los mismos y a facilitar al productor la documentación que acredite la correcta gestión de los residuos.
- El gestor deberá llevar un registro y clasificación de los residuos generados, poner a disposición de las autoridades competentes este registro y extender al poseedor o al gestor que le entregue residuos los certificados acreditativos de los residuos recibidos.

Estas específicas definiciones de responsabilidades que figuran en el Real Decreto facilitan una correcta gestión de los residuos.

Para que se realice una correcta gestión de los RCD en el II PNRC D 2008-2015 se define los distintos tipos de destino para los RCD, pudiendo ser:

- Plantas de transferencia: "Son instalaciones para el almacenamiento temporal de los RCD que posteriormente van a ser tratados en instalaciones localizadas a grandes distancias. Su cometido principal es agrupar residuos y abaratar costes de transporte, si bien en ocasiones se efectúa en ellas algún proceso menor de triaje y clasificación de las fracciones de los residuos, buscando mejorar o adecuar las características de los RCD enviados a las instalaciones de tratamiento".
- Plantas de tratamiento: Son instalaciones de tratamiento de RCD en las que se seleccionan, clasifican y valorizan las diferentes fracciones que contienen estos residuos, a fin de obtener productos aptos para su utilización directa, o residuos cuyo destino será otro tratamiento posterior de valorización o reciclado, y si éste no fuera posible, se eliminaría en vertedero. Pueden ser fijas o móviles.

- Plantas fijas: son instalaciones ubicadas en un emplazamiento determinado, con autorización administrativa para realizar operaciones de tratamiento de RCD, cuya maquinaria (fundamentalmente los equipos de trituración) es fija; estas plantas no operan fuera del emplazamiento donde estén ubicadas.
- Plantas móviles: están constituidas por maquinaria y equipos que se desplazan a las obras con una determinada autorización, para tratar en origen o en centros de tratamiento para realizar temporalmente determinados tratamientos.
- Vertederos: son instalaciones para el depósito definitivo de los RCD. Dichas instalaciones deben cumplir los requisitos que les sean de aplicación incluidos en el Real Decreto 1481/2001, de 27 de diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero.

En el territorio español, existe una gran variedad de modelos en la gestión de los RCD, debido a que la participación de los gobiernos está relacionada directamente con las políticas provinciales o regionales. Así en determinadas Autonomías como Andalucía, País Vasco, Castilla la Mancha, Extremadura, las Islas Canarias y Melilla, son los gobiernos los que han construido y explotan las plantas de reciclaje, en otras regiones, al contrario, la construcción y gestión depende únicamente de iniciativas privadas (Asensio, 2016).

Mencionar finalmente, que los RCD se clasifican en el capítulo 17 “Residuos de la construcción y demolición” de la Lista Europea de Residuos (LER), aprobada por Orden MAM/304/2002, y más concretamente en los siguientes códigos LER:

17 01 Hormigón, ladrillos, tejas y materiales cerámicos.

17 02 Madera, vidrio y plástico.

17 03 Mezclas bituminosas, alquitrán de hulla y otros productos alquitranados.

17 04 Metales (incluidas sus aleaciones).

17 05 Tierra (incluida la excavada de zonas contaminadas), piedras y lodos de drenaje.

17 06 Materiales de aislamiento y materiales de construcción que contienen amianto.

17 08 Materiales de construcción a partir de yeso.

17 09 Otros residuos de construcción y demolición.

Por último, cabe destacar que los RCD que más comúnmente se gestionan, son los correspondientes a los códigos LER 17 01, 17 09 y 17 05.

1.3. LOS AISLAMIENTOS TÉRMICOS EN EDIFICACIÓN

A partir de la entrada en vigor de del Código Técnico de la Edificación (aprobado mediante R.D. 314/2006) en el sector de la construcción se deben considerar obligatoriamente medidas de eficiencia energética en el proyecto de un edificio.

La primera de las medidas del CTE, dentro del orden lógico de realización de un proyecto es la “Exigencia Básica HE 1: Limitación de la demanda de energía”, que dice: *Los edificios dispondrán de una envolvente de características tales que limite adecuadamente la demanda energética necesaria para alcanzar el bienestar térmico en función del clima de la localidad, del uso del edificio y del régimen de verano y de invierno, así como de sus características de aislamiento e inercia, permeabilidad al aire y exposición a la radiación solar, reduciendo el riesgo de aparición de humedades de condensación superficiales e intersticiales que puedan perjudicar sus características y tratando adecuadamente los puentes térmicos para limitar las pérdidas o ganancias de calor y evitar problemas higrotérmicos en los mismos.*

Los materiales aislantes térmicos son aquellos que son malos conductores del calor y por lo tanto son capaces de frenar la intensidad de un flujo térmico, además están caracterizados por tener un coeficiente de conductividad térmica (λ) lo más pequeño posible (Rougeron, 1977).

Por esto los materiales aislantes térmicos contribuyen a mejorar el confort térmico en el interior de las edificaciones y proporcionan un importante ahorro energético, al ser capaces de aumentar la resistencia térmica de la envolvente.

El aislamiento térmico de la envolvente de un edificio en cubiertas, fachadas y suelos reduce las pérdidas de energía debidas a la diferencia de temperatura entre los distintos recintos, disminuyendo el consumo de energía y por lo tanto reduciendo las emisiones de los gases de efecto invernadero a la atmósfera. También favorecen que no se produzcan condensaciones y humedades en el interior, siempre que el aislamiento elegido sea el idóneo y su posición sea la correcta.

1.3.1. Clasificación y características de los aislamientos

En la actualidad existen en el mercado una gran variedad de aislamientos térmicos, cuya principal característica diferenciadora es la conductividad térmica (λ) que poseen.

Estos aislamientos pueden clasificarse en función de:

- Su estructura: fibrosa, granular, alveolar, etc.
- Su origen: sintético, vegetal, animal, mineral, etc.
- Su resistencia en las diferentes zonas de temperaturas (temperaturas máximas de empleo).

Aunque en realidad no existen los aislantes perfectos que tengan nula conductividad térmica (λ), si hay una gran gama de materiales aislantes que presentan unos valores muy bajos. Los principales materiales aislantes térmicos utilizados en construcción son: el poliestireno expandido (EPS), el poliestireno extruido (XPS), la espuma de poliuretano (PUR) y las lanas minerales (MW), pero en este apartado se procede a detallar otros muchos productos clasificándolos en función de su origen.

1.3.1.1. *Aislantes de origen sintético*

Los materiales de aislamiento de origen sintético, junto con los productos de origen mineral, son los de mayor aplicación en la construcción actual. Los

materiales aislantes sintéticos más utilizados en la actualidad son el poliestireno expandido (EPS), el poliestireno extruido (XPS), el poliuretano (PUR), el poliisocianurato (PIR), el polietileno (PEF), la espuma elastómera (FEF) y la espuma de urea-formol (UFFI).

En la Tabla 3 se muestra el rango de densidades de los materiales aislantes orgánicos sintéticos más comercializados en la actualidad.

Se muestra que el material que tiene mejor conductividad térmica es el poliestireno extruido con 0,029 W/m.K, mientras que el que presenta peores valores de conductividad es el poliestireno expandido, llegando a valores de 0,046 W/m.K.

También se observa que el polietileno es el material que tiene mayor densidad con 140 kg/m³, mientras que los que menores densidades presentan son el poliestireno expandido y la espuma de urea formol que pueden alcanzar como valor mínimo 10 kg/m³.

El poliisocianurato y la espuma elastómera son los materiales que se observa que tienen mejores comportamientos en cuanto a reacción al fuego.

En resumen, tras el análisis se concluye que el poliestireno extruido es el material aislante sintético comercializado con valores de conductividad térmica menores, siendo el poliestireno expandido y la espuma de urea formol los de menores densidades.

COMPORTAMIENTO FÍSICO-MECÁNICO Y TÉRMICO DE LOS MORTEROS DE CEMENTO ADITIVADOS CON FIBRAS MINERALES PROCEDENTES DE RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN

AISLANTE SINTÉTICO	Conductividad térmica	Densidad	Factor de resistencia a la difusión μ	Resistencia al fuego EN13 501-1	Formato comercial habitual	Usos habituales	Características
	W/(m K)	kg/m ³					
EPS	0,029-0,046	10-50	20-100	E-F (Combustible. Contribución alta al fuego-Sin clasificar)	Granulado en perlas 4-8mm de diámetro	Cerramientos verticales, cubiertas, sistemas SATE, soleras y pavimentos	Bajo precio, imputrescible y resistente a hongos, bacterias y parásitos, alta absorción y fácilmente inflamable
XPS	0,025-0,042	25-50	100-220	E (Combustible. Contribución alta al fuego)	Granza, paneles	Forjados, cámaras de aire, muros a una cara, cubiertas y soleras	Elevado precio, baja absorción al agua, gran durabilidad y gran resistencia a compresión
PUR	0,028-0,035	30-60	60-150	E (Combustible. Contribución alta al fuego)	Espuma rígida. Acabados duro, semiduro y blando	Proyectado en fachadas, cubiertas, suelos y aislamiento industrial.	Bajo precio y baja absorción al agua
PIR	0,028-0,035	30-60	60-150	Bs1-Bs2 (Combustible. Contribución muy limitada al fuego. Producción baja-media de humos)	Espuma rígida	Proyectado en fachadas, cubiertas, suelos y aislamiento industrial.	Elevado precio, hidrófugo, estructura celular cerrada, imputrescible y no atacable por microorganismos
PEF	0,045	24-140	impermeable	F (Sin clasificar)	Coquillas extruidas y espuma de polietileno reticulado y no reticulado	Aislamiento de tuberías de calefacción, refrigeración, aire acondicionado, fontanería y bajantes	Baja conductividad térmica y alta resistencia a la humedad
FEF	0,036-0,039	48-100	5000-10000	B-s3,d0 (Combustible. Contribución muy limitada al fuego. Producción alta de humos)	Espumas	Aislamiento de tuberías, depósitos y conductos	Elevada resistencia al vapor de agua y buen comportamiento al fuego
UFFI	0,035	10-12	2	F (Sin clasificar)	Espuma rígida	Proyectado en fachadas y cubiertas.	En desuso por su toxicidad

Tabla 3. Características técnicas de los materiales aislantes de origen sintético.
Fuente: Elaboración propia.

1.3.1.2. *Aislantes de origen vegetal*

Los principales materiales aislantes de origen vegetal utilizados en la construcción son la celulosa, el corcho aglomerado, el corcho proyectado, las fibras de madera y agrofibras, el cáñamo, el lino y el algodón.

En la Tabla 4 se muestran las características de los materiales aislantes de origen vegetal más comercializados en la actualidad.

Se observa que, el corcho es, con diferencia, el material con mayor rango de densidades, (100-400) kg/m³, mientras que el cáñamo con 24 kg/m³ presenta la menor densidad de los productos analizados.

En cuanto a la conductividad térmica también se encuentran diferencias, siendo el corcho el que presenta el valor superior llegando hasta 0.065 W/m.K, siendo el lino el que presenta el menor valor con 0.037 W/m.K.

En conclusión, se puede afirmar que el material aislante más ventajoso de origen vegetal en cuanto a su conductividad y densidad es el lino.

AISLANTE VEGETAL	Conductividad térmica	Densidad	Factor de resistencia a la difusión μ	Resistencia al fuego EN13 501-1	Formato comercial habitual	Usos habituales	Características
	W/(m K)	kg/m ³					
Celulosa	0,039 -0,06	28-65	1-2	B-E (Combustible. Contribución alta al fuego)	Insuflado, proyectado o soplado	Fachadas, cubiertas, suelos y aislamiento de particiones interiores.	Buen aislamiento térmico y acústico
Algodón	0,04	25	1-2	F (Sin clasificar)	Mantas	Proyectado en fachadas, cubiertas, suelos y aislamiento industrial.	Buen aislamiento acústico. Combustible
Lino	0,037	30-36	0,5	F (Sin clasificar)	Fibras	Recubrimientos de suelos	Muy duradero, no tóxico y biodegradable
Cáñamo	0,039	24-42	6	E (Combustible. Contribución alta al fuego)	Manta o borra	Bloques para cerramientos	Gran resistencia y capacidad aislante
Corcho	0,04 -0,065	100-400	20	B-E (Combustible. Contribución alta al fuego)	Planchas, bloques o granular	Encolado sobre revestimientos verticales u horizontales	Excelente resistencia mecánica a compresión
Madera	0,038 -0,042	55-175	5	E (Combustible. Contribución alta al fuego)	Paneles	Suelos, paredes, tabiquería seca y cubiertas	Gran absorción acústica y a la humedad

Tabla 4. Características técnicas de los materiales aislantes de origen vegetal. Fuente: Elaboración propia.

1.3.1.3. *Aislantes de origen animal*

Los principales materiales aislantes de origen animal utilizados son la lana de oveja y las plumas de ave. Estos aislantes juntos con los de origen vegetal tienen en la actualidad un auge en su utilización por su carácter ecológico.

En la Tabla 5 se muestra el rango de densidades de los materiales aislantes de origen animal más comercializados en la actualidad.

Se puede observar que la lana de oveja presenta mejores valores de conductividad térmica frente a las plumas de ave.

AILANTE ORIGEN ANIMAL	Conductividad térmica	Densidad	Factor de resistencia a la difusión μ	Resistenci a al fuego EN13 501-1	Formato comercial habitual	Usos habituales	Características
	W/(m K)	kg/m ³					
Lana de oveja	0,036-0,045	20-30	1-2	F (Sin clasificar)	Mantas, placas y granel	Relleno de cámaras	Buena capacidad de regulación higrotérmica, 100%biodegrada ble, no irritante
Plumas de ave	0,038	-	-	-	Mantas de mezclas de plumas	Rellenos	Buena permeabilidad al vapor de agua, muy poco permeable al aire, excelente aislante acústico

Tabla 5. Características técnicas de los materiales aislantes de origen animal. Fuente: Elaboración propia.

1.3.1.4. *Aislantes de origen inorgánico*

Los materiales de aislamiento que tienen su origen en productos minerales además de tener buena conductividad térmica, al proceder de minerales todos ellos son resistentes al fuego (A1). La arcilla expandida, la perlita expandida, el vidrio celular, el hormigón celular o la vermiculita son productos que han venido utilizándose desde hace tiempo. Actualmente, es más común el uso de las lanas minerales: la fibra de vidrio y la lana de roca. Los materiales aislantes de origen mineral, junto con los de origen plástico, son los productos de aislamiento que más habitualmente se incorporan a los sistemas constructivos actuales.

En la Tabla 6 se muestra el rango de densidades de los materiales aislantes minerales más comercializados en la actualidad.

AISLANTE INORGÁNICO	Conductividad térmica	Densidad	Factor de resistencia a la difusión μ	Resistencia al fuego EN13 501-1	Usos habituales	Características
	W/(m K)	kg/m ³				
Arcilla expandida	0,095-0,148	325-750	1	A1 (No combustible. Sin contribución al fuego)	Cubiertas, soleras y recrecidos	Permeable al vapor del agua
Hormigón celular	0,09-0,29	300-1000	6		Fachadas ventiladas y cubiertas	Alta resistencia
Vemiculita	0,052	60-140	-	A1 (No combustible. Sin contribución al fuego)	Soleras y prefabricados	Buena resistencia al fuego
Perlita	0,035-0,062	40-120	-	A1 (No combustible. Sin contribución al fuego)	Cubiertas, rellenos de huecos	Puesta en obra en seco
Lana de roca	0,032-0,042	25-250	<1	A1 (No combustible. Sin contribución al fuego)	5-6	3-6
Lana de vidrio	0,035-0,042	10-120	1	A2 (No combustible. Sin contribución al fuego)	10-12	3-10

Tabla 6. Características de los materiales aislantes de origen inorgánico. Fuente: Elaboración propia.

Se puede observar que la lana de roca es el material con mejor valor de conductividad térmica (0.032 W/m.K), mientras que los peores valores, de los materiales analizados, los tienen el hormigón celular y la arcilla expandida.

Los rangos de densidades analizados resultan muy variables, siendo el hormigón celular y la arcilla expandida los que presentan mayores densidades, llegando hasta los 1000 kg/m³. Por otro lado, las lanas minerales son los que presentan densidades menores, llegando hasta 10 kg/m³ en el caso de la lana de vidrio. En conclusión, la lana de roca y la lana de vidrio son los materiales aislantes inorgánicos comercializados que poseen menores valores de densidades y mejores valores de conductividad térmica.

1.4. LAS FIBRAS MINERALES

La fibra mineral es un material inorgánico, utilizado como material aislante y derivado de materias primas naturales con una estructura de filamentos pétreos entrelazados multidireccionalmente generando una red flexible y abierta, lo que les permite retener aire en estado inmóvil en su interior. Las materias primas que se utilizan más habitualmente para la producción de las fibras minerales son; diabasa, anfibolita, granito y basalto, además de aditivos como dolomita o caliza (Muller et al. 2009).

Se considera fibra cuando la longitud es tres veces superior a diámetro medio de la partícula, de esta estructura derivan sus propiedades como aislantes térmicos, acústicos y de protección contra incendios. Debido a su porosidad abierta pueden retener agua líquida en su interior, por lo que deben emplearse en aplicaciones que estén protegidas del contacto directo con el agua. Si la lana mineral se moja, las propiedades térmicas de la misma se recuperarán hasta alcanzar los valores iniciales, siempre y cuando el agua no ha causado un daño evidente, y se pueda eliminar el agua por evaporación o drenaje.

La fibra mineral es anisótropa y, para muchas propiedades como las propiedades térmicas y mecánicas, el resultado de una medición de su resistencia transversal es diferente de una medición longitudinal.

Las lanas minerales se suelen comercializar en forma de panel rígido o semirrígido, ligados con distintos tipos de resinas, y con o sin recubrimiento.

Las lanas minerales son, en la actualidad, el aislante más empleado en la Unión Europea (Afelma, 2016). Esta gran aceptación en el mercado puede ser debido a su precio competitivo y a su versatilidad para su utilización en todo tipo de obras de edificación.

La cantidad de residuos de lana de roca almacenada ha aumentado dramáticamente en la última década. Además, estos desperdicios son voluminosos por lo que ocupan un gran espacio cuando se almacenan o se depositan en vertederos (Wei-Ting Lin et al., 2012).

1.4.1. Clasificación y características de las lanas minerales

Dentro de las lanas minerales pueden distinguirse dos familias principales: las lanas de vidrio y las lanas de roca, las cuales se elaboran fundiendo arena o rocas basálticas, respectivamente. Las lanas de ambas familias están formadas predominantemente por aluminio y silicato de calcio, aunque difieren en su origen y composición química.

La materia prima para la fabricación de la lana de roca proviene de rocas volcánicas como basalto, diabasa u olivina, junto piedra caliza y/o dolomita al 98%, y un 2% de aglutinantes.

Prácticamente el 98 % de los residuos de lana de roca generados durante la fabricación se reciclan (de ellos, el 100 % de los residuos de lana) incorporándose nuevamente junto con las materias primas en el proceso (Rockwool, 2017).

La lana de vidrio está constituida por filamentos de fibra de vidrio unidos entre sí por un aglutinante o resina termo endurecible, facilitando así que las burbujas de aire que quedan atrapadas entre las fibras impidan la transmisión térmica.

La lana de vidrio se produce a partir de cuarzo, soda, y piedra caliza (Väntsi & Kárki, 2014). Además de reciclar los residuos generados durante la producción incorporándolos al proceso, al igual que se ha mencionado para la lana de roca, actualmente los fabricantes de lana de vidrio están utilizando residuos de vidrios reciclados en el proceso de fabricación (Corning, 2017).

La lana de roca y la lana de vidrio son unos buenos aislantes térmicos debido a su baja conductividad térmica, y tienen una densidad variable (Tabla 7).

FAMILIA LANA MINERAL	Conductividad térmica	Densidad	Factor de resistencia a la difusión μ	Resistencia al fuego EN 13 501-1	Aplicaciones longitud	Diámetro
	W/(m K)	kg/m ³			cm	μ m
Lana de roca	0,032-0,042	25-250	<1	A1 (No combustible. Sin contribución al fuego)	5-6	3-6
Lana de vidrio	0,035-0,042	10-120	1	A2 (No combustible. Sin contribución al fuego)	10-12	3-10

Tabla 7. Características de la lana de roca y la lana de vidrio (Isover Saint-Gobain, 2017; Rockwool firesafe insulation, 2017).

La lana de roca tiene una mayor resistencia al fuego (A1) que la lana de vidrio (A2), ya que al ser de naturaleza volcánica mantiene sus propiedades intactas incluso a elevadas temperaturas. Además de ser incombustible, la lana de roca es químicamente neutra, hidrófuga, inoxidable, imputrescible y no atacable por insectos, bacterias o roedores.

La lana de vidrio destaca por su menor densidad (10-120 kg/m³). Por otro lado, al ser un producto inerte es resistente a los productos químicos (excepto al ácido fluorhídrico), imputrescible, inodoro, no corrosivo, resistente al ataque de insectos y microorganismos y no produce moho.

Las lanas minerales son resistentes al paso del tiempo (40-50 años) sin sufrir apenas variaciones importantes en sus propiedades térmicas (Sálnikov, 2003).

La calidad de las lanas minerales fabricadas en España viene avalada por la marca de AENOR (Asociación Española de Normalización y Certificación), y en edificación cuentan con el Marcado CE, de obligado cumplimiento en toda Europa para los materiales aislantes térmicos.

Además, los productos de lana mineral se encuentran normalizados en toda Europa a través de la Norma UNE-EN 13162:2002 "Productos aislantes térmicos para aplicaciones en la edificación. Productos manufacturados de Lana Mineral (MW). Especificación".

Cabe destacar que los fabricantes españoles de lanas minerales tienen la Marca "N" para sus productos, marca de calidad que concede AENOR, a través de unos procesos de certificación.

En ámbito europeo, la KEYMARK representa una marca de calidad voluntaria para los materiales aislantes térmicos de conformidad con las normas europeas, y en Europa la gran mayoría de los materiales aislantes con esta marca son productos de lana mineral (Afelma, 2016).

1.4.2. Proceso de fabricación de las lanas minerales

Las lanas minerales aislantes se fabrican mediante un proceso denominado rotatorio o centrífugo (Romaniega Piñeiro, 2015). En función del tipo de lana mineral a obtener se introducen en el horno de fusión las materias primas específicas. Una vez fundidas, caen en un hiladero de rotación donde debido a la fuerza centrífuga se extruye el material a través de agujeros situados en las paredes laterales produciéndose el desfibrilamiento.

Para la conversión de las fibras en el producto comercial, se añaden aglutinantes y/o lubricantes que confieren rigidez estructural a la fibra.

Posteriormente se calientan estas fibras embebidas en el aglutinante en el proceso denominado curado, donde las fibras adquieren la resistencia y durabilidad del producto final.

Las etapas finales comprenden el corte de la lana y el empaçado en rollos o paneles a alta presión, para facilitar el almacenamiento y transporte.

1.4.2.1. Lana de roca

En el esquema de la Figura 9 puede observarse el conjunto del proceso de fabricación de la lana de roca por el método denominado rotatorio o centrífugo. Las materias primas utilizadas para su fabricación son basalto, ofita y escoria, usándose el carbón de coque como fuente de energía. Estos materiales se introducen en un horno tipo cubilote y son fundidos hasta convertirse en el vidrio que se transformará posteriormente en lana de roca en fibras. Tras la pulverización de un ligante orgánico, se reúnen las fibras para formar un colchón de lana primaria. Durante este proceso se genera una pequeña parte

de deshechos, los cuales son reciclados mediante la introducción de los mismos de nuevo al horno en forma de briquetas.

Figura 9. Proceso de fabricación de la lana de roca. Fuente: Rockwool, 2015.

La composición de la lana de roca fruto de este proceso es aproximadamente de 98% roca volcánica y 2% ligante orgánico. En ocasiones se pueden adherir diferentes recubrimientos (papeles, aluminios, etc.) por adición de materiales asfálticos o por fusión del polietileno del propio recubrimiento.

1.4.2.2. Fibra de vidrio

En el esquema de la Figura 10 puede observarse el conjunto del proceso de fabricación de la fibra de vidrio por el método denominado rotatorio o centrífugo. Las materias primas utilizadas para su fabricación son arena, piedra caliza y carbonato de sodio. El caudal de vidrio que se centrifuga en el interior de un disco microperforado hace que se formen así los filamentos de vidrio los cuales carecen de conexión entre ellos. Mediante un sistema de pulverizado, se consigue un bañado de las fibras con resinas termo endurecibles, que una vez polimerizadas mantienen el espesor del producto final. En función de la velocidad de línea obtendremos distintas densidades.

En la actualidad se introduce vidrio reciclado en el proceso de producción procedentes de la automoción o botellas de cristal hasta en un 80% (Saint-Gobain, 2017).

Figura 10. Proceso de fabricación de la lana de vidrio. Fuente: Afelma, 2017.

1.4.3. Los residuos de lanas minerales

Debido al aumento de la importancia del aislamiento térmico en el sector de la edificación, se ha producido un aumento en la utilización de lanas minerales, lo que ha supuesto un incremento en la generación de sus residuos.

Las lanas minerales (lanas de vidrio y lanas de roca) son consideradas como "residuos no peligrosos", siguiendo los criterios establecidos en el Lista Europea de Residuos (LER), publicado en España mediante la Orden Ministerial MAM/304/2002, y se encuentran en los siguientes epígrafes de la citada Orden Ministerial:

10 11 03 "Residuos de materiales de fibra de vidrio": para los residuos generados durante el proceso de fabricación.

17 06 04 “Residuos de materiales de aislamiento que no contienen amianto ni sustancias peligrosas”: para los residuos generados en las obras de construcción.

La catalogación en los estos epígrafes se basa en los diferentes estudios y análisis sobre residuos de lanas minerales y en las decisiones adoptadas por parte de las Administraciones de otros países europeos, como Austria, Dinamarca, Finlandia, Francia, Islandia, Irlanda, Noruega, Suiza, Reino Unido o Alemania.

Los fabricantes consultados aseguran que los residuos generados durante el proceso de fabricación son reciclados volviéndolos a incorporar al proceso de fabricación. Sin embargo, los residuos de materiales de aislamiento procedentes de obras de construcción se caracterizan por sus bajos niveles de reutilización, tasa de reciclado y formas de recuperación.

Al no reutilizarse, la cantidad de residuos de fibras minerales de la industria de la construcción resulta difícil de calcular. Pero según el modelo aplicado por Väntsi se puede estimar que en 2020 se generarán en la zona UE-28 más de 2,5 millones de residuos de lanas minerales (Väntsi & Kärki, 2014) cuyo porcentaje de recuperación, reciclaje o reutilización resulta desconocido.

En base a la revisión de la literatura consultada, los obstáculos al reciclaje de las lanas minerales incluyen cuestiones económicas, cuestiones relacionadas con la pureza y los efectos sobre la salud de los residuos de lana mineral.

Por otro lado, las propiedades materiales de los desechos de lana mineral, como el aislamiento térmico o la resistencia al fuego, podrían proporcionar propiedades mejoradas en los productos que utilizan residuos de lana mineral como materia prima (Väntsi & Kärki, 2014).

1.5. LOS MORTEROS DE CEMENTO EN LA CONSTRUCCIÓN

En los manuales de materiales de construcción históricos se definen los morteros como la mezcla de aglomerante-conglomerante, árido y agua, para

unir o proteger las fábricas, y este es el concepto que todavía se mantiene a día de hoy.

Según la Real Academia de la Lengua, se define “mortero” como el “conglomerado o masa constituida por arena, conglomerante y agua, que puede contener además algún aditivo”.

Además, las normas UNE-EN 998-1 (AENOR, 2010) y UNE-EN 998-2 (AENOR, 2012) clasifican dos tipos de mortero en función de su uso:

- Mortero para revoco/enlucido: Mezcla compuesta de uno o varios conglomerantes inorgánicos, de áridos, de agua y a veces de adiciones y/o de aditivos, para realizar revocos exteriores o enlucidos interiores.
- Mortero para albañilería: Mezcla compuesta de uno o varios conglomerantes inorgánicos, de áridos, de agua y a veces de adiciones y/o de aditivos, para fábricas de albañilería (fachadas, muros, pilares, tabiques), rejuntado y trabazón de albañilería.

Los morteros pueden contener uno o varios conglomerantes. Dentro de los morteros con más de un conglomerante, llamados morteros bastardos, se encuentran los morteros de cemento y cal y los morteros de cal y yeso.

En el presente trabajo se hará referencia exclusivamente a los morteros cuyo conglomerante es el cemento portland.

1.5.1. Origen y evolución

Muchos autores sitúan el origen de los morteros prehistóricos en el inicio de la Historia del hombre (Ben Yair et al.,1961), cuando se comenzó a utilizar el fuego para calentarse en las cavernas de rocas calizas la cal calcinada se apagaba en contacto con la humedad y comenzaron a utilizar el polvo resultante por sus propiedades ligantes.

Se han encontrado restos de utilización de morteros de cal en pavimentos en Nevali çori (Turquía), que datan del 10.000 al 8.000 a. de C (Galindo et al., 1995).

Sin embargo, autores como Furlan (1975) afirman que no se han hallado en Europa central ni septentrional ningún ejemplo de la utilización de morteros de cal.

En la antigüedad el uso de los morteros de yeso era una práctica habitual únicamente entre la civilización egipcia (Ragai et al., 1987), como ejemplo en la pirámide de Keops fue utilizado el yeso para el mampostado de los bloques.

La cal como ligante y el mortero de cal se mencionan ya en la Biblia en Deuteronomio 5,27,2 (Álvarez et al., 1995).

Mientras que el empleo de la cal como ligante tiene su origen en el periodo neolítico, el uso del mortero de cal tiene su origen en las civilizaciones griegas y romanas. Ya Vitruvio describió el pulimentado de los morteros como una antigua técnica griega, y afirmaba que este tratamiento ayudaba a prevenir la contracción y las rupturas. Los romanos además del pulimentado heredaron de los griegos la técnica de añadir sustancias (cenizas) a la mezcla que favorecían las propiedades de los morteros; sin embargo, mejoraron tanto las técnicas de aplicación de los morteros como sus procedimientos de fabricación.

En la Edad Media no se produjeron avances destacables en la fabricación de los morteros, y hasta el siglo XVIII no se comenzaron a fabricar los ligantes hidráulicos.

Los ligantes hidráulicos modernos fueron descubiertos por Smeaton, en la construcción del faro de Eddyston (Plymouth), donde pudo concluir que la presencia de arcilla en la caliza era uno de los factores principales en la hidráulica de los morteros.

Louis Vicat en 1812 fue el primero en realizar unas investigaciones que describían las propiedades hidráulicas de las mezclas de caliza y arcilla, y estableció el sistema de fabricación que se sigue empleando en la actualidad. Louis Vicat encaminó la fabricación del cemento por medio de mezclas calizas y arcillas dosificadas en las proporciones convenientes y molidas conjuntamente. Por la cocción hay una deshidratación de la arcilla, luego una descomposición de la caliza y después la combinación entre la cal, la sílice y los óxidos de hierro y aluminio, originan algunos silicatos de calcio hidratados. Por tanto, las

características hidráulicas de los morteros resultantes dependían del contenido en arcilla, la temperatura y el tiempo de cocción. Este sistema es de vía y orientó el inicio del actual proceso de fabricación.

En 1824, James Parker y Joseph Aspdin patentaron el Cemento Portland, material de elevada resistencia que obtuvieron de la calcinación de una caliza arcillosa y mezclando la cal resultante con arcilla y tierra, para luego hidratar la mezcla. El nombre se debió a motivos comerciales, ya que su color y dureza que recuerdan a las piedras de Portland. Como se empleaban temperaturas relativamente bajas, la calidad del cemento no podía ser alta (Furlan, 1990).

A finales del siglo XIX se perfecciona el proceso de fabricación que posteriormente desencadenó la fabricación de los actuales cementos Portland, material íntimamente ligado a la producción de los morteros de hoy.

En el siglo XX la tecnificación de los materiales ha hecho que los morteros industriales adquiriesen mayor relevancia en detrimento de los hechos in situ.

También los mayores controles de calidad de los materiales y por lo tanto de las propiedades de los mismos, ha hecho que se haya potenciado el desarrollo del mortero seco.

1.5.2. Clasificación de los morteros de cemento

El mortero de cemento es un material que se emplea en diferentes aplicaciones constructivas en edificación, pudiéndose realizar la siguiente clasificación en función de las aplicaciones más frecuentes:

- Morteros para formación de fábricas de albañilería
- Morteros de revestimiento
- Morteros para solados
- Morteros cola
- Morteros de reparación
- Morteros impermeabilizantes

Otra clasificación elaborada por el Comité Europeo de Normalización es la siguiente (CEN, 2017):

- Morteros según la demanda
- Morteros según el sistema de fabricación
- Morteros según el ligante
- Morteros según las propiedades y/o campo de aplicación

Así mismo en las normas UNE-EN 998-1 (AENOR, 2010) y UNE-EN 998-2 (AENOR, 2012) vienen recogidas las clasificaciones de los morteros de albañilería, y de los morteros para revoco y enlucido en función de tres parámetros:

- Morteros según la demanda

El desarrollo industrializado de los morteros ha provocado que se puedan producir morteros a medida de las necesidades, tanto en lo relativo a las propiedades de resistencia que tendrá el mortero ya fabricado (morteros diseñados), como en la composición y proporción de la mezcla (morteros de recta o prescritos).

- Morteros según el sistema de fabricación

El avance tecnológico ha permitido que la fabricación de los morteros haya evolucionado en los últimos tiempos, pudiéndose distinguir tres grandes grupos en este sentido:

- Morteros hechos «in situ»: compuestos por los componentes primarios, dosificados, mezclados y amasados con agua en la obra.
- Morteros industriales semi-terminados: dentro de este grupo existen los morteros predosificados y los morteros premezclados de cal y arena.
- Morteros hechos en fábrica: son aquellos que se han dosificado, mezclado y, en su caso, amasado con agua en fábrica y suministrado al lugar de construcción. Estos morteros pueden ser «morteros secos» o «morteros húmedos».
- Morteros según las propiedades y/o su utilización.

Esta clasificación divide los morteros de albañilería en los siguientes tipos:

- Morteros para uso corriente (G)
- Morteros para juntas y capas finas (T)
- Morteros ligeros (L)

Y los morteros para revoco y enlucido los divide en:

- Morteros para uso corriente (GP)
- Ligeros (LW)
- Para revoco coloreado (CR)
- Para revoco monocapa (OC)
- Para renovación (R)
- Para aislamiento térmico (T)

1.5.3. Componentes de los morteros de cemento

Los morteros de cemento tienen la característica de que el conglomerante, que actúa como parte ligante en la mezcla, es el cemento.

Según las normas UNE-EN 998-1 (AENOR, 2010) y UNE-EN 998-2 (AENOR, 2012) las características de las materias primas que componen los morteros deben permitir obtener un producto terminado conforme a los requisitos que exigen las citadas normas, pero no marca en qué proporción deben ir los diferentes componentes de los morteros.

Cabe destacar que algunos marcados de calidad como el DIT o el DIT Plus del Instituto Eduardo Torroja, incluyen además para algunos de los morteros la obligación de cumplir lo indicado en la Instrucción de Hormigón Estructural (EHE) (Ministerio de Fomento, 2008).

1.5.3.1. Conglomerante

El cemento es un conglomerante hidráulico, es decir, un material inorgánico que una vez endurecido conserva su resistencia y estabilidad incluso bajo el agua. Utilizado en los morteros, debe proporcionar tiempo suficiente de trabajabilidad a la mezcla para alcanzar unos niveles de resistencias preestablecidos y presentar una estabilidad de volumen a largo plazo.

El cemento es en la actualidad el principal conglomerante utilizado en los morteros, debido a que presenta la mayor rapidez de endurecimiento y las mayores prestaciones mecánicas.

Está formado por diferentes componentes que, dosificados mediante un proceso de producción controlado, proporcionan al cemento las características físicas, químicas y resistencias adecuadas al uso deseado.

El principal componente es el Clinker portland que está constituido principalmente por silicatos de calcio obtenidos por la mezcla homogénea y determinada procedente de la cocción de piedras calcáreas y arcilla después de haber sido finamente molidos (Furlan & Alou, 1989).

Desde el punto de vista de composición normalizada existen dos tipos de componentes:

- Componentes principales: Material inorgánico, especialmente seleccionado, usado en proporción superior al 5% en masa respecto de la suma de todos los componentes principales y minoritarios.
- Componentes minoritarios: Cualquier componente principal, usado en proporción inferior al 5% en masa respecto de la suma de todos los componentes principales y minoritarios

Los componentes principales del cemento son (IECA, 2017):

- Clinker (K)
- Clinker aluminato de calcio
- Escoria granulada de horno alto (S)
- Esquistos calcinados (T)
- Humo de Sílice (D)
- Puzolana natural (P)
- Puzolana natural calcinada (Q)
- Cenizas volantes silíceas (V)
- Cenizas volantes calcáreas (W)

- Caliza (L)
- Caliza de bajo contenido de carbono orgánico total (LL)

La instrucción para la recepción de cementos RC-08 (España, 2008) marca las prescripciones técnicas mínimas que deben tener los cementos y regula así mismo su recepción, todo ello para que se cumplan los requisitos esenciales exigibles. Así mismo deberán cumplir las restricciones que establece el Código Técnico de las Edificación (Fomento, 2006) para los cementos utilizados para los morteros de fábricas de acuerdo con las diferentes clases, generales y específicas de exposición.

Los cementos sujetos al marcado CE se recogen en el Anejo 1 de la citada Instrucción RC-08 y en las normas que se derivan de la norma UNE-EN 197-1:2011 (AENOR, 2011), y se pueden clasificar en:

- Cementos comunes (UNE-EN 197-1:2011)
- Cementos de escorias de horno alto de baja resistencia inicial (UNE-EN 197-4:2005)
- Cementos especiales de muy bajo calor de hidratación (UNE-EN 14216:2005)
- Cementos de aluminato de calcio (UNE-EN 14647:2006)
- Cementos de albañilería (UNE-EN 413-1:2011)

Existen 27 tipos de cementos comunes, pudiéndose agrupar todos ellos en los 5 siguientes principales tipos:

- CEM I: Cementos Portland
- CEM II: Cementos Portland compuestos
- CEM III: Cementos de escorias de horno alto
- CEM VI: Cementos puzolánicos
- CEM V: Cementos compuestos

En el anejo 8 de la instrucción RC-08 figuran los cementos recomendados para emplear en hormigones de uso no estructural (Tabla 8), y especifica también los cementos recomendados en la fabricación de morteros para albañilería (Tabla 9).

Aplicación	Cementos recomendados
Prefabricados no estructurales	Cementos comunes, excepto CEM II/A-Q, CEM II/B-Q, CEM II/A-W, CEM II/B-W, CEM II/A-T, CEM II/B-T y CEM III/C
Solado de pavimentos	Los cementos comunes, a excepción de los cementos CEM I, CEM II/A-D, CEM III/B, CEM II/A-Q, CEM II/B-Q, CEM II/A-W, CEM II/B-W y CEM II/A-T
Hormigones de limpieza y relleno de zanjas	Cementos comunes
Otras aplicaciones de tipo no estructural ejecutadas en obra	Cemento para usos especiales ESP VI-1; Cementos comunes, excepto CEM II/A-Q, CEM II/B-Q, CEM II/A-W, CEM II/B-W, CEM II/A-T, CEM II/B-T y CEM III/C,

Tabla 8. Cementos recomendados para la fabricación de hormigones de tipo no estructural. Fuente: RC-08 (2008).

Aplicación	Cementos recomendados
Morteros de albañilería	Cemento de albañilería Cementos comunes, excepto los tipos CEM I y CEM II/A

Tabla 9. Cementos recomendados para la fabricación de morteros de albañilería. Fuente: RC-08 (2008).

1.5.3.2. Áridos

Los áridos son productos granulares inertes, en general de naturaleza inorgánica, que se utilizan para diversas aplicaciones industriales como la fabricación de morteros.

El árido en el mortero de cemento es un componente clave del mismo, por lo que difícilmente se puede obtener un mortero de calidad si el árido que se incorpora no lo posee (Bustillo Revuelta, 2008). Todas las propiedades del árido resultan fundamentales: tamaño, granulometría, composición, etc., ya que es el componente en peso más importante en el mortero de cemento. Además, es, junto con el cemento, el material que determina el coste final del mortero.

Los áridos deben ser inertes y no modificar las características del mortero, para lo cual no deben ser activos con el cemento, a fin de no alterar el fraguado y el

endurecimiento del mismo, ni deben ser alterados por agentes agresivos externos, como aire, agua, hielo, etc. (Galán Gutiérrez & Amador Blanco, 1994).

La normativa en vigor que regula este material para su uso en morteros es la UNE-EN 13139/AC: 2004 (AENOR, 2004).

Atendiendo a su origen los áridos se pueden clasificar en tres grupos: naturales, que son los que proceden directamente de la naturaleza, artificiales, obtenidos mediante un proceso industrial a partir de materiales inorgánicos y orgánicos, y reciclados, procedentes de derribos de edificaciones y estructuras.

En cuanto a su tamaño la norma los denomina con dos letras (d/D) que especifican el tamaño en mm, menor y mayor, siendo “d” el límite menor del tamiz y “D” el límite superior del mismo. Se prefieren para morteros los siguientes tamaños de árido: 0/1mm, 0/2 mm, 0/4mm, 0/8mm, 2/4mm, 2/8mm.

La norma establece requisitos únicamente referidos a tres aspectos del tamaño de los áridos: a los límites para los tamaños superior e inferior, al filler del árido y al contenido de finos.

En cuanto a los requisitos físicos establecidos por la norma afectan a la densidad de las partículas, la absorción de agua y la resistencia al hielo-deshielo. Por otro lado, los requisitos químicos que se establecen son: el contenido en cloruros solubles en agua, los compuestos que contienen azufre y los componentes que alteran la velocidad de fraguado y el endurecimiento del mortero. Para los áridos artificiales se incluyen también los requisitos de las sustancias solubles en agua y la pérdida por calcinación.

La utilización de áridos reciclados en morteros es una importante contribución al desarrollo sostenible, pero aún no está contemplada en la normativa. Sin embargo, existen desde hace años numerosos estudios (Hincapíe & Aguja, 2003), que demuestran que resulta viable la utilización de estos tipos de áridos en la mezcla en sustitución del árido natural.

1.5.3.3. Agua

El agua es uno de los componentes fundamentales en el proceso de la formación de morteros de cemento, ya que gracias a él se producen las reacciones químicas durante la hidratación del conglomerante dando rigidez y resistencia a la mezcla.

Acorde con la normativa vigente UNE EN 1008 2007 se pueden distinguir los siguientes tipos de agua: agua potable, de fuentes subterráneas, superficial natural, de mar o salobre, residual y recuperada: de la industria del hormigón o de otras industrias.

Pueden emplearse cualquier tipo de agua potable, ya que aun conteniendo un cierto grado de sales su proporción no resulta perjudicial para el mortero, mientras que las aguas de fuentes subterráneas, superficial natural, residual y recuperada han de ensayarse su conveniencia (UNE EN 1008 2007).

El agua no debe contener sustancias como cloruros, sulfatos, álcalis, etc. ni impurezas en una proporción tal que pudiese alterar las propiedades de los morteros.

En cuanto a la cantidad, debe ser la suficiente para hidratar todo el conglomerante, y para que se alcance una plasticidad acorde al uso al que se destine el mortero.

La temperatura del agua en el amasado con la arena y el conglomerante deberá estar entre 7° y 30°, ya que a temperaturas fuera de este intervalo puede alterar el tiempo de fraguado.

1.5.3.4. Aditivos y adiciones

Según las normas UNE-EN 934-1:2009 (AENOR,2009), UNE-EN 934-2:2010+A1:2012 (AENOR,2010) y UNE-EN 934-3:2010+A1:2012 (AENOR,2010) de “Aditivos para hormigones, morteros y pastas” los aditivos se pueden definir como productos que incorporados en el momento del amasado, en una cantidad inferior al 5% en masa, en relación al contenido de cemento, tienen la finalidad de modificar las propiedades de la mezcla en estado fresco o endurecido.

Con el uso de aditivos se pretende modificar alguna de las propiedades específica del hormigón, mortero o pasta, siendo ésta la conocida como *función principal*. Pero los aditivos pueden mejorar accesoriamente alguna o algunas propiedades independientemente de la función principal, estas se denominan *funciones secundarias*. En los aditivos multifuncionales la actividad principal será designada por el fabricante, y el resto de las funciones serán funciones secundarias.

Los aditivos de uso más generalizado según la ANFAH (Asociación Nacional de fabricantes de aditivos para el hormigón y cemento) son:

- Reductores de agua (fluidificantes): aquellos cuya función principal es la de disminuir el contenido de agua para una trabajabilidad dada, aumentar la trabajabilidad para un mismo contenido de agua sin producir segregación u obtener ambos efectos simultáneamente.
- Superfluidificantes (superplastificantes): definidos con los mismos efectos que los anteriores, pero capaces de conseguir reducciones superiores.
- Acelerantes de fraguado: cuya función principal es reducir o adelantar el tiempo de fraguado del cemento, que se encuentra en el hormigón, mortero o pasta.
- Retardadores de fraguado: aquellos que retrasan el tiempo de fraguado del cemento, que se encuentra en el hormigón, mortero o pasta.
- Aceleradores de endurecimiento: utilizados para aumentar o acelerar el desarrollo de las resistencias iniciales de los hormigones, morteros o pastas.
- Hidrófugos: cuya función principal es disminuir la capacidad de absorción capilar o la cantidad de agua que pasa a través de un hormigón, mortero o pasta, saturado y sometido a un gradiente hidráulico.
- Además de otros como: Incluidores de aire, generadores de gas, generadores de espuma, desaireantes o antiespumantes, generadores

de expansión, aditivos para bombeo, aditivos para hormigones y morteros proyectados, aditivos para inyecciones, colorantes, inhibidores de corrosión y modificadores de la reacción álcali-áridos.

Por otro lado, las adiciones más habituales son:

- Cenizas volantes: residuos sólidos que se recogen por captación mecánica o por precipitación electrostática de los polvos que acompañan a los gases de combustión de los quemadores de centrales termoeléctricas. La dosificación máxima que se admite es el 35% de peso del cemento.
- Humo de sílice: subproducto originado en la reducción de cuarzo de elevada pureza en hornos eléctricos con carbón. La dosificación máxima que se admite es el 10% de peso del cemento.

1.5.4. Propiedades de los morteros

Los morteros se pueden definir como compuestos homogéneos formados por la unión de un conglomerante, árido y agua, que se moldea en estado plástico y que una vez endurecido resulta apto y durable para su uso. Por tanto, existen en los morteros dos periodos físicos con características diferenciadas (aunque vinculadas): el estado fresco que permite su puesta en obra, y el estado endurecido en el que se fijarán sus prestaciones a lo largo de la vida útil.

1.5.4.1. *Propiedades del mortero fresco*

El estado fresco del mortero es la fase inmediatamente posterior a la mezcla homogénea de los componentes, que se caracteriza por presentar una consistencia que permite dar una forma adecuada al mortero. Aquí es cuando el mortero se encuentra completamente mezclado y listo para su utilización. En esta fase los componentes son susceptibles de tener movimientos independientes, lo que puede ocasionar la pérdida de homogeneidad de la mezcla al producirse ciertas agrupaciones de alguno de sus componentes (Junco Petrement, 2012).

Entre las propiedades en estado fresco de los morteros están: la consistencia (AENOR, UNE EN 1015-3:2000), el tiempo de trabajabilidad (AENOR, UNE EN-1015-9:2000), la retención de agua (AENOR, UNE EN 1347), la densidad aparente (AENOR, UNE EN 1015-6:1999) y el contenido de aire (AENOR, UNE EN 1015-7:1999).

La consistencia o trabajabilidad del mortero en estado fresco se considera la propiedad más importante en los morteros, ya que, para impedir la pérdida de homogeneidad en el interior de la mezcla, es necesario que la consistencia o la fuerza de atracción entre los distintos componentes, sea superior a las acciones externas que actúan sobre el mortero, incluida la fuerza de la gravedad.

La consistencia tiene mucha influencia sobre las otras propiedades del mortero. Se puede conseguir una correcta consistencia con una adecuada dosificación de la cantidad y el tamaño de los áridos, de la relación agua/cemento y con la utilización de aditivos. Esta consistencia del mortero tiene que permitir, en estado fresco, un moldeo adecuado facilitando la adaptación a la forma final e impidiendo la aparición de irregularidades en el conglomerado.

Una vez colocado el mortero debe conservar su forma antes del endurecimiento, para poder alcanzar las prestaciones de servicio.

1.5.4.2. *Propiedades del mortero endurecido*

El mortero endurecido es un conglomerado sólido de estructura porosa formado por una matriz cementicia que rodea y aglutina un árido.

El cemento que está constituido en su mayor parte por silicatos cálcicos se hidrata por la mezcla coloidal de la fase líquida y sólida, formando finalmente un gel que cristaliza.

Una vez que se ha fraguado y curado el mortero de cemento, su estructura se compone generalmente de áridos de diversos tamaños, rodeado de cristales de silicatos y aluminatos cálcicos, con espacios vacíos y pequeñas fisuras próximas a la superficie.

Sus propiedades fundamentales son, resistencia mecánica, dureza superficial, adherencia, densidad aparente, impermeabilidad, retracción, buen comportamiento frente a los agentes exteriores y durabilidad.

En su aplicación en obra el mortero endurecido debe actuar como un elemento resistente, compartiendo las solicitaciones del sistema constructivo del que forme parte. Estas tensiones mecánicas a las que está expuesto el mortero son en función de su ubicación en obra: compresión, cortante y flexión en morteros de juntas, flexión y tracción en morteros para revocos, etc. A estas solicitaciones propias de la función que desempeñan los morteros en obra, se añaden las que provienen de la propia deformación del soporte, que pueden llegar a provocar incluso su rotura (Junco Petrement, 2012).

La propiedad más importante en el estado endurecido de los morteros es la resistencia a compresión, por lo que las normas UNE-EN 998-1 (AENOR, UNE-EN 998-1:2010) y 998-2 (AENOR, UNE-EN 998-2:2012) exigen unas resistencias mínimas a compresión para todo tipo de morteros de albañilería, y clasifica estos morteros en función de unas resistencias a compresión tipificadas.

El ensayo de la resistencia a compresión y a flexión del mortero de cemento viene especificado en la norma UNE-EN 1015-11:2000 (AENOR, UNE EN1015-11:2000), lo que dependerá principalmente de su estructura y de la capacidad resistente del cemento fraguado.

Cuando los morteros sean utilizados para construcciones sometidas a requisitos estructurales, las resistencias mecánicas serán las exigidas en el CTE Documento Básico SE-F Fábrica (DB SE-F).

La adherencia del mortero al soporte, regulada por la norma UNE-EN 1015-2 (AENOR, 2015), se puede considerar como mecánica, y no depende solo de las características mecánicas del mortero sino también de la estructura física del soporte, ya que tiene que soportar las tensiones normales y tangenciales en la interfase mortero- soporte. Pero muchos otros factores pueden afectar a la adherencia como pueden ser el método de aplicación, la humedad, la temperatura, las condiciones de curado, etc.

La densidad aparente depende fundamentalmente de la proporción y densidad de sus componentes y de la porosidad total. Resulta determinante en la contribución del mortero a las cargas permanentes que tiene que soportar la estructura, y se determina siguiendo el procedimiento que marca la norma UNE-EN 1015-10:2000 (AENOR, 2000).

La absorción de agua por capilaridad de los morteros depende de la red porosa del mortero, es decir, de su configuración estructural. Resulta una propiedad fundamental para los morteros expuestos al agua de lluvia y a los usados en arranque de cimentaciones. Puede mejorarse esta propiedad mediante el uso de aditivos plastificantes o hidrofugantes que reducen la cantidad de agua necesaria para la mezcla. Para la realización del ensayo de absorción de agua por capilaridad la normativa de referencia es la UNE-EN 1015-18:2003 (AENOR, 2003).

La retracción del mortero se debe a la pérdida de volumen que se produce durante el fraguado y el principio de endurecimiento del mortero. La consecuencia de la retracción puede ser la aparición de fisuras en la superficie del mortero que hagan disminuir la durabilidad del mismo.

Para analizar el comportamiento al fuego de un mortero se puede hacer mediante dos parámetros: su reacción y su resistencia. Los productos y elementos constructivos vienen clasificados en el RD 312/2005 (España, 2005) en función de su reacción ante el fuego en A1, A2, B, C, D, E y F. La propia norma UNE-EN 998-1, confirma esa clasificación siempre que no contengan una fracción superior al 1% en masa o volumen de materiales orgánicos que pasarían a considerarse A1. La clase de reacción al fuego “A1 y A1FL” significa que el mortero de cemento no contribuye al fuego, al no producir llama sostenida y no producir humos ni gases, tanto colocado en paredes como en suelo.

La resistencia al fuego es un concepto aplicable solamente a unidades de obra, pero el mortero de cemento empleado como parte de un elemento constructivo puede contribuir a la mejora de la resistencia al fuego del mismo, si mantiene durante un tiempo su integridad y aislamiento térmico.

Se puede afirmar que la resistencia al fuego de los morteros es muy buena, puesto que sus propiedades de resistencias mecánicas alcanzan los mayores valores de la escala.

La necesidad de construir edificios energeticamente eficientes, hace que propiedades como el comportamiento térmico y acústico de los morteros resulten fundamentales en la actualidad.

Las exigencias de conductividad térmica para los morteros para albañilería de la normativa vigente son solamente aplicables a los morteros destinados a construcciones sujetas a requisitos térmicos.

La durabilidad de un mortero es el tiempo durante el cual mantiene las prestaciones que le hacen apto para la función que cumple en la obra. Este concepto se mide en unidades de tiempo y depende de muy diversos factores, como pueden ser la calidad del mortero, la puesta en obra, el uso del mortero y su mantenimiento. Sin embargo, la norma UNE-EN 998-2 (AENOR, 2012) unicamente contempla el ensayo a los ciclos de hielo-deshielo.

1.5.5. Morteros con fibras

El refuerzo de morteros con fibras se basa en incorporar a la masa fibras que se dispersen con una distribución homogénea, para otorgar al material mejores prestaciones, que darán como resultado el crecimiento en su uso y mayores oportunidades de diseño y ejecución (Naranjo Paredes, 2016).

Los morteros reforzados con fibras no son algo novedoso, sino que ya desde la antigüedad tenemos ejemplos de esta idea, por ejemplo, cuando se empleaban fibras naturales en determinados morteros. La utilización de estas fibras, en general de origen vegetal, ha sido una práctica tradicional constructiva que se ha conservado a lo largo de la historia, en la mayoría de los casos sin haber tenido una argumentación técnica que lo avalase.

Posteriormente, la adición de fibras de refuerzo ha sido una práctica muy extendida para mejorar la resistencia a tracción de los cementos y morteros. Esto dio origen a los llamados fibrocementos, en los que se utilizó al principio únicamente la fibra de asbesto o amianto, la cual fue prohibida en muchos

países por razones de salud. Por ello se investigaron nuevas fibras para el refuerzo de los morteros, tales como las de acero, vidrio, nylon, polipropileno, sisal, carbono, aramida, etc., pero que, por motivos fundamentalmente económicos, no han llegado a industrializarse y emplearse extensamente en el campo de la construcción (Sánchez Paradela & Sánchez Gálvez, 1991).

En la actualidad se emplean fibras minerales, orgánicas y metálicas. Las fibras más utilizadas son las de acero para morteros y hormigones, las de vidrio para morteros, y también se utilizan las fibras plásticas como las de polipropileno para hormigones y morteros.

La elección de las fibras dependerá tanto del componente que actúe como matriz del compuesto, como del tipo de aplicación y de las propiedades que se quiera otorgar al producto final (Tabla 10).

MATRIZ: Hormigón o mortero	<ul style="list-style-type: none"> - Mantiene el material unido. - Da resistencia a compresión y rigidez. - Distribuye los esfuerzos. - Protege la fibra.
REFUERZO: Fibras	<ul style="list-style-type: none"> - Soportan esfuerzos a tracción. - Controlan la fisuración y reducen su intensidad. - Mejoran la tenacidad.

Tabla 10. Componentes y características. Fuente: Antonio Miravete, “Los nuevos materiales en la Construcción” (2002).

Por ejemplo la fibra de vidrio constituyen el refuerzo mas utilizado en la realización de los materiales compuestos (Rio Merino, 2000), siendo sus principales ventajas: la buena adherencia fibra-matriz, la alta resistencia a tracción, un aceptable módulo de elasticidad y buenas propiedades dieléctricas. En cambio la fibra de vidrio en su incorporación a los morteros presenta el inconveniente de que las fibras son atacadas con los álcalis del cemento. Para evitar este inconveniente se creó el vidrio tipo E o AR la opción de revestir las fibras con un material epoxídrico (Bustillo Revuelta, 2008), resultando soluciones de mayor coste.

Como ya se ha visto en el apartado 1.5.4.2., algunas de las de las propiedades fundamentales de los morteros son la resistencia mecánica y la durabilidad, pero debido al aumento actual de los requerimientos térmicos y acústicos en

las edificaciones, también resulta indispensable la búsqueda de la mejora de las propiedades aislantes.

La capacidad aislante de los materiales aumenta cuándo aumenta su porosidad, es decir aumenta proporcionalmente a la disminución de su peso por unidad de volumen, por ello los morteros comunes cuyas características principales están basadas en la compacidad no resultan, en general, buenos aislantes térmicos.

En el presente trabajo se estudian las mejoras que presenta el mortero al ser reforzado con residuos de fibra de vidrio y lana de roca, procedentes de residuos de construcción y demolición. Se analizarán las características físicas, químicas, mecánicas y térmicas del material, con el fin de determinar la viabilidad del compuesto.

1.6. CONSIDERACIONES PARCIALES

Desde la era de la Revolución Industrial se viene aplicando un modelo económico de consumo lineal, consistente en tomar, fabricar, consumir y eliminar. Este modelo ya no resulta sostenible debido a las problemáticas ambientales de limitación de recursos naturales y de aumento en la generación de residuos.

En este sentido la Unión Europea ha adoptado la eficiencia de los recursos como un pilar fundamental de su estrategia económica circular Europa 2020.

La edificación es una de las mayores causas de contaminación en Europa, y además una de las mayores fuentes de producción de residuos (32,6% del total según la Oficina Europea de Estadística). Por ello es necesario buscar alternativas para reducir la generación de residuos de construcción y demolición, procurando su reciclaje, reutilización o valorización.

No solamente el proceso constructivo genera contaminación, sino que los edificios ya construidos son la primera actividad en consumo de energía en Europa (40% de la energía final de la UE). Para reducir este consumo de

energía es necesario buscar nuevas soluciones que mejoren el aislamiento térmico en la envolvente de las edificaciones.

Por ese motivo ha crecido la importancia del aislamiento en las construcciones, lo que conlleva un gran aumento en la utilización de materiales aislantes. El material aislante más empleado en la Unión Europea son las lanas minerales, por lo que se ha incrementado la generación de residuos de estos materiales, que además se caracterizan por su baja tasa de reutilización o reciclado, y por su elevado coste energético de producción.

Estudios de Väntsi & Kärki (2014) indican que las propiedades de los desechos de lana mineral, como el aislamiento térmico o la resistencia al fuego, podrían proporcionar propiedades mejoradas en los productos que utilizan residuos de lana mineral como materia prima.

En la actualidad, el mortero de cemento es el tipo de mortero de uso más extendido, debido a su rapidez de endurecimiento y a sus prestaciones mecánicas, por lo que se emplea en multitud de aplicaciones constructivas en edificación. En todo caso a estas buenas propiedades del mortero de cemento se pueden le pueden implementar otras como la mejora de la tenacidad o del aislamiento térmico.

TRABAJOS CITADOS

- AENOR, A. E. (1999). UNE EN 1015-6:1999. Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 6: Determinación de la densidad aparente del mortero fresco. España.
- AENOR, A. E. (1999). UNE EN 1015-7:1999. Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 7: Determinación del contenido en aire en el mortero fresco. España.
- AENOR, A. E. (2000). UNE EN 1015-3:2000. Métodos de ensayo para morteros de albañilería. Parte 3: Determinación de la consistencia del mortero freco (por la mesa de sacudidas). España.
- AENOR, A. E. (2000). UNE EN1015-11:2000. Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 11: Determinación de la resistencia a flexión y a compresión del mortero endurecido. España.
- AENOR, A. E. (2000). UNE EN-1015-9:2000. Métodos de ensayo de los morteros para albañilería: Parte 9: Determinación del periodo de trabajabilidad y del tiempo abierto del mortero fresco. España.
- AENOR, A. E. (2000). UNE EN 1015-10:2000. Métodos de ensayo de los

- morteros para albañilería. Parte 10: Determinación de la densidad aparente en seco del mortero endurecido. España.
- AENOR, A. E. (2003). UNE EN 1015-18:2003 . Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 18: Determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad del mortero endurecido. España.
- AENOR, A. E. (2004). UNE EN 13139/AC:2004. Áridos para morteros. España.
- AENOR, A. E. (2008). UNE EN 1347. Adhesivos para baldosas cerámicas. Determinación de la capacidad humectante. España.
- AENOR, A. E. (2009). UNE EN 934-1:2009. Aditivos para hormigones, morteros y pastas. Parte 1: Requisitos comunes. España.
- AENOR, A. E. (2010). Especificaciones de los morteros para albañilería. Parte 1: Morteros para revoco y enlucido. España.
- AENOR, A. E. (2010). UNE EN 934-2:2010+A1:2012 . Aditivos para hormigones, morteros y pastas. Parte 2: Aditivos para hormigones. Definiciones, requisitos, conformidad, marcado y etiquetado. España.
- AENOR, A. E. (2010). UNE EN 934-3:2010+A1:2012. Aditivos para hormigones, morteros y pastas. Parte 3: Aditivos para morteros para albañilería. Definiciones, requisitos, conformidad, marcado y etiquetado. España.
- AENOR, A. E. (2010). UNE EN 998-1:2010 . Especificaciones de los morteros para albañilería. Parte 1: Morteros para revoco y enlucido. España.
- AENOR, A. E. (2011). UNE EN 197-1:2011. Cemento. Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes. España.
- AENOR, A. E. (2012). UNE EN 998-2:2012. Especificaciones de los morteros para albañilería. Parte 2: Morteros para albañilería. España.
- Afelma. (2016). Asociación de Fabricantes Españoles de Lanasy Minerales Aislantes
- Alavedra, P. (1997). La construcción sostenible. El estado de la cuestión. Informes de la construcción.
- Albert Cuchí, Peter Sweatman. (2014). Informe GTR 2014. Claves para transformar el sector de la edificación en España.
- Álvarez, J.I.; Martín, A; García Casado, P.J. (1995). Historia de los morteros. Universidad de Navarra.
- Asensio, E, M. F. (2016). Evaluación de la gestión de los residuos de construcción y demolición en España en el ámbito de una economía circular. Cemento Hormigón, 52-53.
- Ben Yair, M; Slatkine, A; Ben Yair, M;. (1961). Durability of Roman mortars and concretes for hydraulic structures at Caesarea and Tiberias.
- Bustillo Revuelta, M. (2008). Hormigones y morteros. Madrid: Fuego editores.
- C.Alonso, A. Hidalgo López &. (2005). Evaluación del impacto medioambiental debido a la lixiviación de productos base cemento. Instituto Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja.
- Calvo. (2014). A Dynamic Model for Construction and Demolition Waste Management in Spain: Driving Policies Based on Economic Incentives and Tax Penalties. Sustainability.
- CEN. (1 de Febrero de 2017). Comité Europeo de Normalización. Obtenido de www.cen.eu: <http://www.cen.eu/>
- Comunidad Valenciana, (2008). Revisión del Plan Integral de Residuos.
- Corning, O. (31 de Enero de 2017). www.owenscorning.com. Obtenido de

- <https://www.owenscorning.com/>
- Coronado, E. Dosal, A. Coz, J.R. Viguri, A. Andrés. (2011). Estimation of Construction and Demolition Waste Generation and Multicriteria Analysis of C&DW Management Alternatives: A Case Study in Spain. *Waste and Biomass Valorization*, 209-255.
- Crespo, D. C. (2016). La economía circular, la clave del crecimiento sostenible. *Cemento Hormigón*, 2-3.
- España, G. d. (2005). Real Decreto 312/2005. Real Decreto 312/2005, de 18 de marzo, por el que se aprueba la clasificación de los productos de construcción y de los elementos constructivos en función de sus propiedades de reacción y de resistencia frente al fuego. España.
- España, G. d. (2008). RC-08. Instrucción para la recepción de cementos. España.
- España, G. d. (2008). Real Decreto 105/2008, de 1 de febrero, por el que se regula la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición. s.l.:s.n.
- Europea, C. (2010). Comunicado de la Comisión. Europa 2020. Una estrategia para un crecimiento inteligente, sostenible e integrador. Bruselas.
- Europea, C. (2015). Propuesta de Directiva del parlamento Europeo y del Consejo por la que se modifica la Directiva 2008/98/CE, sobre los residuos. Bruselas.
- Europea, U. (2008). Directiva 2008/98/CE. Boletín oficial de la Union Europea.
- Europea., C. (2015). Cerrar el círculo: un plan de acción de la Comisión al Parlamento Europeo, al Consejo, al Comité Económico y Social Europeo y al Comité de las Regiones. Bruselas.
- Fomento, M. d. (2006). CTE. Código Técnico de la Edificación de España. España.
- Fomento, M. d. (2014). Estrategia a largo plazo para la rehabilitación energética en el sector de la edificación en España en desarrollo del artículo 4 de la Directiva 2012/27/UE.
- Furlan, F., & Alou, V. (1989). *Materiaux de Construction. Chapitre II: Liants Mineraux*. Lausanne: Ecole Polytechnique Federale de Lausanne.
- Furlan, V. (1990). Causes, mechanisms and measurement of damage in cultural heritage materials. The state of the art-Mortars, bricks and renderings. Advanced workshop "Analytical Methodologies for the Investigation of Damaged Stones".
- Galán Gutierrez, L., & Amador Blanco, J. (1994). *Hormigón*. Madrid.
- Galindo, J. I. Á., Pérez, A. M., & Casado, P. J. G. (1995). 52. Historia de los morteros. *revista PH*, (13).
- Hincapié, A., & Aguja, E. (2003). Agregado reciclado para morteros. *Revista Universidad EAFIT*, 39(132), 76-89.
- IDAE. (2011). Análisis del consumo energético del sector residencial en España. Informe final. Proyecto SECH-SPAHOUSEC.
- IECA. (3 de Febrero de 2017). Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones. Obtenido de www.ieca.es: https://www.ieca.es/gloCementos.asp?id_rep=179
- Jefatura del Estado. (2011). Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados. *BOE* p.56.
- Junco Petrement, C. (2012). *Morteros aligerados con residuos*. Burgos: Tesis doctoral.

- Laffarga Osteret, J., & Olivares Santiago, M. (1995). Materiales de construcción. Sevilla: Editan, S.A.
- López-Moreno, H. (2015). Thermal Behavior of a Ventilated Façade Using Perforated Ceramic Bricks. *International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering*, 875-880.
- Ministerio de Agricultura, A. y. (2015). Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos (PEMAR) 2016-2022. BOE nº 297 (12/12/2015).
- Ministerio de Fomento. (2008). EHE-08. Instrucción de Hormigón Estructural. España.
- Ministerio de Industria, E. y. (s.f.). www.idae.es.
- Montenegro, M. C. (2016). Viabilidad de aplicación de materiales reciclados y cenizas de biomasa en la fabricación de materiales. Tesis doctoral. Córdoba.
- Muller, A; Leydolph, B; Stanelle, K;. (2009). Recycling mineral wood waste- Technologies for the conversion of the fiber structure, Part 1. *Interceram*, Volumen 58, 378-381.
- Naranjo Paredes, A. (2016). Estudio de la aplicabilidad de materiales compuestos en la edificación. Hormigón reforzado con fibra de vidrio. Barcelona.
- Panel, U. N. (2016). *Global Material Flows and Resource Productivity*. Paris.
- Presidencia, M. d. (2008). Real Decreto 105/2008, de 1 de febrero, por el que se regula la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición. BOE nº38,13/02/2008, Boletín Oficial del Estado, España, p.7.
- Ragai, J; Ghorab, H.Y.; Antar, A;. (1987). Surface and bulk properties of ancient egyptian mortars. Part II: adsorption and infrared studies. *Cement and Concrete Research*, 17: 12-21.
- Río Merino, M. (1999). Elaboración y aplicaciones constructivas de paneles prefabricados de escayola aligerada y reforzada con fibra de vidrio E y otros aditivos. Madrid.
- Río Merino, M. (2010). La regulación jurídica de los residuos de construcción demolición (RCD) en España. El caso de la Comunidad de Madrid. *Informes de la Construcción*, 81-86.
- Río Merino, M; Izquierdo Gracia, P; Acebedo;. (2010). Sustainable construction: construction and demolition waste reconsidered". *Waste Management & Research*, 118-129.
- ROCKWOOL. (31 de Enero de 2017). www.rockwool.es. Obtenido de <http://www.rockwool.es/por+que+rockwool/lana+de+roca?>
- Romaniega Piñeiro, S. (2006). Refuerzo de la escayola mediante fibras de lana mineral procedentes de reciclaje de RCD.
- Rougeron, C. (1977). Aislamiento acústico y térmico en la construcción. Reverte.
- Saint-Gobain, I. (s.f.).
- Sal'nikov, V. (2003). Properties of mineral wool after long operation in walls of buildings in Middle Ural region. *Build Mater (Stroitel'nye Materialy)*, 42-43.
- Sánchez Paradela, M., & Sánchez Gálvez, V. (1991). Comportamiento a tracción de cementos. *Informes de la Construcción*, 77-89.
- Tam, V. W. (2009). Physio-chemical reactions in recycle aggregate concrete 163(2). *Journal of Hazardous*, 823-828.
- Team, B. (2012). What Makes a Product Green? *Enviromental Building News*. The leading Newsletter on Environmentally Responsible Desing &

Construction.21.

- Tejedor, S. P. (2013). Solución para hoja exterior de fachada pacotherm v e-grc. II Jornada sobre innovación en el sector del yeso.
- Terrados, F., & Moreno, D. (2014). "Patio" and "Botijo": Energetic strategies' architectural integration in "Patio 2.12" prototype. *Energy and Buildings*, 70-88.
- Väntsi, O., & Kärki, T. (2014). Mineral wool waste in Europe: a review of mineral wool waste quantity, quality, and current recycling methods. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 62-72.
- Väntsi, O., & Kärki, T. (2014). Utilization of recycled mineral wool as filler in wood-polypropylene composites. *Construction and Building Materials*, 193(3), 448-461.
- Villoria Sáez, P. (2014). Sistema de gestión de residuos de construcción y demolición en obras de edificación residencial. Buenas prácticas en la ejecución de obra.
- Villoria Sáez, P; del Río Merino, M; Porras Amores, C;. (2012). Estimation of construction and demolition waste volume generation in new residential buildings in Spain. *Waste Management & Research*.
- Wei-Ting Lin, An Cheng, Ran Huang, Yuan-Chieh Wu, & Ta-Yuan Han. (2012). Rock wool wastes as a supplementary cementitious material replacement in cement-based composites. *Computers and Concrete*, Vol10,nº4, 401-411.
- Yáñez, G. (2008). *Arquitectura solar e Iluminación natural. Conceptos, Métodos y Ejemplos*. Madrid, España: Munilla Lería.
- Yeheyis, M. (2013). An overview os consruction and demolition waste management in Canadá: a lifecycle analysis approach to sustainability. *Clean Technologies and Enviromental Policy*,15, 81-91.

CAPÍTULO 2. ESTADO DE LA CUESTIÓN

En este apartado se analizan los estudios encontrados en la búsqueda bibliográfica realizada, sobre materiales compuestos con base de cemento y adiciones de fibras desarrollados hasta la actualidad, incluyendo los avances en el uso de residuos de construcción y demolición como adiciones en estos materiales compuestos, así como los productos comerciales ya desarrollados de cementos con adiciones de fibras. Además, se ha prestado especial atención a aquellos compuestos producen una mejora de las prestaciones térmicas del material para su uso en edificación.

Para un mejor análisis del resultado de la búsqueda se ha agrupado la búsqueda en:

- 2.1.- Estudios sobre compuestos de cemento con refuerzos de fibras.
- 2.2.- Estudios sobre compuestos de cemento con cargas de residuos.
- 2.3.- Estudios de compuestos de cemento con adiciones que mejoran el comportamiento térmico.

2.1. ESTUDIOS SOBRE COMPUESTOS DE CEMENTO CON REFUERZOS DE FIBRAS

La inclusión de fibras en los morteros es una técnica que viene empleándose desde la antigüedad. El primer uso que se atestigua fue durante el Neolítico en Mesopotamia, paralelamente al primer uso del mortero como ligante entre distintos materiales (Galindo et al., 1995).

Desde este momento la evolución de la inclusión de fibras en los morteros ha ido avanzando junto con la evolución del conocimiento y la técnica de los morteros, como así lo atestigua Vitruvio (Vitrubio Polión, 2001) indicando la dependencia o relación de la presencia de fibras y el tipo de mortero adicionado, y conforme a su función y finalidad en la construcción.

En la década de los años 70 la tecnología del hormigón a nivel mundial avanzó mediante importantes estudios sobre ello y en la década siguiente estos estudios los desarrollaron los laboratorios de grandes empresas con algunas universidades. Todo esto dio como resultado importantes trabajos publicados, algunos de los cuales siguen en desarrollo.

En la actualidad los hormigones y morteros reforzados con fibras despiertan un interés creciente y su uso en el sector de la construcción está cada vez más extendido.

Es sabido que los materiales a base de cemento, se caracterizan por una debilidad, ocasionada por su rigidez, al ser sometidos a esfuerzos de tracción o flexión problemática a la que con la adición de fibras se ha pretendido dar solución (Mana Halvaei & Masoud Jamshidi, 2014).

Como contrapartida, a día de hoy, los morteros reforzados con fibras presentan la dificultad de carecer de normativa específica, por lo que se trata de asimilar a la normativa de morteros sin reforzar, presentando el inconveniente de que el comportamiento mecánico de los mismos es marcadamente no lineal ya que las fibras comienzan a trabajar después del agrietamiento de la matriz de los morteros de cemento y por tanto muy diferente del comportamiento de los morteros no reforzados (Kosior-kazberuk & Krassowska, 2015).

En base a estos antecedentes, se ha realizado una búsqueda bibliográfica en la que se han encontrado numerosos estudios sobre el refuerzo de morteros de cemento con fibras minerales como la lana de roca (Lin et al., 2013), aunque la mayoría son reforzados con fibra de vidrio y en estos últimos hay estudios que comprueban la influencia de las fibras sobre las propiedades mecánicas y la tenacidad de estos materiales compuestos (Mobasher & Shah, 1989).

Es de destacar que en la edad moderna tuvieron gran importancia las **fibras de amianto**, Hatschek inventó una tecnología para la producción de placas para techos, tuberías, etc. con este tipo de material (Brandt, 2008). A día de hoy es conocido el efecto perjudicial de estas fibras para la salud humana y por ello han sido prohibidas. Posteriormente las fibras de vidrio empezaron a usarse para el refuerzo de pasta de cemento y mortero por Biryukovichs. Como las fibras de vidrio E normales no son resistentes en las mezclas de cemento

Portland inventaron para este propósito las fibras de vidrio resistentes a los álcalis del cemento (AR) (Majumdar & Ryder, 1968) con adición de óxido de zirconio.

En la actualidad las fibras más utilizadas en morteros de cemento son las fibras poliméricas, las fibras metálicas y las fibras de vidrio AR, resultando una opción poco sostenible ya que estas fibras necesitan una gran cantidad de energía para su fabricación.

Con respecto a los estudios sobre morteros de cemento reforzados con **fibra de vidrio**, merecen destacarse los análisis de Ali y Grimer (1969), que ensayaron las propiedades mecánicas de los cementos con adición de fibras de 50 mm de longitud en una cantidad del 6-12%, comprobando que mejoraban tanto la resistencia al impacto, la resistencia a flexión y el agrietamiento de los compuestos.

En el trabajo de Sánchez Paradela y Sánchez Gálvez (1991) se analizó por primera en España ensayos de tracción directa sobre placas de cemento reforzadas con fibra de vidrio (GRC) de 10mm de espesor, incorporadas en una cantidad del 5%. Sánchez Paradela y del Águila (1992) constataron la importancia de la longitud de las fibras para la obtención de mayores resistencias, siendo ineficaces las inferiores a 25 mm Así mismo comprobó que estos compuestos sufrieron un proceso de fragilización con la edad, y que la adición de arena (eficaz como medio de reducir la retracción del GRC) produce una reducción de resistencia del GRC de un 20% para la relación 1:1 utilizada.

La investigación de Del Río Merino et al. (2005), también que la influencia de la adición de fibra de vidrio (1-1,5%) en morteros de cemento aligerados con arcilla expandida, obteniendo morteros con menores densidades (entre 0,5 y 0,6 g/cm³) que, en general, mejoran las resistencias mecánicas frente a los morteros sin reforzar (del Río Merino et al., 2005).

Más actuales son los estudios de Paredes (2016) sobre la adición de fibras de vidrio como refuerzo para hormigones elaborando paneles de GRC, demostrando que la fibra de vidrio (3-5% adición) trabaja de manera similar a la armadura de un prefabricado de hormigón, pero al ser su peso mucho menor resulta un material de altas prestaciones.

Y la investigación de Xiaochun et al. (2017) que llevó a cabo experimentos acelerados de corrosión para descubrir el mecanismo de corrosión y las propiedades de la fibra de vidrio resistente a los álcalis en el mortero de cemento, demostrado que una adición del 30% de ceniza volante o un 10% de adición de humo de sílice a la matriz de cemento podría mejorar de manera efectiva la resistencia a la corrosión de la fibra de vidrio resistente a los álcalis y que la cantidad óptima de mezcla de fibra de vidrio AR debería ser de aproximadamente $1.0 \text{ kg} / \text{m}^3$, además se comprueba que el comportamiento mecánico a flexión es mejorado.

En cuanto a las **fibras metálicas** como refuerzo para morteros y hormigones los estudios más importantes se desarrollaron en la década de los 60 por Romualdi y su equipo de investigación (Romualdi & Batson, 1963), y actualmente existen numerosos estudios sobre el uso de estas fibras, como los de Barnett que demostraron que el uso de una técnica de resistividad eléctrica no destructiva para evaluar cualitativamente la orientación de las fibras en paneles de hormigón reforzado con fibra de ultra alto rendimiento y demostrando la importancia de la orientación de las fibras en el hormigón para sus resistencia (Lataste et al., 2010).

Así mismo, hay estudios sobre la influencia de la forma de las fibras metálicas empleadas que confirman que la fibra metálica amorfa podría ser utilizada en materiales y estructuras compuestas de cemento reforzado, para materiales estructurales y paneles de protección con forma de placas delgadas (Kim et al., 2015).

En cuanto a las **fibras poliméricas** existen estudios (Pakravan et al., 2012) que evalúan el efecto de algunas fibras poliméricas sintéticas sobre el comportamiento de flexión de la matriz de base cemento, analizando las fibras de polipropileno (PP), nylon 6,6 (N66) y poliacrilonitrilo (PAN).

Por otra parte, Muñoz Cebrián (2011) estudió la influencia de la incorporación de fibra de **polipropileno multifilamento** en hormigones de altas prestaciones, en concreto en las propiedades mecánicas del hormigón endurecido. La fibra adicionada osciló entre el 5% y el 20% en peso del cemento, y determinó que la adición de fibras de polipropileno no tiene mayor influencia en el aumento de

la resistencia a la compresión del hormigón, sino que por el contrario la disminuye.

Así mismo, Puertas et al. (2000) analizó el comportamiento de morteros de cementos alcalinos reforzados con ***fibras acrílicas y de polipropileno***. El contenido de fibra añadido fue del 0,2 y 1% en volumen de mortero, comprobando en el estudio microestructural realizado sobre estos morteros que las fibras acrílicas presentan signos de alteración y gran cantidad de depósitos en su superficie, mientras que las de polipropileno se encontraron en mejor estado.

También se ha estudiado la adición de ***fibras de polipropileno*** en hormigones autocompactables (Melián & Barluenga, 2010), demostrando que mediante la adición de pequeñas de fibras de polipropileno de 12, 19 y 40mm, se consiguen incrementos importantes de tenacidad en su comportamiento mecánico a flexión.

Por otra parte, en los últimos años también se ha incrementado el interés por el uso de ***fibras vegetales***, como las de celulosa empleadas refuerzo en materiales compuestos de base cemento (Claramunt et al., 2015), ya que se ha demostrado que presentan buenas propiedades mecánicas, concluyendo que al aumentar el contenido de fibra en la matriz de cemento se incrementa el refuerzo posterior a la rotura (Claramunt Blanes, 2013), aunque como inconveniente los autores proponen buscar técnicas para mejorar la durabilidad de estos nuevos materiales.

Existen otros estudios de menor éxito con fibras vegetales de lino y de lechuguilla que añadidas en bajos porcentajes (0%, 0,4%, 0,7%, 1%) hacen disminuir altamente la trabajabilidad de las muestras (Cervantes, 2014). También se han realizado con fibras de pambil para refuerzos de hormigones comprobándose que éstas disminuyen en gran medida la resistencia de los compuestos incorporando cantidades de 0,5%, 1,5%, 2,5%, no resultando una alternativa interesante a día de hoy (Fabricio, 2014).

Como resumen, los resultados de los estudios realizados sobre morteros de cemento reforzados con fibras indican que en la mayoría de los casos los morteros resultantes obtienen una disminución en la resistencia a compresión

en torno a un 14% para las fibras poliméricas, un 3 % para las fibras metálicas y un 20 % para las fibras de vidrio. En cuanto a la resistencia a flexión esta aumenta alrededor de un 25 % para las fibras poliméricas, un 12 % para las fibras metálicas y un 15 % para las fibras de vidrio.

2.2. ESTUDIOS SOBRE COMPUESTOS DE CEMENTO CON CARGAS DE RESIDUOS

Con el fin de mejorar diferentes propiedades de los morteros se han encontrado investigaciones que incorporan los siguientes residuos:

2.1.1. Residuos de vidrio celular, éteres de celulosa y corcho natural

- Residuos de **vidrio celular** (Torres Carrasco, 2015) demostrándose que éste proporciona a los morteros mejores propiedades mecánicas (Khmiri, et al., 2013; Ling & Poon, 2011), y también alto grado de aislamiento a la radiación y apantallamiento de los rayos X (Hui & Sun, 2011; Matos & Sousa-Coutinho, 2012).
- Éteres de **celulosa de papel reciclado**, de cara a intentar mejorar las propiedades de los morteros en estado fresco se ha estudiado la incorporación de estos residuos consiguiéndose morteros y hormigones más impermeables (Pourchez, Ruot, Debayle, Pourchez, & Grosseau, 2010) y trabajables (Patural et al., 2011).
- El **corcho natural** añadido a los compuestos de cemento también ha sido estudiado en la actualidad (Nóvoa et al., 2004), y debido a su baja densidad y su estructura celular da como resultado materiales más impermeables y mejores aislantes acústica y térmicamente.

2.1.2. Residuos de fibras vegetales

Así mismo las fibras vegetales de **residuos agroindustriales**, como el bambú y el cáñamo (Fantilli, Sicardi, & Dotti, 2017) o la paja de arroz (Roselló et al., 2017), se han utilizado en las últimas décadas para reforzar los morteros consiguiendo mejoras en la resistencia a flexión y la ductilidad. En cambio, otras como las fibras de pambil (Fabricio, 2014) se han incorporado a los morteros sin éxito.

2.1.3. Residuos de fibras textiles

En cuanto a otros tipos de residuos como los **residuos textiles** también han sido incorporados a los morteros, Barbero- Barrera (Barbero-Barrera et al., 2016) demostró que se obtiene una disminución de la densidad, de la resistencia a la flexión y la conductividad térmica, y un aumento del coeficiente de absorción acústica.

2.1.4. Residuos de fibras animales

Las **fibras animales** son de uso menos común como adición para morteros, aun así, existen estudios recientes como el de Araya-Letelier (Araya-Letelier et al., 2017) que analiza la viabilidad de la incorporación de los pelos de cerdo como refuerzo demostrando que los morteros mejoran significativamente la resistencia al impacto, la resistencia a la abrasión, el agrietamiento por contracción plástica, la edad al agrietamiento y el ancho de las grietas a medida que aumenta el volumen de fibra.

2.1.5. Residuos industriales

Desde hace años se investiga también a cerca de la sustitución de los áridos naturales de los morteros por agregados de **polímeros ligeros** procedentes de residuos industriales, de cara a proporcionar a los morteros mayor flexibilidad.

Por ejemplo, se han encontrado investigaciones donde se utilizan residuos de **politereftalato de etilo** (PET) en ratios de relación de arena 2:1, 3:1 y 4:1 , consiguiendo morteros menos densos y con menores resistencias a flexión, pero con mejores propiedades térmicas (Mahdi, et al., 2010; Pereira De Oliveira & Castro-Gomes, 2011).

En los estudios encontrados sobre **poliestireno expandido** (EPS) en morteros se demuestra así mismo que esta adición proporciona una merma en la resistencia mecánica a flexión del material, pero que al disminuir su densidad mejora su aislamiento térmico (Babu & Babu, 2003).

Con el fin de mejorar las propiedades de impacto al ruido y fisuración por retracción de los morteros, existen estudios que incorporan deshechos de **polietilvinilacetato de etilo** (copolímero EVA) (Tutikian et al., 2013).

También se ha estudiado la viabilidad del uso del **polvo de poliamida** en los morteros a través de sus propiedades reológicas (Salas et al., 2016).

Se han encontrado numerosos estudios que analizan la incorporación en morteros de residuos procedentes de la industria del automóvil, como **espumas rígidas de poliuretano** (Junco et al., 2012) y residuos **neumáticos y de caucho** (Turatsinze et al., 2005).

También existen investigaciones que estudian cómo afecta a las propiedades de los morteros la adición de áridos de **residuos siderúrgicos**, escorias blancas y negras, en sustituciones total o parcial de los áridos de los morteros (Prieto et al., 2014), comprobándose su viabilidad (Santamaría-Vicario et al., 2017).

2.1.6. Residuos de construcción y demolición.

Desde mediados del siglo XX se investiga sobre la incorporación de residuos de edificaciones en los morteros y hormigones (Ploger, 1947); (Nixon, 1976).

Pero no es hasta hace unos años cuándo la investigación en esta línea se han incrementado y son numerosos los estudios sobre los residuos de construcción y demolición como los Del Río et al. (2012) y Villoria et al. (2012).

Se han encontrado multitud de estudios en los que se emplean **árido reciclado** sustituyendo la fracción fina en morteros y hormigones consiguiendo que éstos sean más ligeros (Muñoz-Ruiperez et al., 2016). O los estudios de Jiménez et al. (2013) donde se evalúa el rendimiento del mortero de albañilería en estado fresco y en estado endurecido fabricado con áridos reciclados finos de los **escombros cerámicos**. Jiménez analizó reemplazar el 0%, 5%, 10%, 20% y 40% de la arena natural por agregado fino reciclado, y los resultados mostraron que las relaciones de reemplazo de hasta 40% en volumen no afectaron significativamente las propiedades del mortero fresco y endurecido, con la excepción de la densidad y la trabajabilidad del mismo.

También Martínez et al. (2013) ante la falta de arena natural en Cuba, realizó la trituración de residuos de demolición provenientes de tres tipos de edificios en La Habana usándolo como sustituto del 100% de la arena natural utilizada en la

producción de mortero, obteniendo morteros que no eran válidos por no cumplir sus resistencias la normativa.

Y así mismo resulta interesante el estudio de Zhao et al. (2015) que determinó que la fracción más fina de arena reciclada es la que tiene el peor efecto sobre las propiedades mecánicas de los morteros. Encontrándose además estudios que analizan las características de morteros fabricados con diferentes tipos de residuos áridos, como de **pizarra, cuarcita, gneis, granitos, zeolita y serpentina** (Frías et al., 2013; Gadea et al., 2010).

En cuanto a la reutilización de residuos de **ladrillos y piezas cerámicas** en morteros de albañilería también se viene investigando desde hace tiempo (Souza & Mansur, 2004). En su estudio Silva (Silva et al., 2010) concluyó que resulta válido reemplazar hasta el 20% del árido en morteros comunes por residuo cerámico.

También cabe destacar un interesante estudio sobre adición de chamota o polvo de arcilla cocida en morteros hidráulicos (Cortina & Villanueva, 2002), el autor concluye que, aunque su empleo no mejora las propiedades del mortero, se puede añadir esta arena a los morteros en pequeñas proporciones (1:1 en relación en peso con respecto a la cal).

2.1.7. Residuos de lanas minerales.

En cuanto a los residuos de **lanas minerales** procedentes de RCD existen escasas investigaciones en las que se incorporan a morteros de cemento. Únicamente Lin y Cheing analizan en diversos trabajos (Cheng et al., 2011; Lin et al., 2013; Huang et al., 2013) la adición de los residuos específicos de lana de roca en morteros de base cemento (relación agua cemento 0,55 y 0,65). En estos trabajos reemplazan parcialmente (del 0% al 10% en volumen) los agregados naturales por desechos de lana de roca de diferentes longitudes de fibra (17 a 250 μm), consiguiendo una mejora de la resistencia a compresión y a tracción, y mejorando otras propiedades como la resistencia a la abrasión, absorción, resistencia a la reactividad alcalina, resistividad y penetración de iones cloruro de los compuestos, y estableciendo como longitud crítica de las fibras para ser empleada 75 μm .

Se han encontrado también estudios de refuerzos con residuos de lanas minerales similares a los empleados en la presente tesis doctoral, pero en otro tipo de matrices como escayola (Romaniega et al., 2015) que incorpora del 1 al 10% de estos residuos y comprueba que se conservan las propiedades mecánicas y se mejoran las propiedades de aislamiento térmico y acústico, y también se han encontrado este tipo de refuerzos en compuestos de polipropileno.

2.3. ESTUDIOS DE COMPUESTOS DE CEMENTO CON ADICIONES QUE MEJORAN EL COMPORTAMIENTO TÉRMICO

Aunque la introducción de fibras en morteros y hormigones siempre se ha realizado con la finalidad de mejorar el comportamiento a tracción de los mismos, diversos estudios han demostrado que otras propiedades, como el comportamiento térmico, se pueden mejorar.

Es sabido que las propiedades térmicas de los compuestos con matriz de cemento dependen en gran medida de las características químicas y mineralógicas de sus componentes, y de que su mezcla genere compuestos de baja densidad.

Osseni et al.(2016) estudió la incorporación de los residuos agrícolas de **fibras de bananas** en los morteros de cemento, y las pruebas térmicas efectuadas mediante el método de la placa calefactora mostraron una disminución de la efusividad térmica y la conductividad cuando la proporción de fibras aumentó (el cemento se dosificó a 250 kg/m³ de mortero y la relación W / C fue igual a 0.7 para las muestras).

Así mismo existen investigaciones que analizan los morteros de cemento con residuos de **fibras de bambú** (Visakh et al., 2012), demostrando que aunque las propiedades mecánicas deben ser optimizadas estas fibras pueden conferir buenas propiedades térmicas a los compuestos.

También Panesar (2012) estudió la incorporación de **corcho** en sustitución de parte del árido de los morteros consiguiendo morteros con mejores

propiedades térmicas, demostró que la conductividad térmica disminuye a medida que disminuye la densidad del mortero, y que mientras se observa una relación directa entre la densidad del corcho y la densidad del compuesto de mortero y corcho, no se identificó una correlación directa entre el tamaño del corcho y la conductividad térmica del mortero aditivado.

Además se han encontrado investigaciones que analizan el comportamiento térmico de los morteros de cemento a los que se les incorpora **tereftalato de polietileno reciclado** (PET), principalmente recuperado de botellas de bebidas plásticas usadas (Rebeiz et al., 2005).

Otros estudios investigan la posibilidad de utilizar **poliestireno de alto impacto reciclado** (HIPS) como un sustituto de la arena en los morteros de cemento (Wang & Meyer, 2012), consiguiendo que la conductividad térmica del mortero disminuya el 87%, 69% y 44% de la del mortero de referencia cuando la relación HIPS es del 10%, 20% y 50%, respectivamente.

Por último se han encontrado trabajos que analizan como los **residuos de espuma de poliuretano** reducen la densidad de los compuestos de manera proporcional a la cantidad de adición, proporcionando unas propiedades térmicas mejoradas como han demostrado las investigaciones de Gutiérrez-González et al. (2012), concluyendo que el uso de yeso que contiene residuos de espuma de poliuretano es comparable al del yeso aligerado con materiales convencionales. Otros trabajos como los de Petrement (2012) que incorpora residuos de espuma de poliuretano en morteros, demuestran que la densidad aparente de las mezclas en estado endurecido, es significativamente menor en los morteros con residuos que en los morteros de referencia, llegando a alcanzar densidades por debajo de 1,30 kg/l, por lo que se pueden considerar como materiales ligeros.

2.4. CONSIDERACIONES PARCIALES

Como se observa en lo analizado en este capítulo, en las últimas décadas se han producido numerosos esfuerzos por impulsar la investigación y búsqueda de materiales ecológicos para la construcción. En concreto se están empleando

como alternativa a las materias primas que conforman los morteros de cemento: residuos industriales y residuos de construcción y demolición (RCD).

Sin embargo, no se han encontrado investigaciones que analicen la incorporación de distintos tipos de residuos de lanas minerales como adición a morteros de cemento.

La única investigación encontrada que incorpora residuo de un tipo de fibra mineral (lana de roca) agrega hasta el 10% (Lin et al., 2013), aunque con este porcentaje se está reciclando muy poca cantidad de residuo, se ha tomado de referencia para comenzar los ensayos preliminares de incorporación de fibras en los morteros de esta investigación.

Se ha comprobado en la bibliografía analizada que la incorporación de cargas que hacen reducir la densidad de los compuestos provoca que se mejoren sus propiedades térmicas, como se pretende que suceda con los residuos de fibras minerales.

Por lo tanto, en este contexto se entiende de gran importancia estudiar la viabilidad, desde el punto de vista concreto de la afectación a las propiedades no solo físico-mecánicas, sino también térmicas y de durabilidad de los morteros de cemento, de utilizar fibras procedentes de RCD para su refuerzo y de esta forma poder ser una alternativa ecológica al uso actual de las fibras utilizadas. De este modo se conseguirían unos compuestos de menor impacto ambiental contribuyendo además a reducir los residuos de lanas minerales generados por la industria de la construcción.

TRABAJOS CITADOS

- Arizzi, Anna, and Giuseppe Cultrone. 2012. "La Influencia de La Interfase Árido-Matriz (ITZ) En Las Propiedades de Morteros de Cal." *Revista de la sociedad española de minerología* 16(junio): 60–61.
- Aydin, Serdar, Halit Yazici, and Bülent Baradan. 2008. "High Temperature Resistance of Normal Strength and Autoclaved High Strength Mortars Incorporated Polypropylene and Steel Fibers." *Construction and Building Materials* 22(4): 504–12.
- Bilodeau, A., V. K R Kodur, and G. C. Hoff. 2004. "Optimization of the Type and Amount of Polypropylene Fibres for Preventing the Spalling of Lightweight Concrete Subjected to Hydrocarbon Fire." *Cement and Concrete*

- Composites* 26(2): 163–74.
- Brandt, Andrzej M. 2008. "Fibre Reinforced Cement-Based (FRC) Composites after over 40 Years of Development in Building and Civil Engineering." *Composite Structures* 86: 3–9.
- Cáceres, J. M., J. E. G. Hernández, and J. M. Rincón. 1996. "Characterization of Fibers as Rockwool for Insulation Obtained from Canary Islands Basalts." *Materiales De Construcción* 46(242–43): 61–78.
- Carsana, Maddalena, Massimiliano Frassoni, and Luca Bertolini. 2014. "Comparison of Ground Waste Glass with Other Supplementary Cementitious Materials." *Cement and Concrete Composites* 45: 39–45. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.09.005>.
- Cebrián, Fernando Muñoz. 2011. "Comportamiento Mecánico Del Hormigón Reforzado Con Fibra de Polipropileno Multifilamento: Influencia Del Porcentaje de Fibra Adicionado." : 82.
- Cervantes, María del Rosario Leyva. 2014. "Durabilidad de Compuestos a Base de Matrices Minerales Reforzados Con Fibras Naturales." Universidad autónoma de nuevo león.
- Chaipanich, Arnon, and Thanongsak Nochaiya. 2010. "Thermal Analysis and Microstructure of Portland Cement-Fly Ash-Silica Fume Pastes." *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 99: 487–93.
- Chen, Q. Y. et al. 2007. "Characterisation of Products of Tricalcium Silicate Hydration in the Presence of Heavy Metals." *Journal of Hazardous Materials* 147: 817–25.
- Cheng, An, Wei Ting Lin, and Ran Huang. 2011. "Application of Rock Wool Waste in Cement-Based Composites." *Materials and Design* 32(2): 636–42. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2010.08.014>.
- Claramunt Blanes, Josep. 2013. "Estructuras No Tejidas de Fibras Naturales Como Refuerzo Para Compuestos de Cemento de Elevada Ductilidad." In *Actas Del X Congreso Nacional de Materiales Compuestos Celebrado En Algeciras El 2, 3, 4 y 5 de Julio de 2013*, , 317–321.
- Claramunt, Josep, Romildo Dias, and Toledo Filho. 2015. "Cellulosic Fiber Reinforced Cement-Based Composites : A Review of Recent." *Construction and Building Materials* 79: 115–28.
- Cortina, M. G., & de Villanueva Domínguez, L. (2002). Aired-time and chamotte hydraulic mortars. *Materiales de Construcción*, 52(266), 65-76.
- Ding, Yining et al. 2016. "Influence of Different Fibers on the Change of Pore Pressure of Self-Consolidating Concrete Exposed to Fire." *Construction and Building Materials* 113: 456–69. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.070>.
- Fabrizio, Hernán. 2014. "Análisis de La Resistencia Mecánica Del Concreto Con Adición de Fibras de Pambil." U niversidad nacional de Loja Área de la Energía, las Industrias y los Recursos Naturales No Renovables.
- Frías, Moisés, Raquel Vigil de la Villa, Rosario García, and M.Isabel Sánchez de Rojas. 2013. "The Influence of Slate Waste Activation Conditions on Mineralogical Changes and Pozzolanitic Behavior." *American ceramic society* 96(7): 2276–82.
- Gadea, J. et al. 2010. "Reactividad Árido-Álcali En Áridos Empleados Para Hormigón." *Materiales de Construcción* 60(299): 69–78. <http://materconstrucc.revistas.csic.es/index.php/materconstrucc/article/view/427/474>.

- Galindo, J. I. Á., Pérez, A. M., & Casado, P. J. G. (1995). 52. Historia de los morteros. revista PH, (13).
- Gutiérrez-González, S. et al. 2012. "Lightweight Plaster Materials with Enhanced Thermal Properties Made with Polyurethane Foam Wastes." *Construction and Building Materials* 28(1): 653–58.
- Iousef, S., H. Montazeri, B. Blocken, and P. J.V. van Wesemael. 2017. "On the Use of Non-Conformal Grids for Economic LES of Wind Flow and Convective Heat Transfer for a Wall-Mounted Cube." *Building and Environment* 119: 44–61. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.04.004>.
- Jelle, Bjørn Petter. 2011. "Traditional, State-of-the-Art and Future Thermal Building Insulation Materials and Solutions - Properties, Requirements and Possibilities." *Energy and Buildings* 43: 2549–63.
- Jennings, Hamlin M., and Jeffrey W. Bullard. 2011. "From Electrons to Infrastructure: Engineering Concrete from the Bottom Up." *Cement and Concrete Research* 41: 727–35. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.03.025>.
- Jiménez, J. R. et al. 2013. "Use of Fine Recycled Aggregates from Ceramic Waste in Masonry Mortar Manufacturing." *Construction and Building Materials* 40: 679–90.
- Kim, Hongseop et al. 2015. "Static Mechanical Properties and Impact Resistance of Amorphous Metallic Fiber-Reinforced Concrete." *Composite Structure* 134: 831–44. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.08.128>.
- Kosior-kazberuk, Marta, and Julita Krassowska. 2015. "Fracture Behaviour of Basalt and Steel Fibre Reinforced Concrete." *Budownictwo i Inżynieria Środowiska* 6: 73–80.
- Lataste, Stephanie J Barnett Jean-francois, Tony Parry, Steve G Millard, and Marios N Soutsos. 2010. "Assessment of Fibre Orientation in Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete and Its Effect on Flexural Strength." *Materials and Structures*: 1009–23.
- Lin, Wei Ting, An Cheng, Ran Huang, Yuan Chieh Wu, et al. 2013. "Rock Wool Wastes as a Supplementary Cementitious Material Replacement in Cement-Based Composites." *Computers and Concrete* 11(2): 93–104.
- Lin, Wei Ting, An Cheng, Ran Huang, and Si Yu Zou. 2013a. "Improved Microstructure of Cement-Based Composites through the Addition of Rock Wool Particles." *Materials Characterization* 84: 1–9.
- López-Buendía, Angel M., María Dolores Romero-Sánchez, Verónica Climent, and Celia Guillem. 2013. "Surface Treated Polypropylene (PP) Fibres for Reinforced Concrete." *Cement and Concrete Research* 54: 29–35. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.08.004>.
- Majumdar, AJ, and JR Ryder. 1968. "Glass Fibre Reinforcement of Cement Products." *Glass Technol* 9(3): 78–84.
- Mana Halvaei, Masoud Jamshidi, Masoud Latifi. 2014. "Application of Low Modulus Polymeric Fibers in Engineered Cementitious Composites." *Journal of Industrial Textiles* 43(4): 511–24.
- Martínez, Iván, Miren Etxeberria, Elier Pavón, and Nelson Díaz. 2013. "A Comparative Analysis of the Properties of Recycled and Natural Aggregate in Masonry Mortars." *Construction and Building Materials* 49: 384–92.
- Melián, G, and G Barluenga. 2010. "Aumento de La Tenacidad de Hormigones Autocompactables Reforzados Con Fibras Cortas de Polipropileno Toughness Increase of Self Compacting Concrete Reinforced with

- Polypropylene Short Fibers." *Materiales de construcción. (Madrid)* 60: 83–97.
- Mobasher, Barzin, and Surendra P. Shah. 1989. "Test Parameters for Evaluating Toughness of Glass-Fiber Reinforced Concrete Panels." *ACI Materials Journal* 86(5).
- Muñoz-Ruipérez, C., A. Rodríguez, S. Gutiérrez-González, and V. Calderón. 2016. "Lightweight Masonry Mortars Made with Expanded Clay and Recycled Aggregates." *Construction and Building Materials* 118: 139–45.
- Nadal Gisbert, A. et al. 2014. "Analysis Behaviour of Static and Dynamic Properties of Ethylene-Propylene- Diene-Methylene Crumb Rubber Mortar." *Construction and Building Materials* 50: 671–82. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.018>.
- Nixon, P.J. 1976. "The Use of Materials from Demolition in Construction." *Resources Policy* 2(4): 276–83.
- Osseni, Sibiath O.G.q, Clement Ahouannou, Emile A. Sanya, and Yves Jannot. 2016. "Investigation on the Use of Cement Mortar Containing Banana Fibers as Thermal Insulator in Building." *International Journal of Advanced Research* 4(11): 1142–52. <http://www.journalijar.com/article/13306/investigation-on-the-use-of-the-cement-mortar-containing-banana-fibers-as-thermal-insulator-in-building/>.
- Pakravan, H. R., M. Jamshidi, and M. Latifi. 2012. "Investigation on Polymeric Fibers as Reinforcement in Cementitious Composites: Flexural Performance." *Journal of industrial textiles* 42(1): 3–18.
- Pane, Ivindra, and Will Hansen. 2005. "Investigation of Blended Cement Hydration by Isothermal Calorimetry and Thermal Analysis." *Cement and Concrete Research* 35: 1155–64.
- Panesar, D. K., and B. Shindman. 2012. "The Mechanical, Transport and Thermal Properties of Mortar and Concrete Containing Waste Cork." *Cement and Concrete Composites* 34(9): 982–92. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.06.003>.
- Paredes, Alexandra Naranjo. 2016. "Trabajo Final de Master: Estudio de La Aplicabilidad de Materiales Compuestos En La Edificación."
- Petrement, C. J. (2012). Morteros aligerados con residuos de espumas rígidas de poliuretano: obtención, caracterización y puesta en obra (Doctoral dissertation, Universidad de Burgos).
- Piñeiro, Sonia Romaniega, Mercedes Del Río Merino, and Cristina Pérez García. 2015. "New Plaster Composite with Mineral Wool Fibres from CDW Recycling." *Advances in Materials Science and Engineering* 2015.
- Ploger, Robert Riis. 1947. "An Investigation of the Compressive Strength of Concrete in Which Concrete Rubble Was Used as Aggregate." Cornell University.
- Porras-Amores, César. 2014. "Las Construcciones Subterráneas Para Bodegas, Un Modelo de Ahorro de Energía Mediante Los Sistemas Constructivos. Estudio de Las Condiciones Higrotérmicas, Ventilación y Modelos de Simulación." UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID ESCUELA.
- Puertas, F, T Amat, and T Vazquez. 2000. "Comportamiento de Morteros de Cementos Alcalinos Reforzados Con Fibras Acrílicas y de Polipropileno." *Materiales de construcción. (Madrid)* 50(259): 69–84. <http://materconstrucc.revistas.csic.es/recursos.biblioteca.upc.edu/index.ph>

- p/materconstrucc/article/view/400/446.
- Ramachandran, V.S., R.M. Paroli, J.J. Beaudoin, and A.H. Delgado. 2002. "Formation and Hydration of Cement and Cement Compounds." In *Handbook of Thermal Analysis of Construction Materials*, William Andrew Inc., 71–142.
- Rebeiz, Karim S., Amy S. Banko, and Andrew P. Craft. 2005. "Thermal Properties of Polymer Mortar Using Recycled PET and Fly Ash." *Journal of Materials in Civil Engineering* 7(2).
- del Río Merino, Mercedes, Pilar Izquierdo Gracia, and Isabel Salto Weis. 2010. "Sustainable Construction: Construction and Demolition Waste Reconsidered." *Waste Management & Research* 28(2): 118–29.
- del Río Merino, Mercedes, Jaime Santa Cruz Astorqui, and Mariano González Cortina. 2005. "Morteros Aligerados Con Arcilla Expandida: Influencia de La Granulometría y La Adicción de Fibras de Vidrio AR En El Comportamiento Mecánico." *Informes de la Construcción* 57(497): 39–46. <http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es/index.php/informesdelaconstruccion/article/view/466/540>.
- Romualdi, JP, and GB Batson. 1963. "Mechanics of Crack Arrest in Concrete Beam with Closely Spaced Reinforcement." *J. Am. Inst* 60: 775–89.
- Rouquerol., F. et al. 2014. *Adsorption by Powders and Porous Solids. Principles, Methodology and Applications*. Second Edi. Elsevier Ltd.
- Sánchez Paradela, M. Laura, and Alfonso Del Águila. 1992. "El Envejecimiento de Las Pastas de Cemento Reforzadas Con Fibras de Vidrio." *Informes de la Construcción* 42(226): 65–71.
- Sánchez Paradela, M. Laura, and Vicente Sánchez Gálvez. 1991. "Comportamiento a Tracción De Cementos Reforzados Con Fibras De Vidrio." *Consejo Superior de Investigaciones Científicas* 43(413): 13.
- Santa Cruz Astorqui, Jaime, and César Porras-Amores. 2017. "Ventilated Façade with Double Chamber and Flow Control Device." *Energy and Buildings* 149: 471–82. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.04.063>.
- Serrano, Rubén, Alfonso Cobo, María Isabel Prieto, and María de las Nieves González. 2016. "Analysis of Fire Resistance of Concrete with Polypropylene or Steel Fibers." *Construction and Building Materials* 122: 302–9.
- Siligardi, Cristina, Paola Miselli, Elena Francia, and Magdalena Lassinantti Gualtieri. 2017. "Temperature-Induced Microstructural Changes of Fiber-Reinforced Silica Aerogel (FRAB) and Rock Wool Thermal Insulation Materials: A Comparative Study." *Energy and Buildings* 138: 80–87. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.12.022>.
- Silva, J, J de Brito, and R Veiga. 2010. "Recycled Red-Clay Ceramic Construction and Demolition Waste for Mortars Production." *Journal of Materials in Civil Engineering* 22(3): 236–44.
- Souza, L. P D F, and H. S. Mansur. 2004. "Production and Characterization of Ceramic Pieces Obtained by Slip Casting Using Powder Wastes." *Journal of Materials Processing Technology* 145(1): 14–20.
- Tominaga, Yoshihide, and Bert Blocken. 2015. "Wind Tunnel Experiments on Cross-Ventilation Flow of a Generic Building with Contaminant Dispersion in Unsheltered and Sheltered Conditions." *Building and Environment* 92: 452–61. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.05.026>.
- Väntsi, Olli, and Timo Kärki. 2014. "Utilization of Recycled Mineral Wool as

- Filler in Wood-Polypropylene Composites.” *Construction and Building Materials* 55: 220–26.
- Vessalas, K. et al. 2009. “Pozzolanic Reactivity of the Supplementary Cementitious Material Pitchstone Fines by Thermogravimetric Analysis.” *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 97(1): 71–76.
- Villoria Sáez, Paola, Mercedes Del Río Merino, and César Porras-Amores. 2012. “Estimation of Construction and Demolition Waste Volume Generation in New Residential Buildings in Spain.” *Waste Management and Research* 30(2): 137–46.
- Visakh, P. M., Sabu Thomas, Kristiina Oksman, and Aji P. Mathew. 2012. “Crosslinked Natural Rubber Nanocomposites Reinforced with Cellulose Whiskers Isolated from Bamboo Waste: Processing and Mechanical/Thermal Properties.” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 43(4): 735–41.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesa.2011.12.015>.
- Vitrubio Polión, Marco. 2001. *Compendio de Los Diez Libros de Arquitectura de Vitrubio*.
- Wang, Ru, and Christian Meyer. 2012. “Performance of Cement Mortar Made with Recycled High Impact Polystyrene.” *Cement and Concrete Composites* 34(9): 975–81.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.06.014>.
- Xiaochun, Qin, Li Xiaoming, and Cai Xiaopei. 2017. “The Applicability of Alkaline-Resistant Glass Fiber in Cement Mortar of Road Pavement: Corrosion Mechanism and Performance Analysis.” *International Journal of Pavement Research and Technology* 10(6): 536–44.
<https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2017.06.003>.
- Zhao, Zengfeng, Sébastien Remond, Denis Damidot, and Weiya Xu. 2015. “Influence of Fine Recycled Concrete Aggregates on the Properties of Mortars.” *Construction and Building Materials* 81: 179–86.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.037>.

CAPÍTULO 3. JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO

Considerando todo lo expuesto anteriormente, la búsqueda de nuevas vías de reciclaje de los residuos de materiales de construcción resulta fundamental para la minimización de la explotación de los recursos naturales disponibles, y con ello contribuir al desarrollo sostenible en el ámbito de la edificación.

En consecuencia, de todo ello y de los antecedentes desarrollados en los capítulos anteriores, se extraen las siguientes conclusiones que motivan y justifican esta Tesis Doctoral y generan los objetivos propuestos:

- Una de las mayores apuestas de la Unión Europea de cara a lograr una relación sostenible con el medio natural y una utilización eficiente de recursos es el Plan de Acción para la Economía Circular, que apuesta por desacoplar el crecimiento de la economía del consumo de recursos no renovables y la generación de residuos.
- La construcción de edificios no es solo una de las mayores causas de contaminación en Europa, sino que además el sector de la construcción es también uno de los sectores productivos que más residuos genera. Por tanto, se hace imprescindible buscar nuevas alternativas para el reciclaje de los RCD que se generan.
- Para mejorar el medio ambiente es necesario disminuir el consumo energético de las edificaciones buscando nuevas soluciones que mejoren el aislamiento térmico, especialmente en la envolvente del edificio, produciéndose también una mejora del confort de los habitantes en el interior.
- Las lanas minerales son, en la actualidad, el aislante más empleado en la Unión Europea, por lo que la cantidad de residuos RCD de fibras minerales generados ha aumentado drásticamente en los últimos años, ya que no existe una cultura de reciclaje de los mismos depositándose en vertederos.

- Existen numerosas investigaciones sobre refuerzos de fibras en morteros de cemento para mejorar sus propiedades mecánicas, pero son escasas las investigaciones sobre incorporaciones de residuos de fibras minerales para minimizar su impacto ambiental, no analizando ninguna de ellas la mejora del comportamiento térmico de estos morteros.
- Existen escasas investigaciones sobre el reciclaje o reutilización de residuos de lanas minerales como adición en matrices conglomerantes. Además, es sabido que la arena es el recurso natural más demandado del mundo, y que comienza a haber escasez. Por lo que la sustitución de parte del componente de arena del mortero de cemento tradicional por residuos de lanas minerales generará un compuesto más ecológico, y con propiedades mecánicas y térmicas que se esperan mejoradas.

CAPÍTULO 4. OBJETIVOS

El objetivo principal de esta Tesis Doctoral es el estudio del comportamiento físico-mecánico y térmico de los morteros de cemento con residuos de lanas minerales, analizando además la viabilidad de este nuevo material compuesto de menor impacto ambiental.

Se ha comprobado en los capítulos anteriores que es necesario implementar los criterios de la economía circular en el diseño de materiales para la construcción. Concretamente las lanas minerales es uno de los materiales aislantes más empleados en Europa, pero su reciclaje es prácticamente inexistente por lo que incorporándolas como carga en morteros de cemento se puede evitar así su depósito en vertedero. Además, no se han encontrado en la búsqueda bibliográfica y documental investigaciones que analicen la incorporación de distintos tipos de residuos de lanas minerales en morteros de cemento.

Para conseguir el objetivo principal se seguirán los siguientes objetivos específicos:

- OBJETIVO 1: Analizar la viabilidad de utilizar fibras procedentes de residuos de lanas minerales en morteros de cemento, estableciendo las dosificaciones adecuadas a través del diseño de un plan experimental.
- OBJETIVO 2: Caracterizar los morteros de cemento reforzados con fibras seleccionados en el plan experimental, tanto en estado fresco como en estado endurecido para garantizar su adecuación a las prescripciones de la normativa en vigor.
- OBJETIVO 3: Estudiar la viabilidad de realizar estos morteros con árido reciclado en sustitución del árido convencional, para así conseguir un material aún más sostenible.
- OBJETIVO 4: Confeccionar morteros de cemento con propiedades mecánicas y térmicas mejoradas con respecto a los morteros actuales.

- OBJETIVO 5: Caracterizar tanto los materiales que componen dichos morteros reciclados, como el nuevo material compuesto resultante, para conocer su comportamiento mecánico, físico, químico, de durabilidad, térmico, así como su comportamiento ante el fuego.
- OBJETIVO 6: Analizar el comportamiento térmico del nuevo material de mortero de cemento con residuos de fibras minerales aplicado en un sistema constructivo mediante simulación numérica.

CAPÍTULO 5. METODOLOGÍA

En este capítulo se describe tanto el plan experimental desarrollado, como los ensayos y procesos llevados a cabo para caracterizar las materias primas y los morteros confeccionados.

5.1. PLAN EXPERIMENTAL

Primeramente, se analiza la bibliografía consultada en el estado del arte, y posteriormente se realizan una serie de ensayos preliminares de trabajabilidad de los morteros confeccionados con relaciones agua/cemento de 0,5, 0,55, 0,6 y 0,65, obteniendo consistencias secas para relaciones agua/cementos menores de 0,6 y consistencias fluidas para relaciones mayores de 0,6, se establece una relación agua/cemento de 0,6 (consistencia plástica) para todas las muestras confeccionadas.

Se han fabricado un total de 73 series de 3 probetas iguales, por lo tanto, un total de 234 probetas en total.

Todas las probetas se denominan figurando en primer lugar el porcentaje de adición, seguidas por las letras RW para el residuo de lana de roca, FG para el residuo de lana de vidrio y MIX para el residuo mixto de lanas minerales.

De cara a obtener un producto altamente sostenible se procuró añadir el máximo porcentaje de fibras posible, para conseguir reciclar la mayor cantidad de residuo y reducir al mínimo el consumo de árido en su confección. Pese a que en los estudios encontrados los porcentajes de fibras empleados son muy inferiores (0% al 10%), tras realizar ensayos previos con sustituciones del 0% al 30%, se decidió que se podía sustituir hasta el 50% del árido medido en volumen por las fibras, ya que este era el mayor porcentaje que admitían las muestras para seguir siendo trabajables, entendiendo por trabajabilidad la facilidad con que se puede manejar la mezcla sin que se produzcan problemas de segregación, sin que fragüe o se seque, reteniendo la suficiente agua para su correcta puesta en obra.

Posteriormente, se decidió acometer el plan experimental de la investigación en seis diferentes etapas o fases, de acuerdo con los objetivos establecidos (Figura 11), para así poder evaluar mejor las mejoras introducidas en función del porcentaje de adición, y en función de las mejoras introducidas por cada tipo de material reciclado añadido de modo conjunto.

- **1º:** En primer lugar, se realiza una caracterización completa de las materias primas, con especial atención a los tres tipos de residuos de fibras empleados.
- **2º:** Posteriormente en una segunda fase, se analiza la variación del comportamiento mecánico de los morteros elaborados con los diferentes porcentajes de residuos de fibras minerales, con el fin de obtener unas conclusiones preliminares que permitan caracterizar las matrices obtenidas. Así mismo, se realiza un análisis estadístico mediante el cálculo de la varianza de los ensayos más representativos.
- **3º:** De este modo no se dio por concluida la investigación con la segunda fase, sino que se decidió ampliarla estudiando en una tercera fase la viabilidad de realizar mezclas con árido reciclado en sustitución del árido convencional, para así conseguir un material aún más sostenible.
- **4º:** En una cuarta fase se realizaron ensayos físico-mecánicos de los compuestos con el 30% de adición de fibras, ya que en algunos casos habían presentado un mejor comportamiento en la fase 2.
- **5ª:** En la quinta fase se analizan las propiedades de durabilidad y puesta en obra de los morteros seleccionados. Así mismo en esta fase se realizan probetas con fibras comerciales sintéticas de polipropileno con los mismos porcentajes de adición empleados, a modo de comparativa.
- **6ª:** Finalmente se realiza una simulación numérica, en la sexta fase, del comportamiento térmico de los morteros más adecuados para diferentes soluciones constructivas.

Figura 11. Esquema de las fases del plan experimental y su relación con los objetivos establecidos.

5.1.1. Fase 1: Caracterización de las materias primas

En esta primera fase se han caracterizado los materiales necesarios para la elaboración de los morteros con residuos de fibras y de los morteros de referencia. Estos materiales han sido: arena de río, cemento, agua y los residuos de lanas minerales.

En cuanto al tratamiento de los residuos, a los tres tipos de residuos de fibras minerales (lana de roca, fibra de vidrio y mezcla de lanas minerales) se les ha sometido a un tratamiento previo: se han triturado en una máquina de 550 W de potencia y una tensión nominal de 50 Hz, durante 3 intervalos de 3 minutos cada uno, consiguiendo que tengan un formato adecuado para ser incorporadas en los morteros (Figura 12).

Figura 12. Triturado de los residuos de fibras minerales: lana de vidrio (izquierda) y lana de roca (derecha).

Ensayos realizados

Se han realizado los ensayos siguientes para caracterización de las materias primas (Figura 13): densidad aparente, densidad real, granulometría de los áridos y porcentaje de finos de la arena de río y los áridos reciclados, análisis químico (FRX), difracción de rayos X (DRX), termogravimetría (TG) y microscopía electrónica de barrido SEM.

Figura 13. Esquema de los ensayos de la Fase 1.

5.1.2. Fase 2: Caracterización inicial de los morteros y ensayos previos

En esta fase se realizan las series de probetas con los tres tipos de residuos de fibras utilizados: residuo de lana de roca (RW); residuos de fibra de vidrio (FG); mezcla de residuos de fibras (MIX). Añadiendo el residuo en función de lo establecido en los ensayos previos, los siguientes porcentajes de fibras en sustitución de parte del árido, medido en volumen: 30%, 40% y 50%.

Según la bibliografía consultada y tras los ensayos previos realizados, se establece una relación cemento: arena: agua de 1:3:0,6 para todas las mezclas confeccionadas. Así mismo se realiza un estudio estadístico a través del análisis de la varianza de los ensayos más representativos de esta fase de cara a determinar los compuestos más idóneos para seguir estudiando en las siguientes fases.

Confección de probetas

Se elaboran las distintas series de probetas prismáticas de dimensiones 4x4x16 cm., con un riguroso control en su preparación según norma (AENOR A. E., UNE EN1015-2:2012; AENOR A. E., UNE EN1015-11:2000).

Aunque en la normativa no se contempla la fabricación de morteros con incorporación de fibras, se ha seguido el procedimiento reflejado en la normativa indicada buscando el rigor y la normalización de los ensayos, de cara a que el estudio pueda ser reproducido y para que los ensayos puedan ser comparables en futuras investigaciones.

Para ello, se incorpora en primer lugar las adiciones de fibras en el agua y posteriormente se añade el cemento y procediéndose al amasado manual durante 15 segundos. Después, se pone en marcha la amasadora que a velocidad lenta mezcla los componentes durante 15 segundos, y que posteriormente incorpora el árido realizando una amasada rápida durante 75 segundos.

Una vez terminado el proceso de elaboración se procede a determinar la consistencia de cada una de las mezclas, mediante la medida del valor de escurrimiento especificado en la norma (Figura 14).

Figura 14. Determinación de la consistencia de las mezclas y probetas confeccionadas.

Después la mezcla se vierte en los moldes procurando evitar la formación de burbujas de aire. Para ello se vierte la mezcla en los moldes en 2 tongadas y se sacuden 25 veces sobre la mesa que lo soporta. Posteriormente se elimina el mortero sobrante y se alisan las probetas con una paleta.

Tras 24 horas de curado en cámara húmeda a una temperatura de 20°C y una humedad relativa del 95%, se procede al desmoldado de las probetas, y se introducen de nuevo en la cámara húmeda para que permanezcan allí un total 28 días para alcanzar la dureza necesaria para su rotura.

Probetas confeccionadas

A continuación, en la Tabla 11, se muestran las series de probetas elaboradas en la Fase 2.

Fase	Serie	% Adición	Tipo de fibra	Denominación	Formato (mm)
Fase 2	Serie I	0%	—	Ref	160x40x40
		30%	Lana de roca	30% RW	
		30%	Fibra de vidrio	30% FG	
		30%	Mezcla	30% MIX	
		40%	Lana de roca	40% RW	
		40%	Fibra de vidrio	40% FG	
		40%	Mezcla	40% MIX	
		50%	Lana de roca	50% RW	
		50%	Fibra de vidrio	50% FG	
		50%	Mezcla	50% MIX	
	Serie I'	0%	—	Ref'	160x40x40
		30%	Lana de roca	30% RW'	
		30%	Fibra de vidrio	30% FG'	
		30%	Mezcla	30% MIX'	
		40%	Lana de roca	40% RW'	
		40%	Fibra de vidrio	40% FG'	
		40%	Mezcla	40% MIX'	
		50%	Lana de roca	50% RW'	
		50%	Fibra de vidrio	50% FG'	
		50%	Mezcla	50% MIX'	

Tabla 11. Probetas confeccionadas Fase 2.

Ensayos realizados

En esta fase de caracterización de los compuestos se han realizado los ensayos a las Series I y I' que se muestran en la Figura 15: densidad real, dureza superficial Shore D, resistencia a flexión y compresión, consistencia y densidad aparente del mortero en estado fresco, absorción de agua por capilaridad, densidad aparente en estado endurecido y el ensayo térmico de todas las mezclas confeccionadas.

Figura 15. Esquema de los ensayos de la Fase 2.

5.1.2.1. Análisis estadístico

La parte fundamental de los resultados obtenidos en la Fase 2 se analizan estadísticamente mediante un análisis de la varianza para poder comprobar la idoneidad del diseño experimental.

Se elabora una matriz general con dos factores: el contenido de residuo empleado (30%-40%-50%) y el tipo de residuo (lana de roca (RW), fibra de vidrio (FG) y residuos mixtos (MIX)). Se puede observar en la Tabla 12.

		Tipo de Residuo de Lanas Minerales		
		RW	FG	MIX
Cantidad de residuo	0%	x	x	x
	30%	x	x	x
	40%	x	x	x
	50%	x	x	x

Tabla 12. Factores de la matriz.

Las variables para la matriz planteada son: densidad, dureza superficial Shore D, resistencia a flexión y resistencia a compresión.

En función de las variables se elaboran los ensayos de manera aleatoria para analizar la interacción entre dichas variables.

Se utiliza el software Statgraphics Centurión XVII para el análisis de la varianza, comparándose los resultados y concluyendo si existen o no diferencias significativas entre ellos. Así mismo se comprueba con este modelo la correlación entre los diferentes factores para los resultados de cada variable.

Para poder aplicar el análisis de la varianza se deben cumplir las siguientes hipótesis (para muestras mayores o igual a 3):

- La variable aleatoria en cada nivel de factor debe ser una variable normal.
- Que las observaciones se hayan realizado de forma aleatoria, y por lo tanto sean independientes.
- Debe darse homocedasticidad u homogeneidad de las varianzas de cada nivel de factor.

5.1.3. Fase 3: Análisis de la viabilidad de la incorporación de áridos reciclados

En esta fase se estudió el comportamiento y las propiedades más relevantes de los morteros con residuos de fibras al sustituir la totalidad de la arena de río empleada en las mezclas por árido reciclado, con el fin de determinar si continuar el plan experimental con árido reciclado en lugar de árido normal.

También se analiza los efectos que produce el árido reciclado en los morteros con residuos de fibras a medida que se incrementa su porcentaje de adición.

Probetas confeccionadas

A continuación, en la Tabla 13 se muestran las series de probetas elaboradas en la Fase 3.

Fase	Serie	% Adición	Tipo de fibra	Denominación	Formato (mm)
Fase 3	Serie II	0%		Ref AR	160x40x40
		30%	Lana de roca	30% RW AR	
		30%	Fibra de vidrio	30% FG AR	
		30%	Mezcla	30% MIX AR	
		40%	Lana de roca	40% RW AR	
		40%	Fibra de vidrio	40% FG AR	
		40%	Mezcla	40% MIX AR	
		50%	Lana de roca	50% RW AR	
		50%	Fibra de vidrio	50% FG AR	
		50%	Mezcla	50% MIX AR	

Tabla 13. Probetas confeccionadas Fase 3.

Ensayos realizados

Se han realizado a la Serie II los ensayos de consistencia y densidad del mortero en estado fresco, dureza superficial Shore D, resistencia a flexión y a compresión. (Figura 16).

Figura 16. Esquema de los ensayos de la Fase 3.

5.1.4. Fase 4: Selección y caracterización final de los morteros

En esta cuarta fase se seleccionaron las amasadas que presentaron un mejor comportamiento en la segunda fase, y se realizaron más ensayos para una caracterización completa de los eco-morteros confeccionados.

Se agregaron, como en el apartado anterior, fibras en diferentes proporciones a una matriz de cemento, sustituyendo parte de la arena por fibras medido en volumen, sometiendo estas mezclas a los diferentes ensayos para su caracterización completa (Figura 17).

Figura 17. Confección de probetas de Módulo de Young y energía de fractura.

Probetas confeccionadas

A continuación, en la Tabla 14 se muestran las series de probetas elaboradas en la Fase 4.

Fase	Serie	% Adición	Tipo de fibra	Denominación	Formato (mm)
Fase 4	Serie III	0%		Ref_FE	100x100x400
		30%	Lana de roca	30% RW_FE	
		30%	Fibra de vidrio	30% FG_FE	
		30%	Mezcla	30% MIX_FE	
	Serie IV	0%		Ref_MY	15x30
		30%	Lana de roca	30% RW_MY	
		30%	Fibra de vidrio	30% FG_MY	
		30%	Mezcla	30% MIX_MY	

Tabla 14. Probetas confeccionadas Fase 4 (FE: ensayo de fractura y MY: ensayo de módulo de Young).

Ensayos realizados

Se analizaron las siguientes propiedades de los compuestos pertenecientes a las Series III y IV (Figura 18): microscopía electrónica de barrido (SEM), porosimetría por inyección de mercurio, adsorción-desorción de nitrógeno, difracción de rayos X, termogravimetría, energía de fractura y determinación del módulo secante de elasticidad en compresión de los morteros o módulo de young.

Figura 18. Esquema de los ensayos de la Fase 4.

5.1.5. Fase 5: Estudio de la durabilidad de los morteros más sostenibles

En esta última fase se realizan los ensayos referentes al análisis de la durabilidad y puesta en obra de los morteros con el máximo porcentaje que se ha comprobado que es viable de adición de fibras. Además, se han realizado morteros con fibras comerciales sintéticas de polipropileno, que son las más empleadas en la actualidad, para comparar su comportamiento frente a los morteros con residuos de fibras.

Probetas confeccionadas

A continuación, en la Tabla 15 se muestran las series de probetas elaboradas en la Fase 5.

Fase	Serie	% Adición	Tipo de fibra	Denominación	Formato (mm)
Fase 5	Serie V	0%	—	Ref_F	160x40x40
		50%	Lana de roca	50% RW_F	
		50%	Fibra de vidrio	50% FG_F	
		50%	Mezcla	50% MIX_F	
	Serie VI	0%	—	Ref_H	160x40x40
		50%	Lana de roca	50% RW_H	
		50%	Fibra de vidrio	50% FG_H	
		50%	Mezcla	50% MIX_H	
	Serie VII	0%	—	Ref_CS	160x40x40
		50%	Lana de roca	50% RW_CS	
		50%	Fibra de vidrio	50% FG_CS	
		50%	Mezcla	50% MIX_CS	
	Serie VIII	0%	—	Ref_PER	15x30
		50%	Lana de roca	50% RW_PER	
		50%	Fibra de vidrio	50% FG_PER	
		50%	Mezcla	50% MIX_PER	
	Serie IX	0%	—	Ref_AD	5x1
		50%	Lana de roca	50% RW_AD	
		50%	Fibra de vidrio	50% FG_AD	
		50%	Mezcla	50% MIX_AD	
	Serie X	0%	—	Ref_AO	—
		50%	Lana de roca	50% RW_AO	
		50%	Fibra de vidrio	50% FG_AO	
		50%	Mezcla	50% MIX_AO	
	Serie XI	0%	—	Ref_T	—
		50%	Lana de roca	50% RW_T	
		50%	Fibra de vidrio	50% FG_T	
		50%	Mezcla	50% MIX_T	
	Serie XII	0%	—	Ref_POL	160x40x40
		50%	Lana de roca	50% RW_POL	
		50%	Fibra de vidrio	50% FG_POL	
		50%	Mezcla	50% MIX_POL	
	Serie XII'	0%	—	Ref_POL'	160x40x40
		50%	Lana de roca	50% RW_POL'	
		50%	Fibra de vidrio	50% FG_POL'	
		50%	Mezcla	50% MIX_POL'	

Tabla 15. Probetas confeccionadas Fase 5 (F: ensayo al fuego; H: ensayo heladicidad; CS: ensayo cristalización de sales; PER: ensayo permeabilidad al vapor de agua; AD: resistencia adhesión; AO: contenido aire ocluido; T: periodo de trabajabilidad; POL: ensayos con polipropileno).

Ensayos realizados

Se hicieron los ensayos para los morteros con el 50% de incorporación de los tres tipos de fibras que se muestran en la Figura 19: resistencia al fuego (Serie V), heladicidad (Serie VI), cristalización de sales (Serie VII), determinación de la permeabilidad al vapor de agua del mortero endurecido (Serie VIII),

resistencia a la adhesión (Serie IX), contenido de aire ocluido del mortero en estado fresco (Serie X) y periodo de trabajabilidad del mortero en estado fresco (Serie XI).

Figura 19. Esquema de los ensayos de la Fase 5.

También en esta fase se han confeccionado morteros con fibras comerciales sintéticas de polipropileno de 6 mm (Series XII Y XII'), con los mismos porcentajes de adición de fibras, 30%, 40% y 50% en sustitución del árido medido en volumen, empleados en la investigación (Figura 20). Se les han realizado a los morteros los ensayos de dureza superficial Shore D, resistencia a flexión y resistencia a compresión.

Figura 20. Confección de probetas con fibras de polipropileno.

5.1.6. Fase 6: Simulación numérica

En el presente apartado se desarrolla un modelo de simulación que permite evaluar con detalle el comportamiento termofluidodinámico de una fachada con bloques de mortero de cemento con residuos de fibras de lanas minerales, similar al realizado en su investigación por San Antonio (2016) con yeso aligerado con residuo de poliestireno extruido.

Para realizar esta simulación numérica se ha empleado un programa de Dinámica de Fluidos Computacional o CFD (acrónimo inglés de Computacional Fluid Dynamics), concretamente el software STAR_CCM+.

Mediante esta simulación se pretende evaluar la transferencia de calor en un sistema constructivo de fachada tradicional. Se define un modelo de referencia sobre el que se plantea el escenario de sustituir el bloque de mortero de cemento sin fibras por el bloque de cemento aditivado con residuos de fibras.

Modelo de referencia

Según la bibliografía consultada se ha decidido utilizar un modelo cúbico (Lousef et al., 2017; Tominaga & Blocken, 2015) de 1x1 m² de superficie, sobre una base de un sistema constructivo obtenido del Código Técnico de la Edificación que fijará el espesor.

Se establece una fábrica con bloques de hormigón, no ventilada y con aislamiento por el interior, como se muestra en la Figura 21. Los parámetros de

los distintos materiales tipo que conforman la solución constructiva en los modelos pueden observarse en la Tabla 16.

Leyenda

C	Cámara de aire
RI	Revestimiento interior
LH	Fábrica ladrillo cerámico hueco
BH	Fábrica de bloque de hormigón
AT	Aislante
RM	Revestimiento intermedio

Figura 21. Modelo de referencia en fachada. Fuente: Catálogo de elementos constructivos del CTE. Ministerio de Fomento (2011).

Material	Coefficiente de conductividad térmica (W/mK)	Densidad (g/cm³)	Calor específico (J/kgK)
Enfoscado de mortero	1,300	2,000	1000
Cámara de aire	0,270	-	-
Aislamiento térmico	0,040	0,112	1000
Ladrillo hueco doble	0,320	0,770	1000
Revestimiento de yeso	0,430	0,900	1000

Tabla 16. Datos de elementos constructivos. Fuente: Instituto Eduardo Torroja (2007).

Modelos escenario

Se establecerá el compuesto óptimo para realizar los modelos escenario en función de los resultados de las fases de análisis anteriores. Los valores del coeficiente de conductividad térmica y del calor específico de los compuestos son los obtenidos en el ensayo térmico del apartado 6.2.9. Conductividad térmica.

Análisis energético

Sobre cada modelo se analiza la disminución del flujo de energía por W/m^2 y la diferencia de temperatura entre la cara exterior e interior del muro, suponiendo un escenario de invierno.

5.2. MATERIALES UTILIZADOS

En este apartado se analizan los materiales utilizados para la realización de los compuestos: conglomerante, arena de río, agua, árido reciclado, fibras de polipropileno y los tres tipos fibras de residuos de lanas minerales empleadas.

5.2.1. Conglomerante

En esta investigación se ha utilizado, al ser el más habitual según la bibliografía consultada para trabajos de albañilería, el siguiente tipo de cemento común (Clinker de Portland) como conglomerante: Cem II/B-L 32,5 N Cemento portland con caliza, de gama baja de clinker, de resistencia media 32,5 MPa a 28 días y con resistencia inicial normal N. Cuyas propiedades vienen recogidas en la norma UNE-EN 197-1 (AENOR A. E., UNE-EN 197-1:2011, 2011).

Para los ensayos realizados en Madrid se ha utilizado el cemento de la marca Portland Valderribas procedente de la fábrica Integral El Alto, y para los ensayos realizados en Polonia se ha utilizado el cemento Budowlany de la marca Lafarge (Figura 22), ambos con idénticas características anteriormente citadas.

Figura 22. Cementos Portland empleados en la fase experimental.

5.2.2. Arena de río

La arena empleada para la elaboración de las probetas ha sido arena de río lavada que atraviesa un tamiz de malla de hasta 4mm procedente de gravera o cantera (Figura 23).

Este tipo de arenas se caracterizan por su gran contenido en cuarzo y cumplen los requisitos que recoge la norma UNE-EN 196-1 (AENOR A. E., UNE-EN 196-1:2005, 2005).

Figura 23. Arena de río lavada empleada en la confección de los morteros.

5.2.3. Agua

El agua que se ha empleado en el desarrollo de la parte experimental realizada en los laboratorios de Madrid proviene del Canal de Isabel II, encargado de gestionar el agua en la Comunidad de Madrid, y las características de esta agua son los que figuran en la siguiente Tabla 17:

:

Características Medias del Agua de Consumo en el Sistema de Distribución
(Intervalo del 95% de las muestras)
AÑO: 2016

PARÁMETROS	VALOR	V.P *	PARÁMETROS	VALOR	V.P *
ORGANOLEPTICOS			FÍSICO-QUÍMICOS (Cont.)		
Olor/Sabor (ID a 25°C)	0 - 1	3	Fluoruro (mg/L)	< 0,150	1,5
Color (mg Pt-Co/L)	0 - 5	15	Cianuro (µg/L)	< 1,5	50
Turbidez (U.N.F.)	< 1	5	Aluminio (µg/L)	10 - 150	200
			Hierro (µg/L)	< 70	200
PARÁMETROS			Manganeso (µg/L)	< 20	50
MICROBIOLOGICOS			Boro (mg/L)	< 0,050	1,0
Aerobios 22°C (UFC/ml)	< 50	---	Cobre (mg/L)	< 0,050	2,0
Bacterias coliformes (UFC/100 ml)	0	0	Antimonio (µg/L)	< 2,5	5,0
<i>Escherichia coli</i> (UFC/100 ml)	0	0	Arsénico (µg/L)	< 2,5	10,0
Enterococos (UFC/100 ml)	0	0	Cadmio (µg/L)	< 2,5	5,0
<i>Clostridium perfringens</i> (UFC/100 ml)	0	0	Cromo (µg/L)	< 2,5	50
			Níquel (µg/L)	< 2,5	20
PARÁMETROS			Plomo (µg/L)	< 2,5	10
FÍSICO-QUÍMICOS			Selenio (µg/L)	< 2,5	10
pH (unidades)	6,6 - 8,5	6,5 - 9,5	Mercurio (µg/L)	< 0,1	1,0
Conductividad (µS/cm 20 °C)	75 - 250	2.500	Benzo (□α) pireno (µg/L)	< 0,002	0,010
Amonio (mg/L)	0,20 - 0,50	0,50	H.A.P. (µg/L)	< 0,010	0,10
Nitratos (mg/L)	0,5 - 5	50	Aldrín (µg/L)	< 0,01	0,03
Nitritos (mg/L)	< 0,100	0,500	Dieldrín (µg/L)	< 0,01	0,03
Cloro libre residual (mg/L)	< 0,15	1,0	Heptacloro (µg/L)	< 0,01	0,03
Cloro combinado residual (mg/L)	0,3 - 2,0	2,0	Heptacloro epóxido (µg/L)	< 0,01	0,03
C.O.T. (mg/L)	1,0 - 2,5	---	Total Plaguicidas (µg/L)	< 0,05	0,5
Cloruros (mg/L)	10 - 40	250	Trihalometanos (µg/L)	5 - 80	150
Sulfatos (mg/L)	5,0 - 30	250	Bromato (µg/L)	< 5,0	25
Calcio (mg/L)	5,0 - 25	---	Benceno (µg/L)	< 0,3	1,0
Magnesio (mg/L)	1,0 - 5,0	---	1,2-Dicloroetano (µg/L)	< 0,3	3,0
Sodio (mg/L)	1,0 - 20	200	Tricloroetano+Tetracloroetano (µg/L)	< 0,5	10
Potasio (mg/L)	0,5 - 2,0	---	Microcistina (µg/L)	< 0,2	1
Dureza total (mg/L CO ₃ Ca)	10 - 80	---			
			RADIATIVIDAD		
			Actividad α total (Bq/L)	< 0,05	0,1
			Actividad β resto (Bq/L)	< 0,06	1
			Tritio (Bq/L)	< 20	100
			Dosis indicativa total (mSv/año)	< 0,1	0,1

* Valor Paramétrico (establecido en el R.D. 140/2003 de 7 de Febrero).

Temperatura media del agua en los diferentes meses del año

E	F	M	Ab	My	Jn	Jl	Ag	S	O	N	D	
9,8	9,5	9,3	10,9	12,7	15,0	16,9	17,8	17,7	15,5	12,5	10,8	°C

Tabla 17. Análisis del agua de la Comunidad de Madrid. Fuente: Canal de Isabel II (2017).

En la parte del trabajo desarrollado en Polonia se ha utilizado el agua procedente de la depuradora Bialystok Sp., tras comprobar los datos facilitados por la empresa, estos muestran que las características fisicoquímicas del agua de Bialystok son similares a las del agua empleada en los ensayos de Madrid. Ambas son aptas para su empleo en la elaboración de morteros.

5.2.4. Árido reciclado

El árido reciclado empleado en la fase 3 del estudio es árido reciclado mixto, es decir procedente del tratamiento de residuos de distinta naturaleza y con un contenido de partículas cerámicas y hormigones menores al 20% y 90% respectivamente, así mismo se ha tamizado por un tamiz de 4mm de diámetro. Estos áridos se han recogido en el centro de tratamiento de áridos reciclados Tec-Rec (Tecnología y Reciclado, S.L.), situada en la Comunidad de Madrid.

Únicamente se ha comprobado la granulometría de los áridos y el porcentaje de finos, ya que la caracterización completa de estos áridos reciclados se puede encontrar en la investigación de Sáiz (2015).

5.2.5. Fibras de polipropileno

Las fibras comerciales de polipropileno empleadas en la fase 5 de esta investigación son fibras de polipropileno para hormigones y morteros SikaCim® Fibras-6 de la empresa Sika,S.A.U., de 6mm de longitud.

Esta fibra cumple con la norma de UNE 14889-2: Fibras poliméricas para hormigón.Clase 1-a: “Microfibra Monofilamentosa”.

5.2.6. Residuos de lanas minerales

Se han empleado tres tipos residuos de lanas minerales distintos, todos ellos procedentes del Centro de Tratamiento Integral de Residuos de Construcción y Demolición autovía N-1 dirección Irún Km 40, situado en la localidad de El Molar en la Comunidad de Madrid, y gestionado por la empresa GEDESMA S.A. (Figura 24). En esta planta de tratamiento se ha recogido manualmente el material que se encontraba almacenado al aire libre mezclado con otra serie de residuos. Posteriormente se han seleccionado y separado los residuos de lana de roca y los de fibra de vidrio, y a sí mismo se ha mantenido otra muestra de los residuos de lanas minerales mezclados sin seleccionar, tal y como se encontraban en el vertedero.

Figura 24. Centro de tratamiento integral de residuos situado en El Molar en Madrid.

5.3. ENSAYOS REALIZADOS

A continuación, se describen los ensayos y procesos realizados para llevar a cabo la caracterización de las materias primas y de los morteros confeccionados, especificando el procedimiento operativo en cada ensayo.

5.3.1. Ensayos físicos

Como propiedades físicas pueden definirse una gama muy amplia de características, todas ellas están relacionadas con la masa y el volumen de los materiales ensayados.

Los valores de muchas de las propiedades físicas dependen solo del material ensayado, independientemente del sistema de observación y medida, por lo que se denominan, a veces, propiedades intrínsecas (Laffarga Osteret & Olivares Santiago, 1995).

Se han realizado los ensayos físicos siguientes: densidad aparente de las fibras y de las materias primas, densidad real de las fibras y de las materias primas, humedad de las fibras y de las materias primas, microscopía electrónica de barrido (SEM), granulometría de los áridos, porcentaje de finos de los áridos, consistencia del mortero fresco, porosimetría por inyección de mercurio, densidad aparente del mortero fresco, contenido del aire del mortero fresco, periodo de trabajabilidad del mortero fresco, densidad aparente del

mortero endurecido, densidad real del mortero endurecido, coeficiente de absorción de agua por capilaridad del mortero endurecido y permeabilidad al vapor de agua del mortero endurecido.

5.3.1.1. Densidad aparente de las fibras y de las materias primas

Se ha calculado la densidad aparente o de empaquetamiento de los residuos de fibras, del cemento y del árido, mediante el método de la balanza analítica. El ensayo se ha realizado en el laboratorio de química de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Diseño Industrial de la Universidad Politécnica de Madrid. Previamente al ensayo se procede a desecar todos los materiales en una estufa hasta masa contante a una temperatura de $70^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$. Posteriormente se han introducido los materiales en probetas de cristal hasta un volumen determinado, y se han realizado 3 pesadas de cada una (Figura 25).

Figura 25. Materias primas pesadas en las balanzas analíticas.

Los cálculos se realizaron utilizando la siguiente expresión:

$$P = m / V$$

Donde:

P Densidad aparente g/cm^3

m Promedio de los resultados de las pesadas consecutivas expresada en g

V Promedio del volumen en cm^3

5.3.1.2. Densidad real de las fibras y de las materias primas

Se ha calculado la densidad real de los residuos de lanas minerales, el cemento y la arena mediante el método de la picnometría de helio.

Este ensayo se ha llevado a cabo en el laboratorio de química de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Diseño Industrial de la Universidad Politécnica de Madrid.

Mediante un aparato llamado estereopicnómetro (Figura 26) se ha determina el volumen y la densidad real, mediante el uso de gas helio de alta pureza comprimido. En primer lugar, se procede a pesar las muestras ya desecadas, obteniéndose la masa M .

Figura 26. Estereopicnómetro.

El cálculo de la densidad real se obtiene aplicando las siguientes expresiones:

$$V_s = V_c + [V_a / 1 - (P_2 - P_3)]$$

$$P = M / V_s$$

Donde:

- V_s Volumen de la muestra en cm^3
- V_c Volumen de la celda de la muestra ($155,88 \text{ cm}^3$)
- V_a Volumen de la celda de referencia ($76,67 \text{ cm}^3$)
- P_2 Lectura tras presurizar la celda de la muestra

- P_3 Lectura de la presión después de incluir el volumen (V_a)
 P Densidad real g/cm^3
 M Masa de la muestra expresada en g

5.3.1.3. Microscopía electrónica de barrido (SEM)

Se realiza un estudio de microscopía SEM para la obtención de las imágenes ópticas tanto de los tres tipos de residuos de fibras utilizados en la investigación, como de las mezclas de morteros con fibras confeccionados (Figura 28).

El ensayo se ha realizado en los laboratorios de la Faculty of Civil and Environmental Engineering de la Bialystok University of Technology, en Bialystok, Polonia.

El instrumento utilizado en la caracterización microestructural de los materiales es un microscopio electrónico de alta resolución QUANTA FEG 250 de la marca FEI (Figura 27), cuyo tamaño de la etapa motorizada son (50mm, 100mm y 150mm) y la gama z motorizada (25mm, 60mm y 65mm), respectivamente.

Figura 27. Microscopio electrónico.

Figura 28. Preparación de muestras de los morteros a ensayar.

5.3.1.4. Determinación de la granulometría de los áridos

El ensayo para la determinación de la granulometría de los áridos se ha realizado siguiendo el “Método del tamizado” recogido en la Parte 1 de la norma UNE-EN 933-1 (AENOR A. E., UNE-EN 933-1, 2012), y se ha realizado en el laboratorio de materiales de la Escuela Técnica Superior de Edificación de la Universidad Politécnica de Madrid.

Consiste en colocar una serie de tamices en orden decreciente según el tamaño de abertura de malla y agitando la muestra mecánicamente durante un minuto. Posteriormente el árido queda retenido según los diferentes tamaños de los tamices, se han utilizado los tamices de 4-2-1-0,5-0,25-0,125-0,063 mm según se observa en la Figura 29.

Figura 29. Instrumental de laboratorio para el análisis granulométrico.

5.3.1.5. *Porcentaje de finos de los áridos*

El porcentaje de finos de los áridos se determina conforme a lo dispuesto en la norma UNE-EN 993-1 (AENOR A. E., UNE-EN 933-1, 2012), realizándose el ensayo en el laboratorio de materiales de la Escuela Técnica Superior de Edificación de la Universidad Politécnica de Madrid. Se tamiza la arena, desecada previamente, en los tamices con luz de malla 4-2-0,5-0,250-0,125-0,036 mm, y el porcentaje de finos es la cantidad de material que pasa por el tamiz 0,063 mm en relación con la total de la muestra tamizada.

5.3.1.6. *Determinación de la consistencia del mortero fresco*

Para la determinación de la consistencia del mortero fresco de las diferentes mezclas se utiliza el método de la mesa de sacudidas, conforme al procedimiento descrito en la parte 3 de la norma UNE-EN 1015-3 (AENOR A. E., UNE EN 1015-3:2000, 2000) “Métodos de ensayo en los morteros de albañilería”. El ensayo se ha realizado en el laboratorio de materiales de la Escuela Técnica Superior de Edificación de la Universidad Politécnica de Madrid.

El procedimiento se ha realizado vertiendo el mortero fresco en el molde situado en la mesa de sacudidas y compactándolo, posteriormente se retira el molde a los 15 segundos y se realizan 15 sacudidas verticales con una frecuencia aproximada de una sacudida por segundo, para que el mortero se extienda sobre el disco (Figura 30).

El resultado del escurrimiento se obtiene midiendo el diámetro del mortero en dos direcciones perpendiculares con el calibre, y calculando el valor medio de las dos medidas.

Figura 30. Ensayo de mesa de sacudidas según norma UNE EN-1015-3.

5.3.1.7. Porosimetría por inyección de mercurio

Se ha realizado el ensayo de porosimetría por inyección de Hg en los laboratorios de la Faculty of Civil and Environmental Engineering de la Bialystok University of Technology, en Bialystok, Polonia.

Con este ensayo se pretende obtener de forma indirecta, la distribución de la porosidad en función del tamaño aparente de acceso a los poros, realizándose así la caracterización del sistema poroso de los morteros confeccionados, ya que la porosidad de un material afecta sus propiedades físicas y, posteriormente, su comportamiento en su entorno.

Para ello se extraen de las probetas unas muestras cilíndricas de 1cm de diámetro por 1 cm de altura mediante un taladro (Figura 31).

El instrumento utilizado para el ensayo ha sido el porosímetro AutoPore IV 9500 de Micromeritics (Figura 32) que caracteriza la porosidad de un material aplicando varios niveles de presión a una muestra sumergida en mercurio (Anexo 4). La presión requerida para penetrar el mercurio en los poros de la muestra es inversamente proporcional al tamaño de los poros.

Figura 31. Confección de las muestras a ensayar.

Figura 32. Porosímetro empleado en el ensayo.

5.3.1.8. *Isotermas de adsorción / desorción de nitrógeno*

Se ha realizado el ensayo en los laboratorios del Centro Nacional de Tecnología de Hidrógeno y Pilas de Combustible.

Este ensayo de adsorción física de gases ha sido empleado para caracterizar la estructura porosa de los morteros del presente estudio. La isoterma de adsorción suministra información de tipo cualitativo sobre la porosidad del

material que es accesible a la molécula de gas que adsorbe, y permite también obtener información de tipo cuantitativo, como la superficie específica y la distribución de tamaños de poro (Anexo 1).

Para la caracterización de las muestras se ha empleado un equipo analizador de fisisorción y quimisorción suministrado por Micromeritics: 3Flex Chemi TCD.

5.3.1.9. Densidad aparente del mortero fresco

La densidad aparente del mortero fresco es fundamental para definir las posibles aplicaciones que pueda tener, en el caso de estudio el de las diferentes mezclas se ha determinado conforme al procedimiento descrito en la norma UNE-EN 1015-6 (AENOR A. E., UNE EN 1015-6:1999, 1999) “Métodos de ensayo en los morteros de albañilería” Parte 6: Determinación de la densidad aparente del mortero fresco. El ensayo se ha realizado en el laboratorio de materiales de la Escuela Técnica Superior de Edificación de la Universidad Politécnica de Madrid (Figura 33).

La densidad del mortero en estado fresco se calcula como el cociente de su masa entre el volumen que ocupa el mortero introducido y compactado en un recipiente. El procedimiento de llenado del recipiente se hace en dos fases, en una primera se llena hasta la mitad y se golpea 10 veces para compactarlo, y en una segunda fase se enrasa el recipiente y se repite la operación.

Figura 33. Balanza empleada en el ensayo de densidad aparente.

5.3.1.10. Contenido del aire del mortero fresco

El contenido de aire del mortero fresco se ha determinado siguiendo las prescripciones recogidas en la norma UNE-EN 1015-7 (AENOR A. E., UNE EN 1015-7:1999, 1999) mediante el método de presión.

Se realiza colocando una muestra de mortero fresco en una vasija a presión y se compacta totalmente, para a continuación verter agua por uno de los grifos hasta que todo el aire contenido en la vasija se evacúe por el grifo opuesto (Figura 34).

Figura 34. Ensayo de aire ocluido del mortero fresco.

Al aplicar aire a presión a la cámara que contiene el mortero, la disminución de esta presión nos indicará en el medidor el contenido de aire presente en la muestra. El ensayo se ha realizado en el laboratorio de materiales de la Escuela Técnica Superior de Edificación de la Universidad Politécnica de Madrid.

5.3.1.11. Periodo de trabajabilidad del mortero fresco

Se ha determinado el periodo de trabajabilidad del mortero fresco de acuerdo a la norma UNE-EN 1015-9 (AENOR A. E., UNE EN-1015-9:2000, 2000). El periodo de trabajabilidad viene determinado por el tiempo que transcurre desde el comienzo del amasado hasta que el mortero adquiere rigidez, medido en minutos.

Figura 35. Instrumental ensayo periodo de trabajabilidad.

Este ensayo se ha realizado en el laboratorio de materiales de la Escuela Técnica Superior de Edificación de la Universidad Politécnica de Madrid, y consiste en verter una muestra de mortero fresco sobre un molde enrasándolo para posteriormente colocarlo sobre una balanza. Se coloca encima una sonda que se baja lentamente haciéndola penetrar en el mortero, hasta que la arandela toque la superficie marcando la resistencia a la penetración (Figura 35).

Se repite la operación en intervalos de media hora, anotando los resultados, hasta que la resistencia a la penetración resulte de $0,5 \text{ N/mm}^2$.

5.3.1.12. Densidad aparente del mortero endurecido

La densidad aparente del mortero endurecido se ha determinado conforme a lo que indica la norma UNE-EN 1015-10 (AENOR A. E., UNE-EN 1015-10:2000, 2000). El ensayo se ha realizado en el laboratorio de materiales de la Escuela Técnica Superior de Edificación de la Universidad Politécnica de Madrid.

Las probetas prismáticas de $160 \times 40 \times 40 \text{ mm}$ curadas tras 28 días, han sido desecadas en estufa hasta masa contante a una temperatura de $70^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ (peso desecado).

Posteriormente han sido saturadas hasta peso constante (peso saturado) y se han sumergido en agua para poder calcular su volumen aparente mediante pesada hidrostática (peso saturado y sumergido) (Figura 36).

La densidad aparente será el resultado de dividir la cantidad de la masa seca de la probeta entre el volumen aparente.

Figura 36. Probetas saturadas y cálculo del peso saturado-sumergido.

5.3.1.13. Densidad real del mortero endurecido

Se procede a determinar la densidad real del mortero endurecido mediante la utilización de un picnómetro, conforme a lo establecido en la norma UNE EN-80103 (AENOR A. E., UNE EN-80103, 2013).

El ensayo se ha realizado en el laboratorio de materiales de la Escuela Técnica Superior de Edificación de la Universidad Politécnica de Madrid.

En primer lugar, se muele finamente la muestra de mortero, y se deposita en un matraz de Le Chatelier evitando que se formen poros. Se obtiene el volumen real de la muestra por diferencia de pesadas, y la densidad real será la relación existente entre el peso de la muestra seca de mortero y su volumen real.

5.3.1.14. Determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad del mortero endurecido

La determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad del mortero endurecido se ha realizado conforme al proceso descrito en la norma UNE-EN 1015-18 (AENOR A. E., 2003). El ensayo se ha realizado en el

laboratorio de materiales de la Escuela Técnica Superior de Edificación de la Universidad Politécnica de Madrid.

Se calcula obteniendo la cantidad de agua absorbida por las probetas ensayadas, en función de la superficie de contacto y el tiempo de inmersión en el agua.

Las probetas prismáticas de 160x40x40 mm curadas tras 28 días, han sido desecadas en estufa hasta masa contante a una temperatura de $70^{\circ}\text{C}\pm 5^{\circ}\text{C}$, posteriormente se impregnan de parafina y se rompen en dos mitades, y luego se sumergen en agua por las caras de rotura, de entre 5mm y 10 mm de profundidad (Figura 37).

Figura 37. Determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad.

Finalmente, se pesan tras 10 min de inmersión obteniéndose M1, y tras 90 min de inmersión obteniéndose M2, y se determina el aumento de masa mediante el coeficiente de inmersión con la siguiente expresión:

$$C = 0,1 \cdot (M2 - M1)$$

Donde:

C Coeficiente de inmersión expresado en $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0,5})$

5.3.1.15. Determinación de la permeabilidad al vapor de agua del mortero endurecido

Se ha procedido a realizar en ensayo de permeabilidad de al vapor de agua del mortero endurecido conforme a las especificaciones descritas en la norma UNE-EN 1015-19 (AENOR A. E., UNE-EN 1015-19, 1999).

El ensayo se ha realizado en el laboratorio de materiales de la Escuela Técnica Superior de Edificación de la Universidad Politécnica de Madrid.

Se toma una muestra de mortero fresco y se elaboran probetas circulares, de diámetro ligeramente mayor al recipiente de ensayo. Tras su curación se colocan sobre el soporte, sellando los bordes perimetrales. Para controlar la presión de vapor de agua, el recipiente contiene una disolución salina de nitrato de potasio que hace que la humedad relativa sea del 93,2% (Figura 38). La diferencia de humedad relativa de las dos caras de la probeta hace que la evaporación del agua del recipiente se vaya evaporando progresivamente, para medirlo se pesan los recipientes a intervalos semanales, durante un mes.

La permeabilidad al vapor de agua del mortero resultará ser la cantidad de agua (kg) que pasa por unidad de superficie (m²), de la probeta de espesor unidad (m), por unidad de tiempo (s), cuándo existe entre sus paredes una diferencia de presión de una unidad (Pa), y se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\Lambda = [1 / A \times \Delta_p (\Delta G / \Delta t) - R_a] \times e$$

Donde:

Λ Permeabilidad al vapor de agua (kg/m*s*Pa)

A Área de la embocadura del recinto del ensayo en m²

Δ_p Diferencia de presión del vapor de agua entre el ambiente y la disolución salina, en Pa

$\Delta G / \Delta t$ Flujo de vapor de agua en kg/s

R_a Resistencia a la difusión del vapor de agua de la lámina de aire que existe entre la probeta y la disolución salina, en Pa.m².s/kg.10mm de la lámina de aire

Figura 38. Probetas confeccionadas y nitrato de potasio empleado.

5.3.2. Ensayos químicos

Las propiedades químicas de los materiales de construcción se suelen considerar su composición química y, también, su composición mineralógica. Pero además como propiedades químicas, se consideran las propias resistencias de los materiales frente a la acción de medios agresivos y sustancias que reaccionan químicamente con los materiales (Laffarga Osteret & Olivares Santiago, 1995).

5.3.2.1. *Termogravimetría (TGA-DSC) y determinación de la humedad de las fibras y de las materias primas*

El análisis termogravimétrico es una técnica analítica que permite determinar la composición de los materiales y su grado de estabilidad térmica. El ensayo se realiza programando en el instrumento un aumento de la temperatura (desde temperatura ambiente hasta 1500 °C) controlada de una muestra en un periodo definido, y en una atmósfera especificada. Los resultados se expresan de manera gráfica mediante termogramas.

El ensayo se ha realizado en el laboratorio de química de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Diseño Industrial de la Universidad Politécnica de Madrid.

El equipo utilizado es una termobalanza TA INSTRUMENTS SDT Q600 que realiza simultáneamente un Análisis Termogravimétrico TGA y una medida diferencial de calor DSC (Figura 39).

Los valores establecidos para el análisis han sido:

- Atmósfera: Aire
- Rampa de calentamiento: 50°C - 1300°C
- Velocidad: 10°C/min
- Cápsulas: Alúmina (Al_2O_3)

Figura 39. Ensayo de Termogravimetría. TDA-DSC.

5.3.2.2. Difracción de rayos X (DRX)

Este ensayo se ha realizado con el difractómetro de Siemens D5000 mediante un monocromador de grafito, los patrones de difracción han sido medidos con la radiación Cu-Ka ($\lambda=1.540598 \text{ \AA}$). Se han identificado mediante difracción de rayos X las fases cristalinas existentes en la muestra de cemento Cem II/B-L 32,5 N y en las muestras de los tres tipos de residuos de fibras empleados (Figura 40).

El ensayo se ha llevado a cabo en el laboratorio de química de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Diseño Industrial de la Universidad Politécnica de Madrid.

Los resultados han sido analizados mediante el software EVA suministrado por Bruker.

Figura 40. Equipo de Difracción de rayos X y preparación de muestras.

5.3.2.3. Análisis químico. Fluorescencia de rayos X (FRX)

Se ha realizado el ensayo de fluorescencia de rayos X a las muestras de cemento, áridos y los tres tipos de residuos de lanas minerales empleados en la investigación, utilizando un equipo cuyo trayecto del haz de excitación directa posee hasta 50 vatios de potencia en el tubo de rayos X.

Este instrumento utilizado para medir y monitorizar las muestras ha sido el aparato S2 PUMA de la empresa Bruker (Figura 41).

El ensayo se ha realizado en el laboratorio de química de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Diseño Industrial de la Universidad Politécnica de Madrid.

Figura 41. Ensayo de Fluorescencia de rayos X.

5.3.3. Ensayos mecánicos

En general, las propiedades mecánicas de los materiales se entienden como la resistencia que el material opone a los esfuerzos mecánicos. Para el estudio del nuevo compuesto se realizaron los siguientes ensayos mecánicos: determinación de la resistencia a flexión y a compresión, determinación del módulo secante de elasticidad en compresión, energía de fractura, resistencia a la adhesión y el ensayo de dureza Shore D.

5.3.3.1. *Determinación de la resistencia a flexión y a compresión del mortero endurecido*

Se ha determinado la resistencia a flexión y compresión de acuerdo con las especificaciones exigidas por la norma UNE-EN 1015-11 (AENOR A. E., UNE EN1015-11:2000, 2000). El ensayo se ha llevado a cabo en el laboratorio de materiales de la Escuela Técnica Superior de Edificación de la Universidad Politécnica de Madrid.

Se realiza con tres probetas prismáticas de dimensiones 40x40x160 mm por cada amasada realizada. Los moldes se rellenan en dos tongadas, compactando cada una de ellas en una compactadora automática modelo CIB 801 de Iberest, con 25 golpes (Figura 42).

Figura 42. Llenado de probetas sobre compactadora mecánica.

Posteriormente se enrasan para retirar el mortero sobrante y se traslada el molde a una cámara climática de curado, tras 24 horas se procederá al desmoldado de las mismas y se volverán a introducir en la cámara (Figura 43), donde permanecerán un total de 28 días a una temperatura de $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ y con una humedad relativa del $95\% \pm 5\%$.

Figura 43. Curado de probetas en cámara húmeda.

Para determinar la resistencia a flexión de los morteros analizados se coloca cada una de las probetas sobre una máquina de la empresa Iberest (Figura 44), y se le aplica una carga a velocidad uniforme hasta la rotura. Las probetas se apoyan sobre dos rodillos separados $100\text{ mm} \pm 0,5\text{ mm}$ y bajo un tercero apoyado en el centro del vano, por lo que la rotura se originará en el punto medio de la probeta.

La resistencia a flexión de las muestras se calcula mediante la siguiente expresión:

$$R_f = 0,0034 \times P$$

Donde:

R_f Resistencia a flexión en N/mm^2

P Carga máxima de rotura en N

Figura 44. Maquinaria utilizada para ensayos a flexión y compresión.

La resistencia a compresión de los morteros se determina sobre las mitades rotas de las probetas ensayadas a flexión, aplicándoles una carga progresiva constante sobre dos caras opuestas de la probeta hasta la rotura. Las probetas se colocan entre dos platos de $(40 \times 40) \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$, 10 mm de espesor. El eje de rotación del plato inferior está centrado sobre la superficie de la probeta ensayada.

La resistencia a compresión de las muestras se calcula mediante la siguiente expresión:

$$f_c = P/S$$

Donde:

S Superficie de aplicación de la carga en mm^2

P Carga máxima de rotura en N

5.3.3.2. Determinación del módulo de Young

Se ha determinado el Módulo de Young conforme al método B de ensayo especificado en la norma UNE EN 12390-13 (AENOR A. E., UNE EN 12390-13:2013, 2013) "Determinación del módulo secante de elasticidad en compresión".

El método de ensayo permite determinar el módulo secante de elasticidad estabilizado medido tras tres ciclos de carga. El módulo secante describe que

el valor del módulo de Young es igual al valor de la pendiente de una cuerda trazada entre el origen y un unto arbitrario de la curva esfuerzo-deformación.

El ensayo se ha realizado en los laboratorios de la Faculty of Civil and Environmental Engineering de la Bialystok University of Technology, en Bialystok, Polonia, con maquinaria de la casa CONTROLS.

En primer lugar, se procede a calcular la resistencia a compresión f_c de los morteros a ensayar, mediante la rotura de unas probetas cúbicas confeccionadas, y se obtienen las tensiones nominales máximas y mínimas (σ_a y σ_b). Posteriormente se someten las probetas cilíndricas a tres ciclos de carga (Figura 45). Las comprobaciones de posicionamiento de la probeta y de estabilidad del dispositivo de medida se realizan al final del segundo y del tercer ciclo. El módulo secante de elasticidad estabilizado se calcula en el tercer ciclo.

Figura 45. Ensayo de cálculo del Módulo secante de elasticidad en compresión.

5.3.3.3. Ensayo de comportamiento de fractura

La determinación de la resistencia a la tracción por flexión se determina según el método establecido en la norma UNE EN-14651 +A1:2008 (AENOR A. E., UNE EN-14651+A1:2008, 2008). Este método permite determinar el límite de proporcionalidad (LOP) y un conjunto de valores de la resistencia residual a la tracción por flexión.

La energía de fractura (GF) se define como el área bajo la curva indicada en la norma de carga-deformación por unidad de superficie fraccionada.

Este ensayo se ha llevado a cabo en los laboratorios de la Faculty of Civil and Environmental Engineering de la Bialystok University of Technology, en Bialystok, Polonia.

La maquinaria utilizada para la realización de ensayo es el aparato Zwick/Roell Z250 de la empresa CONTROLS (Figura 46). La aplicación simultánea de dos extensómetros del instrumento para medir el cambio de longitud y anchura de la muestra facilita el registro del cambio en la deformación y el alargamiento real durante la prueba, lo que es necesario para determinar entre otras cosas: la curva de refuerzo o la relación de anisotropía plástica. El ensayo nos arroja los resultados de: desplazamiento del borde de la fisura (COMD), flecha, límite de proporcionalidad (LOP) y la resistencia residual a la tracción por flexión (Anexo 2).

Para la realización del ensayo se fabrican probetas de 100x100x400 mm curadas en agua a una temperatura de (20 ± 2) °C durante 28 días, realizándoles el día antes de la prueba una muesca inicial por sierra de 30 mm de longitud y 3 mm de ancho (Figura 46). Cada ensayo se ha compuesto de 4 repeticiones.

Para medir los valores del COMD en el centro de la grieta de la probeta se coloca un transductor de desplazamiento en el centro de la muesca, y se realiza el ensayo a flexión. El ensayo finaliza cuándo el valor del COMD es superior o igual a 4 mm.

Figura 46. Preparación de probetas y maquinaria del ensayo de comportamiento de fractura.

5.3.3.4. Determinación de la resistencia a la adhesión

Se determina la resistencia a compresión entre un mortero y un soporte según las prescripciones técnicas descritas en la norma UNE-EN 1015-2 (AENOR A. E., UNE-EN 1015-2:2012, 2012). Este ensayo se realiza en el laboratorio de materiales de la Escuela Técnica Superior de Edificación de la Universidad Politécnica de Madrid.

Se realiza extendiendo sobre rasillones cerámicos, previamente humedecidos, amasadas de los morteros confeccionados de 10 ± 1 mm de espesor. Producido el fraguado inicial del mortero, se aíslan probetas del mismo ejerciendo presión mediante unos anillos troncocónicos, obteniendo probetas de 50 mm de diámetro y 10 mm de altura (Figura 47).

Se procede al curado de las probetas de mortero en cámara húmeda durante 28 días, y posteriormente se fijan las pastillas de acero inoxidable a las probetas mediante resina epoxi y se mantienen 24 horas. A continuación, se fijan los discos al equipo de tracción directa, aplicando una carga de tracción perpendicular a una velocidad constante hasta la rotura.

La resistencia a la adhesión del mortero se obtiene de la siguiente expresión:

$$f_u = F_u / A$$

Donde:

f_u Resistencia a la adhesión en N/mm²

F_u Carga de rotura en N

A Área de la superficie de ensayo de la probeta cilíndrica en mm²

Figura 47. Rasillones con mortero para ensayo adhesión.

5.3.3.5. Ensayo de dureza Shore D

La dureza superficial se determina según la norma UNE-EN 13279-2 (AENOR A. E., UNE-EN 13279-2, 2006) midiéndose la huella dejada por una fuerza determinada sobre la superficie de la probeta ensayada. Se utiliza como dispositivo un durómetro (Figura 48) con el que se presionan las 2 caras planas y lisas de la probeta prismática, realizando 5 valores aleatorios en cada una de las dos caras. Este ensayo se realiza en el laboratorio de materiales de la Escuela Técnica Superior de Edificación de la Universidad Politécnica de Madrid.

Figura 48. Durómetro Shore D.

5.3.4. Ensayos de durabilidad

La durabilidad es la resistencia del mortero al ataque de un conjunto de agentes propios o externos, que pueden alterar sus propiedades físicas a lo largo del tiempo.

Se han realizado los ensayos de resistencia a la heladicidad y a la cristalización de sales, adaptando para morteros lo establecido en las normas que especifican estos ensayos para piedra natural.

5.3.4.1. Ensayo de heladicidad

Se ha determinado el comportamiento de los morteros frente a las heladas siguiendo las indicaciones de la norma UNE-EN 12371:2011 (AENOR A. E., UNE-EN 12371:2011, 2011) “Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la resistencia a la heladicidad” adaptando el ensayo para realizarlo en morteros.

El ensayo se ha realizado en el laboratorio de materiales de la Escuela Técnica Superior de Edificación de la Universidad Politécnica de Madrid.

Se fabrican probetas prismáticas de 160x40x40 mm y se las somete a 25 ciclos de hielo y deshielo, primeramente, se introducen en cámara de congelación (Figura 49) a una temperatura entre -8°C y -12°C , y posteriormente descongelándolas en agua a una temperatura entre 10°C y 30°C .

Figura 49. Probetas en cámara frigorífica.

Para estudiar el comportamiento frente a la heladicidad se examinan todas las caras y aristas de las probetas, y se evalúa su estado conforme a lo especificado en la norma. Así mismo se ha comprobado la pérdida de su resistencia a flexión comparándolas con las mismas probetas sin ensayar.

5.3.4.2. Ensayo de cristalización de sales

El ensayo se realiza en el laboratorio de materiales de la Escuela Técnica Superior de Edificación de la Universidad Politécnica de Madrid, conforme a las especificaciones establecidas en la norma UNE-EN 12370 (AENOR A. E., 12370, 1999) “Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la resistencia a la cristalización de las sales”, adaptando el ensayo para realizarlo en morteros.

Se fabrican probetas prismáticas de 40x40x40 mm y tras secarlas en estufa se introducen en una solución de sulfato sódico decahidratado al 14% durante 2 horas a una temperatura de $(20 \pm 5)^{\circ}\text{C}$ (Figura 50). A continuación, se extraen de la disolución y se secan en estufa a una temperatura de $(105 \pm 5)^{\circ}\text{C}$ durante 16 horas. Posteriormente se dejan enfriar las probetas y se repite el ciclo de introducción en la solución y secado 15 veces.

La resistencia a la cristalización de sales solubles viene dada por la variación de masa de la probeta, tras completar los ciclos realizados en el ensayo, expresado en tanto por ciento.

$$\Delta M = [M_f - M_d / M_d] \times 100$$

Donde:

ΔM Variación de masa en %

M_d Masa inicial de la probeta (g)

M_f Masa final de la probeta (g)

Figura 50. Probetas en disolución salina.

5.3.5. Análisis térmico

La transmisión de calor por conducción se produce cuando la energía calorífica se transmite por contacto de molécula a molécula, sin desplazamiento de éstas, y se basa en el concepto de flujo térmico o calorífico Φ . Este flujo es directamente proporcional al coeficiente de conductividad térmica (λ) del material atravesado, por lo tanto, cuándo un material tiene un λ muy elevado decimos que es un buen conductor del calor, mientras que si tiene un λ muy bajo es un buen aislante o mal conductor.

Se determina el coeficiente de conductividad térmica (Anexo 3) de los morteros aditivados con residuos de fibras mediante la utilización de un Analizador de Conductividad Térmica TCi de la casa C-TERM Technologies, con un rango de capacidades de prueba (0.0 W/m.K a 220 W/m.K) en un amplio rango de temperaturas (-50°C a 200°C) según el material a ensayar.

El instrumento utiliza un sensor de reflectancia de calor de un solo lado, interfacial, que aplica una fuente de calor constante y momentánea a la muestra, permitiendo medir tanto su conductividad térmica como su difusividad térmica (Figura 51).

El procedimiento es aplicando una corriente conocida al elemento calefactor del sensor proporcionándole calor, esto da como resultado un incremento en la temperatura de la interfase entre el sensor y la muestra (menos de 2°C), y este incremento de temperatura induce un cambio en la caída del voltaje del elemento sensor.

Se obtienen con ello las propiedades termo-físicas del material, puesto que son inversamente proporcionales al grado de incremento en el voltaje del sensor.

Tanto las propiedades térmicas de los materiales y productos para la edificación, como los procedimientos para la determinación de los valores térmicos declarados y de diseño vienen especificados en la norma UNE EN-10456:2012 (AENOR A. E., UNE EN-10456, 2012).

Este ensayo se ha realizado en la Escuela Técnica Superior de Edificación de la Universidad Politécnica de Madrid.

Figura 51. Ensayo para el cálculo de la conductividad térmica

5.3.6. Resistencia al fuego

Se ha determinado el comportamiento al fuego de los morteros confeccionados en las instalaciones del Servicio de Prevención y Extinción de incendios de la Comunidad de Madrid, según las indicaciones descritas en las normas UNE-EN 1363-1: 2012, UNE-EN 1363-2: 2000 y UNE-EN 1365-4: 2000. Se fabrican probetas prismáticas de 40x40x160 mm y tras 28 días se ensaya su resistencia al fuego directo. El ensayo se llevó a cabo de acuerdo con el Norma ISO R-834 que considera un potencial calorífico de 40 kg de madera por metro cuadrado (kg/m^2), equivalente a la media valor del potencial calorífico en la formación de incendios. Para realizar el ensayo las probetas se colocaron horizontalmente apoyadas sobre una parrilla

de acero de 1m² de superficie, dejando todos los lados en contacto directo con el fuego (Figura 52). Se realizó el incendio rociando la madera de pino con gasolina para provocar el inicio de la combustión. La prueba duró 1 hora, midiendo la temperatura en la superficie de las muestras cada 5 minutos (Anexo 5), utilizando un termómetro infrarrojo modelo compacto " Testo 845 ". Tras una hora de exposición al fuego, las muestras se dejaron enfriar lentamente durante 24 horas.

Figura 52. Ensayo de resistencia al fuego.

Posteriormente una vez enfriadas las probetas fueron sometidas nuevamente a los ensayos de resistencia a flexión, resistencia a compresión, dureza superficial Shore D y conductividad térmica, para comparar las pérdidas de resistencias sufridas tras el incendio.

TRABAJOS CITADOS

- AENOR, A. E. (1999). UNE EN 1015-6:1999. Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 6: Determinación de la densidad aparente del mortero fresco. España.
- AENOR, A. E. (1999). UNE EN 1015-7:1999. Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 7: Determinación del contenido en aire en el mortero fresco. España.
- AENOR, A. E. (1999). UNE EN 1015-2:2012. Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 2: Toma de muestra total de morteros y preparación de los morteros para ensayo. España.
- AENOR, A. E. (1999). UNE EN 12370. Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la resistencia a la cristalización de las sales. España
- AENOR, A. E. (2000). UNE EN 1015-3:2000. Métodos de ensayo para morteros de albañilería. Parte 3: Determinación de la consistencia del mortero fresco (por la mesa de sacudidas). España.
- AENOR, A. E. (2000). UNE EN1015-11:2000. Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 11: Determinación de la resistencia a

- flexión y a compresión del mortero endurecido. España.
- AENOR, A. E. (2000). UNE EN-1015-9:2000. Métodos de ensayo de los morteros para albañilería: Parte 9: Determinación del periodo de trabajabilidad y del tiempo abierto del mortero fresco. España.
- AENOR, A. E. (2000). UNE EN 1015-10:2000. Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 10: Determinación de la densidad aparente en seco del mortero endurecido. España.
- AENOR, A. E. (2000). UNE EN 1365-4:2000. Ensayos de resistencia al fuego de los elementos portantes. Parte 4: Pilares. España.
- AENOR, A. E. (2003). UNE EN 1015-18:2003 . Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 18: Determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad del mortero endurecido. España.
- AENOR, A. E. (2003). UNE EN 1015-19:1999 . Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 19: Determinación de la permeabilidad al vapor de agua de los morteros endurecidos de revoco y enlucido. España.
- AENOR, A. E. (2008). UNE EN 146511:2008. Estabilidad de los áridos y fragmentos de roca frente a la acción de los ciclos de humedad-sequedad. España.
- AENOR, A. E. (2011). UNE EN 197-1:2011. Cemento. Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes. España.
- AENOR, A. E. (2011). UNE EN 12371:2011. Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la resistencia a la heladicidad. España.
- AENOR, A. E. (2012). UNE EN 933-1:2012. Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 1: Determinación de la granulometría de las partículas. Método del tamizado. España.
- AENOR, A. E. (2012). UNE EN 10456:2012. Materiales y productos para la edificación. Propiedades higrotérmicas. Valores tabulados de diseño y procedimientos para la determinación de los valores térmicos declarados y de diseño. (ISO 10456:2007). España.
- AENOR, A. E. (2013). UNE EN 12390:2013. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 1: Forma, dimensiones y otras características de las probetas y moldes. España.
- AENOR, A. E. (2014). UNE EN 13279-2:2014. Yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción. Parte 2: Métodos de ensayo. España.
- AENOR, A. E. (2015). UNE EN 1363-1. Ensayos de resistencia al fuego. Parte 1: Requisitos generales. España
- AENOR, A. E. (2016). UNE EN 196-1. Métodos de ensayo de cementos. Parte 10: Determinación del contenido de cromo (VI) soluble en agua en cementos. España
- Sáiz Martínez, P. (2015). Utilización de arenas procedentes de Residuos de Construcción y Demolición, RCD, en la fabricación de morteros de albañilería (Doctoral dissertation, Edificacion).
- San Antonio González, A. D. (2017). Caracterización de compuestos eco-eficientes de yeso aligerado con residuo de poliestireno extruido (XPS) (Doctoral dissertation, Edificacion).

CAPÍTULO 6. RESULTADOS OBTENIDOS Y DISCUSIÓN

En el presente capítulo se aportan e interpretan de manera estructurada los resultados obtenidos en las seis fases que engloban la presente investigación.

Se pretende obtener una caracterización completa tanto de las materias primas como de los morteros confeccionados para comprobar la viabilidad de su utilización.

6.1. FASE 1: CARACTERIZACIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS

En esta fase se han caracterizado todos los materiales utilizados para la elaboración de los morteros de cemento reforzados con residuos de fibras, con la finalidad de tener un mejor conocimiento sobre ellos y sobre su influencia en los morteros analizados.

6.1.1. Densidad aparente

En la Tabla 18 se pueden ver los resultados del ensayo de densidad aparente o de empaquetamiento de los residuos de fibras, del cemento y del árido, calculada mediante el método descrito en el apartado 5.2.1.1.

	Volumen (cm ³)	Masa (g)	Densidad (g/cm ³)	Valor medio densidad (g/cm ³)	Desviación estándar
CEM II/B-L 32,5N	49,00	51,84	1,06		
	49,00	48,86	1,00	1,01	0,05
	49,00	46,97	0,96		
Áridos arena de río 0/4	50,00	81,36	1,63		
	50,00	80,35	1,61	1,61	0,02
	50,00	79,35	1,59		
Residuo lana de roca	50,00	0,42	0,01		
	50,00	0,34	0,01	0,01	0,00
	50,00	0,36	0,01		
Residuo lana de vidrio	50,00	3,30	0,07		
	50,00	3,10	0,06	0,06	0,01
	50,00	3,00	0,06		
Residuo mezcla fibras	50,00	1,20	0,02		
	50,00	1,10	0,02	0,02	0,01
	50,00	1,50	0,03		

Tabla 18. Resultados del ensayo de densidad aparente.

Se comprueba que la densidad aparente del cemento empleado CEM II/B-L 32,5N es de 1 g/cm³ tal y como especifica el fabricante. Por otro lado, la densidad aparente de la arena de río empleada es de 1,61 g/cm³ lo cual es un coherente valor, ya que las arenas lavadas tienen una densidad que oscila entre 1,55 y 1,65 g/cm³.

La densidad aparente de las fibras es extremadamente baja debido a su naturaleza de lana, concretamente los residuos de lanas minerales transformados de fibra de vidrio tienen una densidad aparente de 0,06 g/cm³, y en cambio los de lana de roca tienen 0,01 g/cm³, mientras que la mezcla de fibras está un coherente valor intermedio de densidad aparente, entre las muestras lana de roca (RW) y fibra de vidrio (FG), de 0,03 g/cm³.

Es por esto por lo que, en la presente investigación al sustituir parte de la arena por residuos de fibras medido en volumen, con los mismos porcentajes de adición los morteros con residuo de fibra de vidrio al ser seis veces más densos necesitan tener mayor cantidad de masa para sustituir la misma parte en volumen. Por tanto, para iguales porcentajes de sustitución en volumen los

morteros con residuos de fibras de vidrio tienen más masa de fibras, que los morteros que incorporan lana de roca, permaneciendo en un valor medio los que incorporan mezcla de residuos de fibras.

6.1.2. Densidad real

En la Tabla 19 pueden observarse los resultados de la densidad real de los residuos de lanas minerales, el cemento y la arena, obtenidos mediante el método de la picnometría de helio descrito en el apartado 5.2.1.2.

												Media	Desviación Estándar
	M			Vs	ps		Vs	ps		Vs	ps		
Cemento CEM II/B-L 32,5N	118,93	P2	18,29			18,33			18,32				
		P3	11,55	24,49	4,86	11,58	24,35	4,88	11,58	24,15	4,92	4,89	0,03
Áridos Arena de río 0/4	77,47	P2	18,22			18,21			18,19				
		P3	10,83	43,52	1,78	10,82	43,62	1,78	10,81	43,58	1,78	1,78	0,00
Residuo lana de roca	0,75	P2	19,48			18,32			18,59				
		P3	12,92	4,88	0,15	12,15	4,90	0,15	12,32	5,23	0,14	0,15	0,01
Residuo lana de vidrio	7,00	P2	18,14			18,13			18,14				
		P3	11,98	6,67	1,05	11,98	6,60	1,06	11,98	6,63	1,06	1,06	0,01
Residuo mezcla fibras	2,37	P2	18,78			18,50			18,45				
		P3	12,43	5,78	0,41	12,25	5,79	0,41	12,20	6,10	0,39	0,40	0,01

Tabla 19.Resultados del ensayo de densidad real de los materiales utilizados.

Nota: M: masa de la muestra (g); Vs: volumen de la muestra; P2: lectura tras presurizar la celda de la muestra; P3: lectura de la presión después de incluir el volumen Va; ps: densidad real.

Se comprueba que tanto en cemento como los áridos tienen las densidades reales esperadas. Se observa que los residuos de fibra de vidrio tienen una densidad real seis veces mayor que los residuos de lana de roca, por lo que para el mismo porcentaje de sustitución en volumen se tendrá que incorporar en mayor masa a los morteros.

6.1.3. Granulometría de los áridos de río y porcentaje de finos

Se muestra en la Figura 53 el análisis granulométrico según la norma UNE-EN 993-1 de la arena de río empleada en los ensayos de la presente investigación. Este ensayo se ha realizado sobre muestras de árido de tamaño 0,063/4 mm mientras que el contenido de finos se ha realizado sobre la fracción 0/4 mm de las mismas.

Figura 53. Línea granulométrica de las arenas de río empleadas.

Se comprueba que cumpliendo con los requisitos de la norma UNE-EN-13139, todas partículas son inferiores a 8 mm, y las partículas superiores a 5,6 mm no superan el 5% fijado como límite.

Se observa en la Figura 53 que la línea granulométrica es continua y se encuentra dentro de los límites establecidos en la norma tomada como referencia NBE-FL 90. Dicha distribución continua indica que hay una distribución uniforme en los distintos tamaños, lo que proporciona una mayor interacción entre las partículas y por lo tanto una mejora de las propiedades de trabajabilidad, compacidad y resistencia, sobre las que los áridos tienen una influencia directa.

El porcentaje de finos que pasan por el tamiz de luz de malla 0,063 mm es del 2,3% lo que supone 1,275 gramos de un total de la masa seca de 400 gramos y de la masa seca tras lavado de 394,9 gramos, no superando el 8% establecido como máximo para morteros de albañilería.

6.1.4. Granulometría de los áridos reciclados y porcentaje de finos

Se muestra en la Figura 54 el análisis granulométrico según la norma UNE-EN 993-1 del árido reciclado mixto en los ensayos de la fase 3 de este estudio.

Este ensayo se ha realizado sobre muestras de árido reciclado de tamaño 0,063/4 mm mientras que el contenido de finos se ha realizado sobre la fracción 0/4 mm de las mismas.

Figura 54. Curva granulométrica de las arenas recicladas empleadas.

Se comprueba que cumpliendo con los requisitos de la norma UNE-EN 13139, todas partículas son inferiores a 8 mm, y las partículas superiores a 5,6 mm no superan el 5% fijado como límite.

Se observa en la Figura 54 que la línea granulométrica es continua y se encuentra dentro de los límites establecidos en la norma tomada como referencia NBE-FL 90. Dicha distribución continua indica que hay una distribución uniforme en los distintos tamaños, lo que proporciona una mayor interacción entre las partículas y por lo tanto una mejora de las propiedades de trabajabilidad, compacidad y resistencia, sobre las que los áridos tienen una influencia directa. El porcentaje de finos que pasan por el tamiz 0,063 es del 4,13% lo que supone 4,4 gr de un total de la masa seca de 600 gr, no superando el 8% establecido como máximo para morteros de albañilería, aunque casi duplica el valor del árido normalizado utilizado en el resto de la presente investigación (2,3%).

6.1.5. Análisis químico (FRX)

Se ha realizado el ensayo de fluorescencia de rayos X a las muestras de cemento, áridos y a los tres tipos de residuos de lanas minerales empleados en la investigación. En la Tabla 20 presenta la caracterización química del cemento empleado en la investigación. El cemento analizado presenta los óxidos de Si, Ca, Al y Fe como componentes fundamentales, según las cuatro fases principales contenidas en el clinker de cemento portland: alita (C3S), belita (C2S), aluminato (C3A) y aluminoferrita (C4AF) siendo el más abundante fases alita (50-70%) y belita (15-30%) (Lin et al., 2013; Ramachandran et al., 2002). Se observa que el contenido en CaO en la muestra es muy elevado, esto es debido a que se trata de un cemento tipo II que contiene caliza (CaCO_3) como adición. El cemento Portland ordinario se produce moliendo el Clinker y añadiendo una cantidad permitida de yeso, lo cual también se refleja en la presencia de azufre en una proporción baja en el análisis químico.

	CEM II 32,5 B-L	Arena	Lana de roca	Fibra de vidrio	Mezcla de fibras
CaO	72,80	-	22,60	20,00	20,40
Fe ₂ O ₃	8,65	-	1,36	1,44	1,92
SO ₃	3,76	-	5,73	1,12	2,51
SiO ₂	10,00	85,89	60,10	66,20	64,30
Al ₂ O ₃	2,05	10,08	0,76	3,48	1,42
K ₂ O	0,67	3,05	0,58	2,82	1,01
TiO ₂	0,64	-	0,20	0,08	0,24
Ba	0,53	-	1,07	-	0,54
MgO	0,39	-	1,39	1,76	1,08
Sr	0,22	-	0,07	0,21	0,10
Mn	0,18	-	0,18	-	0,37
Zn	0,05	-	0,19	0,02	0,10
Cu	0,35	-	-	-	-
Rb	0,02	-	-	0,05	0,02
Na ₂ O	-	-	5,29	2,76	5,72
Cl	-	-	0,28	-	0,19
Cr	-	-	0,52	-	0,13

Tabla 20. Composición química de las fibras, la arena y el cemento empleados.
Nota: Resultados para Concentración [%] superior al 0,01%.

Así mismo en la Tabla 20 también puede observarse la composición química de los residuos de lanas minerales, siendo el óxido de silicio (SiO_2) el componente más abundante, resultando similares a los resultados de la

bibliografía tanto para fibras comerciales o sintetizadas en el laboratorio, como para los residuos de fibras (Cáceres et al., 1996; Lin et al., 2013; Väntsi & Kärki 2014).

El componente principal, tanto de los residuos de lana de roca como de los de fibra de vidrio, es SiO_2 (alrededor del 70%) seguido de CaO como el segundo componente (alrededor del 20%). También los óxidos de Na, Al, K y Fe están presentes en cantidades más bajas.

La muestra de mezcla de residuos de fibras presenta una composición intermedia entre la lana de roca y la lana de fibra de vidrio.

Puede concluirse que la composición de las fibras minerales es similar a la de los materiales cementantes complementarios (SCM) como la ceniza volante y el humo de sílice compuestos fundamentalmente también por SiO_2 , por lo que puede resultar un sustituto adecuado de los agregados gruesos y finos en un compuesto a base de cemento (Lin et al., 2013).

6.1.6. Difracción de Rayos X (DRX)

Se han identificado mediante difracción de rayos X las fases cristalinas existentes en la muestra de cemento Cem II/B-L 32,5 N y en las muestras de los tres tipos de residuos de fibras empleados.

En la Figura 55 se muestra el difractograma de rayos X del cemento, en él se identifican las fases de carbonato de calcio, correspondiente al pico más intenso, y silicatos de calcio como alita (NaCl) y belita (Ca_2Si), así como el Ca(OH)_2 formado durante el almacenamiento del cemento (Carsana et al., 2014; Chen et al., 2007).

Figura 55. DRX del cemento CEM II/B-L 32,5N.

Se muestra el patrón de XRD de las fibras en la Figura 56, se observa que no muestra ninguna reflexión debido a estructuras cristalinas, ya que es totalmente amorfo.

Figura 56. DRX de los residuos de fibras: lana de roca (RW), fibra de vidrio (FG) y mezcla de fibras (MIX).

6.1.7. Termogravimetría (TG)

En la Figura 57 y la Figura 58 se muestran mediante termogramas los resultados del análisis termogravimétrico, tanto del cemento como de los tres tipos de residuos de fibras minerales empleados en el presente estudio. Se pretende determinar la composición de estos materiales y su grado de estabilidad térmica.

Respecto al cemento, en la Figura 57 se pone de manifiesto un elevado contenido en calcita, siendo la descomposición térmica del CaCO_3 para obtener CaO el principal evento térmico observado, esto corresponde a una pérdida de masa de aproximadamente un 8%, entre aproximadamente 500 y 800 °C, y de carácter endotérmico. Esta pérdida de masa se correspondería con un contenido de caliza en el cemento de un 18%.

Se aprecian además en el análisis dos pequeñas pérdidas de masa asociadas a temperaturas inferiores a 500 °C; la primera completada a baja temperatura, inferior a 150 °C, evento endotérmico, con una pérdida de masa en torno a un 0,5%, y máximo a 110 °C aproximadamente, que podría asociarse a la deshidratación del yeso dihidrato o hemihidrato. La segunda pérdida, en torno a un 0,2%, evento endotérmico entre 400 °C y 500 °C, y máximo a 440 °C correspondería a la deshidratación de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, presente en una cantidad aproximada de 0,9% en el cemento.

Los eventos térmicos observados se relacionan por tanto fundamentalmente con las adiciones del cemento, dado que los componentes del Clinker de cemento son estables a temperaturas inferiores a 1000 °C ya que el proceso de clinkerización se desarrolla a temperaturas superiores (Ramachandran et al., 2002).

Figura 57. Análisis térmico del cemento.

En la Figura 58 se muestran, de arriba abajo, el análisis térmico de las muestras de los residuos de lana de roca (RW), fibra de vidrio (FG) y mezcla de fibras (MIX), siendo el comportamiento térmico de las tres muestras de fibras utilizadas en el trabajo muy similares. Se observa que la evolución del peso con la temperatura bajo el flujo de aire presenta una línea con ruido; este comportamiento se atribuye al empaque suelto debido a la baja densidad aparente de las muestras.

Las muestras presentan una amplia pérdida de peso de aproximadamente 5% para RW (20% para FG y 10% para muestras MIX) a temperaturas inferiores a 500 °C, lo que puede asociarse a la descomposición de aditivos orgánicos utilizados en la fabricación de fibras (Cáceres et al., 1996; Jelle, 2011). En el caso de la muestra MIX, el evento muestra tres picos en la curva derivada de peso vs. temperatura indicativos de la combustión de varios compuestos orgánicos, como lo indican los menores efectos exotérmicos en la curva de flujo de calor. Alrededor de 690 °C, se observa en los tres tipos de residuos de fibras que existe un pequeño evento exotérmico que podría asignarse a la

desvitrificación de las fibras vítreas con la formación de fases cristalinas (Cáceres et al., 1996; Siligardi et al., 2017). Alrededor de 1000-1100 °C hay un proceso endotérmico no terminado durante el análisis, que puede atribuirse a la fusión de estos nuevos cristales formados; el efecto va acompañado de una pérdida de peso que podría indicar una descomposición/volatilización parcial de la muestra.

Estos resultados indican que las características físicas y químicas de los residuos de fibras no han sido alteradas en el proceso habitual de almacenamiento en el vertedero, por lo que en este sentido se presentan adecuadas para su uso.

Figura 58. Análisis térmico de los residuos de lana de roca, fibra de vidrio y mezcla de fibras (de arriba abajo respectivamente).

6.1.8. Microscopía electrónica de barrido SEM

Las lanas minerales utilizadas en el presente estudio tienen forma cilíndrica y fibriforme, como lo demuestran las imágenes obtenidas con un microscopio electrónico de barrido (SEM) mostradas en la Figura 59.

Figura 59. Microscopía SEM de las fibras (de arriba abajo: lana de roca, fibra de vidrio, mezcla de fibras).

La caracterización dimensional de las fibras obtenidas en este ensayo se presenta en la Tabla 21, pudiéndose observar que poseen un formato casi de polvo.

Tamaño de fibras		
	Ancho (µm)	Longitud (µm)
RW	8 - 9	500 - 1000
FG	15 - 20	500 - 900
MIX	8 - 20	500 - 1000

Tabla 21. Tamaño de las fibras transformadas.

La muestra transformada del residuo de lana de roca (RW) presenta un ancho de fibras de entre 8 y 9 μm , y sus longitudes están entre los 500 y 1000 μm . En cambio, los residuos de fibra de vidrio (FG) estudiados tienen un grosor de fibras mayor, de entre 15 y 20 μm , y sus longitudes están comprendidas entre los 500 y 900 μm . La muestra de la lana mineral reciclada de mezcla de fibras (MIX) tiene un grosor medio de 8 a 20 μm , y unas longitudes entre 500 y 1000 μm .

6.2. FASE 2: CARACTERIZACIÓN INICIAL DE LOS MORTEROS Y ENSAYOS PREVIOS

En esta fase se han caracterizado inicialmente los morteros de cemento reforzados con los tres tipos de residuos de fibras empleados para todos los porcentajes analizados en la presente investigación.

Así mismo se han analizado estadísticamente los principales ensayos que pueden verificar la idoneidad experimental.

6.2.1. PRIMERA PARTE FASE 2: ENSAYOS CON ANÁLISIS ESTADÍSTICO

A continuación, se muestran los resultados de los ensayos de la primera parte de la fase 2 a los que se les realiza un estudio estadístico mediante un análisis de la varianza.

6.2.1.1. Densidad real

Los resultados de la densidad real de los morteros se muestran en la Figura 60, en ellos se observa que esta densidad se reduce con la incorporación de los tres tipos de residuos de fibras a los morteros y de manera proporcional al porcentaje de adición. Esto puede ser debido a un ligero aumento de la porosidad que se comprueba posteriormente en los ensayos de porosimetría de mercurio y de adsorción desorción de nitrógeno, así como se corrobora igualmente en las fotografías de microscopía en las que se observan mayor cantidad de poros alrededor de las fibras.

Todos los valores se encuentran por debajo de los del mortero de referencia, siendo el compuesto con residuo de fibra de vidrio el que presenta una densidad menor debido al mayor volumen de huecos existente en dicha mezcla.

Figura 60. Densidad real de los compuestos.

Por otro lado, en la Tabla 22 se muestran los P-valores obtenidos del análisis estadístico de la muestra para cada uno de los factores analizados, comprobándose además en la Figura 61 que existe homocedasticidad y observándose en la Figura 62 que la muestra cumple el supuesto de normalidad. Se puede ver que la densidad disminuye según aumenta la cantidad de residuo y según el tipo de fibra, lo que se confirma mediante el análisis de la varianza, ambas con un P-valor de 0,000 por lo tanto menores de 0,05, al 95% de nivel de confianza.

<i>Fuente</i>	<i>Valor-P</i>
EFFECTOS PRINCIPALES	
A:% Adición residuo	0,0000
B:Tipo de residuo	0,0000
INTERACCIONES	
AB	0,0919

Tabla 22. P-valores del análisis estadístico de la muestra para la variable dependiente de densidad.

Figura 61. Comprobación de homogeneidad de las varianzas de cada nivel de densidad.

Figura 62. Gráfico de probabilidad normal para los residuos estadísticos de la variable densidad.

6.2.1.2. Dureza superficial Shore D

En cuanto a la dureza superficial de los morteros confeccionados, (Shore D) observamos en la Figura 63 que en función del tipo de residuo de fibra mineral empleado presentan un comportamiento diferente frente a esta propiedad.

Figura 63. Valores de dureza superficial Shore D en los compuestos.

Los compuestos con residuos de lana de roca aumentan su dureza altamente con el porcentaje de adición del 40% frente a los del 30%, volviendo a disminuir cuándo se alcanza el 50% de adición. Es posible que este comportamiento no lineal se deba a que al tener una menor densidad las fibras de lana de roca que las otras analizadas, presentan una conexión menos homogénea con la matriz produciéndose acumulaciones de fibra en la superficie de la probeta. La dureza superficial de los morteros disminuye en 4,6 puntos al incorporarle los residuos de fibra de vidrio, mientras que los valores para los compuestos con mezcla de residuos de fibras permanecen muy similares con las adiciones del 30%, 40% y 50%. Se observa que los mejores valores se obtienen en las mezclas con el 40% para el residuo de fibras mineral de lana de roca, y los menores para el 50% de adición de residuo de fibra de vidrio.

En la Tabla 23 se muestran los P-valores obtenidos del análisis estadístico de la muestra para cada uno de los factores analizados, comprobándose además en la Figura 64 que existe homocedasticidad y observándose en la Figura 65 que la muestra cumple el supuesto de normalidad.

Se observa que la dureza no disminuye según aumenta la cantidad de residuo para todos los casos por lo que este factor no le afecta de forma estadísticamente significativa. Sin embargo, sí le afecta el tipo de fibra, lo que

se confirma mediante el análisis de la varianza, con un P-valor de 0,0089 al 95% de nivel de confianza para el tipo de residuo, y de 0,4747 al 95% de nivel de confianza para la cantidad de residuo.

<i>Fuente</i>	<i>Valor-P</i>
EFFECTOS PRINCIPALES	
A:% Adición residuo	0,4747
B:Tipo de residuo	0,0089
INTERACCIONES	
AB	0,0529

Tabla 23. P-valores del análisis estadístico de la muestra para la variable dependiente de dureza superficial.

Figura 64. Comprobación de homogeneidad de las varianzas de cada nivel de dureza superficial.

Figura 65. Gráfico de probabilidad normal para los residuos estadísticos de la variable dureza superficial.

6.2.1.3. Resistencia a flexión

En la Figura 66 se presentan los resultados medios obtenidos en los ensayos de resistencia a flexión sobre las probetas confeccionadas.

Figura 66. Valores de resistencia a flexión de los compuestos (MPa).

A partir de los resultados obtenidos en el ensayo se observa que, la resistencia a flexión en general aumenta con respecto a la referencia al añadir los residuos de fibras minerales a la matriz y para los tres tipos empleados, al igual que aseguran otros autores que sucede con el empleo de fibras comerciales (Cebrián, 2011; Melián & Barluenga, 2010; Xiaochun et al., 2017).

Aunque la resistencia a flexión tiene influencia especialmente en la durabilidad de los morteros, la normativa vigente no establece un valor mínimo ni clasifica los morteros en función de este parámetro.

Se observa que tanto para los morteros con residuos de lana de roca, como para los de fibra de vidrio, se produce un descenso de la resistencia a flexión en las series con el 40% del residuo frente a las que contenían el 30% de residuo, produciéndose en los tres casos un aumento de esta resistencia para los compuestos reforzados con el 50% de residuos. Cabe destacar de nuevo la falta de homogeneidad de los compuestos con el 40% de adición de lana de roca, esto puede deberse a que se produce una buena dispersión de las fibras al añadir el 30%, mientras que con el 40% se produce desorden y apelotonamiento de las mismas en la superficie, en cambio con el 50% la gran cantidad de fibras añadidas hace que el compuesto vuelva a ser homogéneo.

Destacan los valores de resistencia a flexotracción obtenidos en las series con el 50% con residuos mixtos de lanas minerales aumentando hasta el 12% (7,33 MPa) con respecto a la referencia, presentando las menores resistencias (6,36 MPa y 6,46 MPa) las series con adiciones del 40% y del 50% respectivamente, con residuo de lana de fibra de vidrio.

En la Tabla 24 se muestran los P-valores obtenidos del análisis estadístico de la muestra para cada uno de los factores analizados, comprobándose además en la Figura 67 que existe homocedasticidad y observándose en la Figura 68 que la muestra cumple el supuesto de normalidad. Los P-valores prueban la significancia estadística de cada uno de los factores, y puesto que ningún valor-P es menor que 0,05, ninguno de los factores ó interacciones tiene un efecto estadísticamente significativo sobre resistencia a flexión con un 95,0% de nivel de confianza.

<i>Fuente</i>	<i>Valor-P</i>
EFFECTOS PRINCIPALES	
A:% Adición residuo	0,5942
B:Tipo de residuo	0,2852
INTERACCIONES	
AB	0,8167

Tabla 24. P-valores del análisis estadístico de la muestra para la variable dependiente de resistencia a flexión.

Gráfico de Residuos para Resistencia a Flexión

Figura 67. Comprobación de homogeneidad de las varianzas de cada nivel de resistencia a flexión.

Figura 68. Gráfico de probabilidad normal para los residuos estadísticos de la variable resistencia a flexión.

6.2.1.4. Resistencia a compresión

Por el contrario de lo que sucede con los valores de tracción y flexión (Mana Halvaei et al., 2014), estos materiales de base cemento obtienen un peor desempeño mecánico cuándo se trata de resistencia a compresión y al ser una propiedad fundamental es objeto de regulación por las diferentes normativas.

Como cabía esperar, la resistencia a compresión disminuye frente a la matriz sin reforzar, como puede observarse en la Figura 69, debido a un aumento de la porosidad del compuesto. Esto coincide con lo analizado por otros autores para el empleo de fibras comerciales tanto de polipropileno (Cebrián, 2011), como metálicas (Kim et al., 2015) o fibras de vidrio (Sánchez & Sánchez, 1991).

Figura 69. Valores de resistencia a compresión de los compuestos (MPa).

Los datos reflejan que de media los valores a compresión de los morteros de cemento con residuos de fibras sufren una disminución, para todos los casos, de más del 13% frente a los morteros sin adición de residuos de fibras.

Los valores obtenidos en el ensayo de resistencia a compresión son inferiores al de referencia, pero en cualquiera de los porcentajes supera en más de 13 MPa lo establecido por norma UNE-EN 998-1 “Especificaciones de los morteros para albañilería” que establece una resistencia a compresión comprendida entre 0,4 N/mm² y 7,5 N/mm², admitiendo valores superiores.

El Código Técnico de la Edificación en su documento básico SE-F establece una resistencia mínima que debe tener el mortero para juntas según la fábrica a ejecutar siendo los más exigentes los valores de 15 N/mm², valor que superan todos los morteros analizados en esta investigación.

Los compuestos con residuos mixtos de lanas minerales presentan valores similares para los tres porcentajes de adición.

Aunque presentan resultados muy similares, se destaca el mejor comportamiento de las probetas con adición de residuos de fibras de lana de roca al 30% (27,00 MPa) y como peor el de los de fibra de vidrio al 50% (21,42 MPa), lo que supone una reducción de esta resistencia respecto a la matriz del

27,6%, valores muy próximos a los de las fibras minerales comerciales actuales.

En la Tabla 25 se muestran los P-valores obtenidos del análisis estadístico de la muestra para cada uno de los factores analizados, comprobándose además en la Figura 70 que existe homocedasticidad y observándose en la Figura 71 que la muestra cumple el supuesto de normalidad. Mediante el análisis de la varianza se comprueba que el P-valor de la cantidad de adición es menor que 0,05, por lo que este factor tiene un efecto estadísticamente significativo sobre la resistencia a compresión con un 95,0% de nivel de confianza. Por el contrario, no hay evidencia de que el tipo de residuo, con un P-valor mayor de 0,05, tenga una influencia estadísticamente significativa sobre resistencia a compresión con un 95,0% de nivel de confianza.

<i>Fuente</i>	<i>Valor-P</i>
EFFECTOS PRINCIPALES	
A:% Adición residuo	0,0428
B:Tipo de residuo	0,1062
INTERACCIONES	
AB	0,7055

Tabla 25. P-valores del análisis estadístico de la muestra para la variable dependiente de resistencia a compresión.

Figura 70. Comprobación de homogeneidad de las varianzas de cada nivel de resistencia a compresión.

Figura 71. Gráfico de probabilidad normal para los residuos estadísticos de la variable resistencia a compresión.

6.2.2. SEGUNDA PARTE FASE 2: RESTO DE ENSAYOS

A continuación, se muestran los resultados del resto de ensayos de la fase 2, de cara a conseguir la completa caracterización inicial de los morteros.

6.2.2.1. Consistencia y densidad aparente del mortero en estado fresco

El ensayo de consistencia determinó la cantidad de agua necesaria para fabricar los morteros con una adecuada trabajabilidad, y se realizó según lo especificado en el apartado 5.2.1.6.

La cantidad de agua empleada para fabricar las distintas amasadas ha sido ajustada para conseguir una consistencia según norma que permita una correcta trabajabilidad, estableciendo una dosificación adecuada de 1:3:0,6 (cemento: arena: agua) para todas las mezclas confeccionadas, y así poder hacerlas comparables.

En la Figura 72 se muestran los resultados de este ensayo. Se puede observar que la incorporación de residuos de fibras en los morteros hace disminuir su consistencia, disminuyendo proporcionalmente a la cantidad de adición.

Los morteros con residuos de fibra de vidrio son los que menores consistencias alcanzan, casi la mitad si se comparan con los valores de la referencia, y siendo la única de las mezclas que resulta tener consistencia seca según la norma UNE EN-1015-6, teniendo el resto consistencia fluida según dicha norma.

Figura 72. Consistencia de los morteros.

Cabe puntualizar, que las fibras de vidrio al tener mayor densidad se incorporan en mayor medida de masa en los compuestos para los mismos porcentajes de sustitución de árido en volumen, lo que ha supuesto una disminución de su consistencia y, como se verá a lo largo del estudio, un empeoramiento de sus propiedades mecánicas con respecto a los otros compuestos.

Así mismo la densidad aparente del mortero en estado fresco de las amasadas elaboradas con fibras es inferior a los valores obtenidos para el mortero de referencia, para todos los porcentajes y tipo de residuo empleado, reduciéndose conforme aumentamos el porcentaje de fibras.

Esto se debe a que la densidad aparente en estado fresco (que permite conocer la cantidad de agua de amasado que se evaporó durante el curado) depende de los materiales que conforman el mortero relacionándose con la cantidad de aire ocluido que presenta la mezcla, por lo que se deduce que las fibras aumentan la cantidad de huecos en el interior del material disminuyendo el valor de la densidad aparente, lo que previsiblemente reducirá también la resistencia mecánica a compresión de las mezclas con fibras con respecto a la referencia.

6.2.2.2. Absorción de agua por capilaridad

La absorción de agua por capilaridad afectará a los morteros expuestos al agua de lluvia y en arranque de cimentaciones, cuánto más permeable sean, existirán más posibilidades de la aparición de humedades por filtración.

Los resultados de los ensayos de absorción de agua por capilaridad de los morteros endurecidos (Figura 73) han demostrado una mayor absorción en los morteros con fibras respecto al de referencia, aumentando ligeramente según aumenta el porcentaje de fibras empleado, destacando que los morteros aditivados con fibra de vidrio son los que producen un mayor aumento de esta característica, hasta 1,5 veces el valor del mortero de referencia. Esto puede deberse a que son los que contienen mayor cantidad de aire ocluido, por lo que tienen una mayor capilaridad.

Figura 73. Resultados de absorción de agua por capilaridad de los morteros.

6.2.2.3. Densidad aparente del mortero en estado endurecido

Se muestran los resultados de la densidad aparente de los morteros en la Figura 74 obtenidos según la metodología expuesta en el apartado 5.2.1.12. Se observa que esta densidad, al igual que la real, se reduce con la incorporación de los tres tipos de residuos de fibras a los morteros, proporcionalmente al porcentaje de adición.

Todos los valores se encuentran por debajo del valor de densidad aparente del mortero de referencia, teniendo todos valores muy similares para cada uno de los porcentajes de adición.

Figura 74. Densidad aparente de los morteros en estado endurecido.

6.2.2.4. Análisis térmico

Se ha estudiado la conductividad térmica de los morteros ya que esta propiedad describe la capacidad de estos para poder transferir el calor por conducción.

En la Figura 75 se muestran los resultados de los coeficientes de conductividad térmica (λ) de los morteros confeccionados con residuos de fibras y del mortero de referencia. Se observa que el coeficiente de conductividad se reduce con la incorporación de fibras, y que según se aumenta el porcentaje de adición mejora el comportamiento térmico del material de manera proporcional.

Esto es debido a que como aseguran otros autores (Gutiérrez-González et al., 2012; Panesar & Shindman, 2012) la incorporación de residuos disminuye la densidad de los morteros, por lo que mejora su coeficiente de conductividad térmica de manera proporcional a la cantidad de residuo empleado (Osseni et al., 2016).

Cabe destacar que los morteros elaborados con residuo de lana de roca son los que mejor comportamiento térmico han presentado en este ensayo.

Figura 75. Resultados del coeficiente de conductividad térmica de los morteros (λ).

Así mismo se ha analizado la efusividad térmica de los morteros que sirve para analizar la capacidad de este material para absorber o restituir un flujo de calor o potencia térmica (Anexo 3).

En la Figura 76 se muestran los resultados de efusividad térmica de los morteros confeccionados con residuos de fibras y del mortero de referencia. Se observa que la efusividad se reduce con la incorporación de fibras, y que según se aumenta el porcentaje de adición mejora también esta propiedad térmica.

Figura 76. Efusividad térmica de los morteros.

6.3. FASE 3: ANÁLISIS DE LA VIABILIDAD DE LA INCORPORACIÓN DE ÁRIDOS RECICLADOS

Se han realizado, a la Serie II, los ensayos de granulometría de los áridos reciclados empleados, densidad del mortero en estado fresco y dureza superficial Shore D, resistencia a flexión y compresión.

6.3.1. Dureza superficial Shore D

En la Figura 77 se ha representado gráficamente los resultados obtenidos del ensayo de dureza superficial Shore D para los morteros con residuos de fibras y árido reciclado.

Como se puede observar las probetas elaboradas con árido reciclado y residuos de lanas minerales presentan una mejor dureza superficial en comparación con el mortero de referencia, excepto para el caso de los morteros con 50% de fibra de vidrio.

Se constata que los valores de la dureza superficial son inferiores con respecto a los morteros elaborados con arena de río, resultado a pesar de ello valores admisibles.

Figura 77. Valores de dureza superficial Shore D de los compuestos con árido reciclado (arriba), de los compuestos con arena de río (abajo).

Se observa que los mejores valores se obtienen en las mezclas con el 40% y el 50% para el residuo de fibras mineral de lana de roca, y los peores para el 50% de adición de residuo de fibra de vidrio, al igual que pasó en los morteros con arena de río, pero con resistencias inferiores con árido reciclado.

6.3.2. Resistencia a flexión

En la Figura 78 se ha representado gráficamente los resultados obtenidos de la resistencia a flexión para los morteros con residuos de fibras y árido reciclado. Aunque la normativa actual no establece un valor mínimo de resistencia a flexión, esta tiene una especial importancia en la durabilidad de los morteros.

La resistencia a flexión mejora de manera significativa con la incorporación de los residuos de fibras minerales para los tres tipos de fibras, al igual de lo que

sucedía en los morteros con arena de río. Se observa que con la incorporación de fibras al 30% mejora la resistencia a flexión de los morteros de manera importante con respecto al de referencia, mientras que al 40% de incorporación se mantienen estables, bajando bruscamente esta resistencia con los morteros aditivados al 50%. Cabe destacar que los morteros con residuos de fibra de lana de roca son los que mejor comportamiento tiene a flexión.

Figura 78. Valores de resistencia a flexión (MPa) de los compuestos con árido reciclado (arriba), y de los compuestos con arena de río (abajo).

Analizando ambos gráficos se percibe que en comparación con los morteros estudiados en la fase 2, los valores de resistencia a flexión para los tres tipos de fibras de los morteros con árido reciclado están por debajo de la mitad respecto a los fabricados con arena de río.

6.3.3. Resistencia a compresión

En la Figura 79 se ha representado gráficamente los resultados obtenidos de la resistencia a compresión para los morteros con residuos de fibras y árido reciclado, así como los de arena de río de la fase II.

Los datos reflejan que, por el contrario de lo que ocurre en los morteros con arena de río, la incorporación de residuos de fibras en los morteros con árido reciclado hace que mejore significativamente la resistencia a compresión de los mismos.

Los valores obtenidos en el ensayo de resistencia a compresión son superiores al de referencia sin fibras, excepto los morteros con el 50% de residuo de fibra de vidrio, y excepto para este porcentaje el resto cumplen lo establecido por norma UNE-EN 998-1 “Especificaciones de los morteros para albañilería” que establece una resistencia a compresión comprendida entre 0,4 N/mm² y 7,5 N/mm², admitiendo valores superiores.

Figura 79. Valores de resistencia a compresión (MPa) de los compuestos con árido reciclado (arriba), y de los compuestos con arena de río (abajo).

El CTE en su documento básico SE-F establece una resistencia mínima que debe tener el mortero para juntas según la fábrica a ejecutar siendo los más exigentes los valores de 15 N/mm², valor que no superan los morteros confeccionados con árido reciclado de esta fase, excepto para el caso de las adiciones de residuo de fibra de vidrio.

Mientras que los morteros reforzados con residuos de fibra de vidrio y residuos mixtos presentan resultados muy similares, se destaca el mejor comportamiento de las probetas con adición de residuos de lana de roca para los tres porcentajes de adición, los que aun así se encuentran en valores de

compresión por debajo de los morteros comerciales reforzados con fibra de vidrio.

Se advierte comparando los gráficos de la Figura 79 que el empleo de árido reciclado en los morteros con residuos de fibras tiene una influencia muy desfavorable en el comportamiento mecánico a compresión.

Sería recomendable el uso de aditivos de morteros para mejorar el comportamiento mecánico de los mismos, pero por su efecto contaminante no se van a utilizar en la presente investigación. Se ha descartado tras esta fase el empleo de árido reciclado al comprobarse que disminuye altamente las resistencias de los morteros con residuos de lanas minerales fabricados con dicho árido, especialmente empeora la resistencia a compresión, característica fundamental que permite verificar la validez de los morteros.

6.4. FASE 4: PORCENTAJES ADECUADOS Y CARACTERIZACIÓN FINAL DE LOS MORTEROS

En esta fase se realiza un estudio más profundo de las propiedades mecánicas de los morteros seleccionados en la fase 2. Se decidió analizar los compuestos con el 30% de los tres tipos de residuos de fibras debido a que, en el análisis estadístico de la segunda fase, se comprobó que, es más representativo el tipo de adicción que el porcentaje de la misma, luego se realizan estos ensayos únicamente con el porcentaje de las que presentaron un mejor comportamiento mecánico en la segunda fase.

Se analizaron las siguientes propiedades de los compuestos pertenecientes a las Series III y IV: microscopía electrónica de barrido (SEM), porosimetría por inyección de mercurio, adsorción-desorción de nitrógeno, difracción de rayos X, termogravimetría, energía de fractura y determinación del módulo secante de elasticidad en compresión de los morteros o módulo de young.

6.4.1. Microscopía electrónica de barrido (SEM)

En la Figura 80 se muestran las microfotografías de los compuestos seleccionados. Se puede ver claramente en las imágenes que existe una

coherencia entre las fibras y el mortero base. Aunque también se observa que la distribución puede no resultar homogénea, no pudiéndose controlar las propiedades superficiales, lo que podría solucionarse con el uso de aditivos, los cuales no se utilizan en esta investigación por su efecto contaminante tanto en su proceso de fabricación, como tras su vida útil (en procesos de lixiviación). Así mismo se observa en todos los casos la rotura de los filamentos casi al ras de la matriz indicando una fragilidad del material, similar a las fotogrametrías de estudios con fibras comerciales.

Figura 80. Microscopía SEM de los morteros con fibras (De arriba a abajo: con 30% lana de roca (RW), con 30% fibra de vidrio (FG), con 30% mezcla de fibras (MIX)).

Es destacable que los morteros confeccionados presentan un alto porcentaje de fibras en sustitución de parte de la arena medido en volumen (30%), pero cabe puntualizar que estas cantidades medidas en masa no son valores elevados, por lo que no deben resultar suficientes para producir grandes cambios en la estructura microscópica del material compuesto. Sin embargo, las fibras de vidrio al ser las de mayor densidad están presentes en mayor cantidad másica en los compuestos lo que ha supuesto un empeoramiento de sus propiedades mecánicas.

Por lo tanto, estos resultados indican que la presencia de fibras no afecta a la forma de fraguado del mortero, donde la masa de mortero va fraguando alrededor de las fibras sin que se produzcan porosidad adicional de forma significativa en el intervalo de tamaño de poro cubierto por estas técnicas experimentales; es decir, las fibras quedan “rodeadas” por la masa fraguada, lo que podría indicar una buena adhesión entre el mortero y las fibras, que se comprueba en el comportamiento mecánico.

6.4.2. Porosimetría por inyección de mercurio

Con este ensayo se ha obtenido de forma indirecta, la distribución de la porosidad en función del tamaño aparente de acceso a los poros (Anexo 4), realizándose así la caracterización del sistema poroso de los morteros confeccionados con adiciones al 30%.

La microestructura de los morteros de referencia y de los que tienen residuos de fibras son muy similares y los valores principales se resumen en la Tabla 26.

	VpHg (cm ³ /g)	Diámetro medio de poro (μm)	Densidad aparente (Hg) (g/cm ³)	Densidad real a 1.01 psia (Hg) (g/cm ³)
REF	0,0906	0,1109	2,5002	2,0386
30% RW	0,0889	0,1170	2,5029	2,0474
30% FG	0,1293	0,1374	2,4428	1,8564
30% MIX	0,1136	0,1383	2,4732	1,9307

Tabla 26. Resultados de la caracterización microestructural de los morteros de referencia y de los morteros con el 30% de residuo de fibras minerales.

Cabe puntualizar que los poros de los morteros se clasifican en varios tipos: poros de gel, poros capilares, poros huecos y poros llenos de aire (Jennings & Bullard 2011).

Los poros de gel, considerados como los de tamaño inferior a 3-10 nm se forman dentro de la fase de silicato de calcio hidratado; corresponderían de forma aproximada por tanto a los microporos definidos por la IUPAC, con tamaño inferior a 2 nm. Los poros capilares presentan un tamaño de menos de 10 nm a más de 10 micras, y corresponden a huecos que inicialmente eran espacios rellenos de agua y en los que, progresivamente en el tiempo, precipitan los hidratos, principalmente C-S-H. En la microestructura de los compuestos en base cemento, los poros capilares tienen una gran influencia en las propiedades de transporte, que determinan en gran medida la durabilidad de las estructuras que forman. Los poros huecos, con naturaleza de cuello de botella, tienen tamaños entre 1-15 micras; y finalmente, los huecos llenos de aire tienen tamaños entre 10 micras- 1mm, y se originan en el atrapamiento de aire en el amasado; los pequeños tienen forma esférica y los grandes irregular. Por otro lado, la IUPAC clasifica el tamaño de los poros en función de su diámetro en microporos (0-2 nm), mesoporos (2-50 nm) y macroporos (>50 nm).

En la Tabla 27 se muestra el porcentaje de volumen de poros (%Vp) de macroporos y mesoporos de los morteros estudiados. Los microporos no pueden obtenerse con este ensayo, por lo que posteriormente se realizará el ensayo de adsorción/desorción de nitrógeno a los mismos. Se observa que las muestras de morteros aditivados con residuos de fibras tienen porcentajes similares, tanto de macroporos como de mesoporos, con respecto al mortero de referencia sin fibras.

	REF	30% RW	30% FG	30% MIX
Macroporos				
% Vp (Hg)	72,60	70,00	72,80	62,90
Mesoporos				
% Vp (Hg)	27,40	30,00	27,20	37,10

Tabla 27. Macroporos y mesoporos de los morteros.

La Figura 81 muestra la distribución de tamaño de poro medido mediante porosimetría de mercurio tanto en forma acumulativa como diferencial.

Figura 81. Volumen de poro acumulado (superior) y diferencial (inferior) obtenido mediante el ensayo de porosimetría de Hg.

Según se observa en la Tabla 27 y en la Figura 81, todas las muestras de mortero presentan valores bajos similares de volumen de poro, alrededor de 0,1 cm³/g. El volumen de poro es un poco más alto en las muestras que incluyen fibra de vidrio (FG) y mezcla de fibras (MIX). En consecuencia, la densidad aparente (medida por porosimetría de Hg) en la Tabla 27 es muy similar en la muestra de referencia (REF) y la de lana de roca (RW), mientras que es ligeramente inferior en las muestras con fibra de vidrio (FG) y mezcla de

fibras (MIX). El tamaño de poro de todas las muestras de mortero está comprendido entre aproximadamente 0,03 micras (30 nm) y 90 micras, y corresponde principalmente a poro capilar. En la Tabla 26 se ha mostrado el porcentaje de volumen de poro frente al tamaño. Un gran porcentaje del volumen de poro, alrededor del 60%, corresponde a grandes poros capilares (Large Capillary Pores-LCP, con un diámetro mayor a 100 nm); alrededor del 30% del volumen de poro corresponde a poros capilares pequeños (Small Capillary Pores-SCP, con un diámetro de alrededor de ≈ 10 -100 nm), y menos del 10% de los poros son más pequeños que 10 nm. Según la bibliografía consultada se ha demostrado que los poros de más de 100 nm son poros perjudiciales en cuanto a la durabilidad y propiedades mecánicas de los morteros. Los morteros mezclados con fibra de vidrio y mezcla de fibras muestran una proporción ligeramente mayor de LCP. En todas las muestras, la proporción de poros de gel es muy baja.

Se puede apreciar que todas las muestras presentan una distribución de tamaño de poro bimodal muy similar, como se observa en la gráfica diferencial de la Figura 81, con un máximo ancho alrededor de 0,04 μm y uno agudo alrededor de 0,01 μm . Teniendo en cuenta el tamaño de las partículas de arena y fibras, está claro que los LCP no se deben a los espacios interparticulares de los áridos. Esto se corrobora con la coincidencia entre la distribución del tamaño de poro de las muestras con y sin fibras.

6.4.3. Adsorción/Desorción de nitrógeno

La Figura 82 muestra las isotermas de adsorción-desorción de nitrógeno de las muestras de morteros, según el informe que figura en el Anexo 1. Las isotermas para las cuatro muestras son del tipo IIb. Según la clasificación propuesta para la IUPAC (Rouquerol et al., 2014) estas isotermas con características de sólidos no porosos o que poseen macroporos, en las que la desorción origina un ciclo de histéresis a presiones relativamente altas por encima de 0,5 debido a condensación capilar del nitrógeno en poros de gran tamaño.

Figura 82. Isotermas de adsorción/desorción de N₂ del mortero de referencia y los morteros con el 30% para los tres tipos de residuos de fibras.

De acuerdo con esto, la distribución del tamaño de poro obtenida a partir de la ramificación de desorción de N₂ (Figura 83), demuestra la ausencia de microporos (según lo definido por la IUPAC) en los morteros estudiados. El volumen de poro medido por esta técnica mide los poros menores a 100 nm, y por lo tanto los valores son más bajos que los obtenidos por la porosimetría de Hg. Todas las muestras de mortero con residuos presentan un valor de volumen de poro ligeramente mayor que la muestra de referencia. La muestra de mortero con mezcla de fibras (MIX) presenta valores intermedios de volumen de poro y área superficial de acuerdo con el procedimiento de preparación. Es interesante observar que, en el rango de mesoporos, la distribución del tamaño de poro es prácticamente la misma para todas las muestras, tanto de referencia como aditivadas, con un máximo de alrededor de 10 nm.

Figura 83. Volumen de poro acumulado (superior) y diferencial (inferior) obtenido en el ensayo de adsorción/desorción de N₂.

Por todo esto, no se observan grandes diferencias entre la microestructura del mortero de referencia y los aditivados con fibras, ni tampoco entre los morteros con distinto tipo de fibra. Se ha puesto de manifiesto que las muestras con fibras presentan volúmenes de poro y superficie específica ligeramente superiores, siendo la distribución de tamaños de poros de todas las muestras muy similares. En particular, el mortero con residuo de fibra de vidrio presenta los mayores valores de volumen de poro y superficie específica. Esta ligera diferencia se traduce en un leve aligeramiento de los morteros con residuos de

fibras, como se observaba también en los valores de la densidad aparente determinada en el apartado 6.2.1.

6.4.4. Difracción de rayos X (DRX)

Se analizó mediante DRX las fases cristalinas de los compuestos. En la Figura 84 se presentan los difractogramas de rayos X para las muestras de referencia y de los morteros con residuos de lanas minerales al 30%.

En el mortero de referencia los picos principales corresponden al cuarzo de la arena, y a la calcita, y se detecta Ca(OH)_2 (fase CH) con una intensidad muy pequeña. Los morteros con fibras presentan las mismas fases, y además un pico situado a un valor de 2θ situado entre $26-29^\circ$ correspondiente a las fases hidratadas de los silicatos de calcio (fase SCH).

Figura 84. DRX del cemento y los morteros con el 30% de fibras

Nota: (Q: cuarzo; C: calcita; CS: silicatos de calcio; CH: hidróxido de calcio; CSH: fases hidratadas de silicatos de calcio).

6.4.5. Termogravimetría de los morteros (TG)

Se ha realizado el análisis termogravimétrico de los morteros para analizar adicionalmente las fases que no aparecen mediante la técnica de difracción de rayos X, que sólo muestran las fases cristalinas, y los resultados se presentan en este apartado (Figura 85, Figura 86 y Figura 87).

Para explicar los resultados del análisis térmico existe la necesidad de tener en cuenta lo ya comentado en cuanto a la forma de preparación de los morteros con residuos minerales. En estos morteros el 30% del volumen de la arena ha sido reemplazado por fibras con respecto a la muestra de referencia, por lo que debido a la baja densidad aparente de las fibras la masa total de la muestra es mayor en la muestra de referencia y menor en los morteros mezclados con residuos. Por lo tanto, la masa de las fibras en las pastas de mortero es del 1.9, 0.5 y 1.1 % en peso para las muestras fibra de vidrio, lana de roca y mezcla de fibras respectivamente.

En la Figura 85 se presentan los resultados del análisis DTG-DTA. La Figura 86 y la Figura 87 muestran información adicional sobre los eventos individuales. La termogravimetría se puede utilizar para determinar cuantitativamente a partir de la pérdida de masa de líquido (H_2O) o gas (CO_2) de las fases hidratadas de los compuestos.

De acuerdo con la composición de masa del compuesto investigado, la pérdida de masa total en las muestras reforzadas con fibras es mayor (alrededor de 17% al 22%) que en la muestra de referencia (alrededor del 12%), esto es porque el evento de pérdida de masa que se observa está relacionado principalmente con la descomposición o deshidratación de compuestos del mortero como se describe a continuación.

Los morteros de referencia y morteros que contienen fibra muestran tres eventos de pérdida de masa, siendo el primero de temperatura ambiente hasta aproximadamente 400 °C, el tercero entre 400 y 500 °C y el último entre aproximadamente 500 y 800 °C.

En la primera transición hasta 400 °C, el agua se pierde bien como agua libre en la muestra después del fraguado, o bien por la deshidratación de los

compuestos de silicato de aluminio y calcio formados durante la hidratación del cemento Portland. Especialmente en la zona por debajo de 200 °C se observa claramente en las curvas DTG de todas las muestras dos máximos a temperaturas de 75 y 125 °C, eventos endotérmicos como se ve en las curvas DTA, y atribuidos a la deshidratación de etringita ($6\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{SO}_3 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$), fase CSH u otros compuestos tales como hidrato de gehlenita (Chaipanich and Nochaiya 2010; Ramachandran et al. 2002). El segundo evento masivo muestra un máximo en la curva DTG a 442-448 °C para todas las muestras analizadas, evento endotérmico en la curva DTA, correspondiente a la descomposición del $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (fase CH) también formado en la reacción del cemento Portland con agua. El $\text{Ca}(\text{OH})_2$ se descompone para dar CaO y H_2O , lo que representa menos del 1% en peso de la masa total de morteros.

La tercera pérdida de masa en la región de 500-800 °C presenta un pico de descomposición asimétrica en la curva DTG con un máximo a $\approx 724\text{-}730$ °C en todas las muestras, y corresponde a la descomposición endotérmica (ver curva DTA) de CaCO_3 para dar también CaO y CO_2 . El CaCO_3 proviene del cemento y también se puede producir en el mortero envejecido a partir de la reacción de carbonatación lenta de la fase $\text{Ca}(\text{OH})_2$ del mortero con el CO_2 atmosférico.

Esta pérdida es la más importante en todas las muestras y representa aproximadamente el 6% en peso de pérdidas de masa en la muestra de referencia y un valor mayor, alrededor del 10%, en los morteros aditivados. Estos rangos de temperatura para los picos principales detectados son similares a los detectados por las curvas TG-DTG-DTA para varios autores (Chaipanich & Nochaiya 2010; Lin et al., 2013; Pane & Hansen, 2005; Vessalas et al., 2009), por lo que los resultados resultan aceptables.

Figura 85. Análisis térmico de los morteros aditivados y de referencia: pérdida total de masa vs temperatura.

La pérdida de masa de material orgánico de las fibras ocurre como un evento muy amplio entre 200 y 600 °C (Figura 86) y no se observa claramente en las curvas TG de análisis térmicos de morteros debido a la pequeña cantidad de masa de fibras en la muestra de morteros. La curva DTA de la muestra MIX muestra un evento exotérmico alrededor de 200-350 °C, con un máximo a 250 °C en la curva DTG que podría explicar esta combustión.

Figura 86. Análisis térmico de los morteros aditivados y de referencia: derivada de la pérdida de masa rente a la temperatura.
Nota: el eje se ha desplazado para mayor claridad.

Figura 87. Análisis térmico de los morteros aditivados y de referencia: energía por unidad de masa y de tiempo vs temperatura con evento exotérmico hacia arriba. Nota: el eje se ha desplazado para mayor claridad.

Estos resultados indican que la inclusión de las fibras minerales procedentes del reciclaje en los morteros no modifican sustancialmente la composición y la estructura de los mismos; indican también que no hay diferencias importantes entre el uso de los residuos de lana de vidrio y de lana roca; la muestra de mezcla de residuos de fibras presenta en general un comportamiento intermedio entre las muestras con lana de roca y fibra de vidrio, lo que indica que es posible el uso de la mezcla de fibras minerales sin necesidad de un proceso de separación.

6.4.6. Energía de fractura

En la Tabla 28 se muestran los valores obtenidos en el ensayo de energía de fractura en los que se observa la parte de energía elástica (GF_{el}) y plástica (GF_{pl}) hasta la propagación de grietas relacionada con la energía medida total GF , lo que da una idea sobre la proporción relativa y absoluta de la parte elástica de la energía de fractura. La demanda de energía necesaria para la iniciación de grietas aumentó con la adición de las fibras concluyéndose que aumentaron las porciones de energía elástica y plástica.

Contenido de fibras (% vol.)	G_F	G_{Fpl}	G_{Fel}	G_{Fpl}	G_{Fel}
	(Nm/m ²)	(Nm/m ²)	(Nm/m ²)	(%)	(%)
REF	75	5	20	7	27
30% RW	88	4	38	5	43
30% FG	97	6	34	6	35
30% MIX	104	11	28	11	27

Tabla 28. Parte elástica y plástica de la energía de fractura G_F hasta la propagación de grietas.

Se analizó la energía de fractura para una comprensión completa del comportamiento durante la destrucción en el ensayo de los materiales compuestos. Las curvas de carga P versus deflexión (δ) se muestran en la Figura 88 y en detalle en el Anexo 3, estas se usaron para determinar la energía de fractura total (G_F). La presencia de fibras aumentó la carga crítica y la desviación de las muestras probadas. Considerando la forma de las curvas, el incremento en la deflexión fue el más pequeño para el mortero con mezcla de fibras, y fue el más grande en el caso del mortero con residuo de fibra de vidrio. Los valores más altos de fuerza en la fase postcrítica (parte descendente de la gráfica) se observaron para el mortero con fibras mezcladas, mientras que, para el mortero de referencia, la fase postcrítica fue la más corta.

Figura 88. Carga P versus deflexión (δ) envoltantes de morteros con residuos de fibras de lana mineral.

Los resultados obtenidos de la prueba, realizada en los morteros reforzados con mezcla de fibras (Figura 89), hicieron posible analizar la influencia de la

fibra en las propiedades de fractura del material. El comportamiento previo al pico del material se vio ligeramente afectado por la adición de fibras a la matriz de cemento. En esta etapa, el régimen de deformación estaba dominado por las propiedades de la matriz de cemento, pero las fibras causaron un ligero aumento o un efecto casi insignificante en el valor de carga máxima. Sin embargo, el comportamiento posterior al pico reveló una mejora importante en comparación con el mortero de referencia sin fibras, al igual que afirman otros autores que sucede en investigaciones similares (Kosior-kazberuk & Krassowska 2015). Tras el ensayo los resultados de la medición de la tenacidad y las características de absorción de energía mostraron que los compuestos con fibras procedentes de residuos de lanas minerales adquieren un gran comportamiento dúctil y capacidad de absorción de energía, en comparación con las muestras del mortero de referencia.

Figura 89. Probetas con fibras de lana de roca después de la prueba del ensayo de fractura.

Así mismo el análisis de los diagramas P-CMOD (carga-desplazamiento del borde de la fisura) (Figura 90) demostraron que, en los morteros reforzados, el comportamiento de fractura posterior al pico mejoró en gran medida mediante la adición de residuos de fibras de lanas minerales.

Figura 90. Curvas de carga (P) frente a la carga- desplazamiento del borde de la fisura para los morteros con residuos de fibras de lanas minerales.

6.4.7. Módulo de Young

Se comprueba que la incorporación de los residuos de fibras hace disminuir el módulo de elasticidad de los compuestos analizados, para la adición de 30% de los tres tipos de residuos de lanas minerales empleados. Se constata, que al igual que en otras investigaciones consultadas, la incorporación de residuos de fibras a los morteros hace disminuir su módulo de Young (Nadal Gisbert et al., 2014), obteniendo morteros más elásticos.

En los valores obtenidos (Tabla 29) se observó que los morteros que incorporan residuos de lana de roca, residuos de fibra de vidrio y residuos mixtos de lanas minerales, presentan un 16%, 20,5% y 17,6% respectivamente menos rigidez que el mortero de referencia. Así mismo se refleja que el compuesto más elástico es el mortero al que se le incorpora fibra de vidrio.

Contenido de fibras (% vol.)	Ciclo (Mpa)	Mod. Young (Mpa)	Desviación estándar
REF	22,870	22,92	0,12
	22,830		
	23,060		
30% RW	19,301	19,23	0,11
	19,293		
	19,105		
30% FG	18,203	18,22	0,02
	18,243		
	18,216		
30% MIX	18,886	18,89	0,01
	18,879		
	18,903		

Tabla 29. Valores del Módulo de Young (MPa).

6.5. FASE 5: ESTUDIO DE LA DURABILIDAD DE LOS MORTEROS MÁS SOSTENIBLES

En esta fase se realiza un estudio más exhaustivo de las propiedades relativas a la durabilidad de los morteros más sostenibles, que son aquellos en los que se puede reciclar mayor cantidad de residuo, es decir los del 50%. Puesto que en el análisis estadístico de la segunda fase se comprueba que es más influyente el tipo de residuo empleado que el porcentaje de adición, se decide analizar los compuestos del 50% que fue el máximo admisible para que los morteros sean trabajables. Al resultar ser los morteros más porosos los que incorporan el 50% de fibras, también serán los que presenten mayores problemas de durabilidad, por lo tanto, si en estos compuestos se puede garantizar su durabilidad también se podrá para los que tienen menor porcentaje de residuo.

6.5.1. Resistencia al fuego

En la Figura 91 se pueden observar las probetas ensayadas sometidas a fuego directo de las llamas, que llegaron a alcanzar una temperatura de más de 700°C en menos de 10 minutos (con una temperatura exterior de 3,6°C), al

igual que estudios similares (Bilodeau et al., 2004), medidos con un termómetro infrarrojo.

Figura 91. Prueba de fuego de los morteros con exposición directa (arriba) y morteros tras el ensayo (abajo).

Durante una hora de ensayo se tomaron datos de las temperaturas alcanzadas (Anexo 5) y posteriormente se realizaron los ensayos de dureza Shore D, resistencia a flexión y compresión y conductividad térmica a las probetas ensayadas.

Así mismo se captaron imágenes con cámara térmica en diferentes momentos durante todo el ensayo (Figura 92).

Cabe destacar que dos de las tres probeta de referencia explotaron durante el ensayo, por lo que se demuestra, como afirman otros autores (Aydin et al.,,

que la incorporación de fibras es efectiva para prevenir el comportamiento de desprendimiento explosivo de los morteros.

Figura 92. Imágenes termográficas del inicio del incendio.

En la Figura 93 se ha representado gráficamente los resultados obtenidos del ensayo de dureza superficial Shore D antes y después del ensayo a fuego, para los morteros con residuos de fibras y el mortero de referencia.

Como se puede observar la dureza superficial de los morteros prácticamente no se ve alterada tras el incendio permaneciendo todos ellos en valores bastante similares como se observa en otros estudios (López-Buendía et al., 2013).

Cabe destacar que en todo caso el peor comportamiento lo presentan las probetas de referencia en las que se produce un descenso de esta dureza superficial del 2%.

Figura 93. Dureza superficial de los morteros antes (izquierda) y después (derecha) del ensayo a fuego.

En la Figura 94 se ha representado gráficamente los resultados obtenidos de la resistencia a flexión, antes y después del ensayo a fuego, para los morteros con residuos de fibras y el mortero de referencia.

Se observa que la resistencia a flexión de los morteros empeora de manera significativa tras el ensayo a fuego. Cabe destacar que el mortero que peor comportamiento a flexión ha presentado tras el incendio es el mortero de referencia, que ve disminuida su resistencia en hasta un 92,7%, mientras que los morteros con residuos de fibras mantienen unos valores aceptables de resistencia.

Se demuestra que morteros con residuos de lanas minerales no empeoran su resistencia en más del 50% para ninguno de los tres tipos de residuos, permaneciendo todos en valores muy similares. Por todo esto, se demuestra que la incorporación de residuos de fibras en los morteros puede producir una importante mejora en su comportamiento frente al fuego, al igual que algunos autores han demostrado para otro tipo de fibra como acero o polipropileno (Ding et al., 2016; Serrano et al., 2016).

Figura 94. Resistencia a flexión de los morteros antes (izquierda) y después (derecha) del ensayo a fuego.

Se puede observar en la Figura 95 los resultados obtenidos de la resistencia a compresión, antes y después del ensayo a fuego, para los morteros con residuos de fibras y el mortero de referencia.

Se demuestra que los valores de resistencia a compresión de los morteros disminuyen tras el incendio, siendo el mortero con residuo de lana de roca el que mayor descenso de esta resistencia sufre (45.41%).

Sin embargo, a pesar de esta disminución, los valores de la resistencia a compresión de todos los morteros confeccionados permanecen en valores óptimos para su utilización.

Figura 95. Resistencia a compresión de los morteros antes (izquierda) y después (derecha) del ensayo a fuego.

En la Figura 96 se muestran los resultados de los coeficientes de conductividad térmica (λ) de los morteros confeccionados con residuos de fibras y del mortero de referencia, antes y después del ensayo a fuego. Se observa que los morteros confeccionados con fibras presentan mejores valores térmicos tras el ensayo a fuego, siendo los morteros con adicción de residuo de lana de roca los que siguen siendo más aislantes.

Figura 96. Conductividad térmica de los morteros antes (izquierda) y después (derecha) del ensayo a fuego.

Por todo lo expuesto anteriormente puede deducirse que los morteros con residuos de fibras tras el ensayo a fuego no solamente mantienen unas propiedades mecánicas adecuadas para su utilización, sino que además sus propiedades térmicas se ven mejoradas.

6.5.2. Heladicidad

La resistencia a la heladicidad de los morteros depende del grado de saturación de agua que pueda alcanzar, es decir de su valor crítico de saturación, lo que dependerá, como otras propiedades analizadas en este estudio, de la porosidad del material.

En los resultados expuestos en la Tabla 30 se observa la pérdida de resistencia a flexión tras los ciclos de hielo y deshielo de las probetas ensayadas. Como se puede apreciar estas pérdidas en comparación con las de las probetas de referencia no resultan significativas. Cabe destacar, que los morteros con residuo de lana de roca son los que más pérdida de resistencia a flexión sufren.

Denominación	Probeta	Resistencia a flexión (MPa)	Media	Desviación Estándar	Pérdida de resistencia (%)
REF	P1	6,842	6,126	0,636	6,72
	P2	5,627			
	P3	5,908			
50% RW	P1	6,539	6,449	0,123	9,02
	P2	6,309			
	P3	6,499			
50% FG	P1	5,734	5,892	0,230	8,80
	P2	5,786			
	P3	6,155			
50% MIX	P1	6,326	6,941	0,641	5,26
	P2	7,605			
	P3	6,893			

Tabla 30. Pérdida de resistencia a flexión ensayo de heladicidad.

En cuanto a la pérdida de la resistencia a compresión igualmente no resultan significativos los resultados comparando los morteros aditivados con respecto a los morteros de referencia.

Se ha realizado también una inspección visual tras los ciclos de hielo y deshielo, no apareciendo deterioros significativos en la superficie de las probetas como se observa en la Figura 97.

Figura 97. Probetas con residuos de fibras antes (izquierda) y después (derecha) de 25 ciclos de heladicidad.

Por todo lo expuesto anteriormente, pueden considerarse los morteros confeccionados en la presente investigación como no heladizos.

6.5.3. Cristalización de sales

En la Tabla 31 se observan los resultados de la pérdida de peso que se han producido en las probetas tras los 15 ciclos del ensayo de cristalización de sales. Las probetas que más pérdida de peso sufrieron fueron las que tenían residuos de lana de roca, seguidas por las que contenían residuos mixtos de fibras, mientras que las probetas con fibra de vidrio fueron las que menor peso perdieron, incluso por debajo de las probetas de referencia.

Denominación	Pérdida de peso (%)
REF	4,60
50% RW	5,89
50% FG	2,93
50% MIX	5,86

Tabla 31. Pérdida de peso de las probetas tras el ensayo de cristalización de sales.

En la Tabla 32 se muestran los resultados del ensayo de resistencia a flexión de las probetas tras los 15 ciclos de cristalización de sales, pudiéndose observar un gran deterioro del comportamiento mecánico de las probetas con residuos de lanas minerales con respecto a las probetas de referencia. Se produce hasta un 20% más de pérdida de resistencia en el caso de las probetas con lana de roca que son las que presentan un peor comportamiento en este ensayo llegando incluso al desmoronamiento tras la fisuración.

Denominación	Probeta	Resistencia a flexión (MPa)	Media	Desviación Estándar	Pérdida de resistencia (%)
REF	P1	6,440	6,103	0,334	7,06
	P2	6,097			
	P3	5,773			
50% RW	P1	5,584	5,130	0,498	27,63
	P2	4,598			
	P3	5,207			
50% FG	P1	5,161	5,071	0,398	21,50
	P2	5,417			
	P3	4,636			
50% MIX	P1	6,193	5,645	0,477	22,95
	P2	5,418			
	P3	5,325			

Tabla 32. Pérdida de resistencia a flexión ensayo cristalización de sales.

Tras la inspección visual (Figura 98) se puede apreciar que los morteros confeccionados con lana de roca (Figura 99) seguidos de los que contienen residuos mixtos de lanas minerales sufrieron un mayor deterioro que los morteros de referencia, mientras que los morteros con fibra de vidrio sufrieron un deterioro ligeramente inferior.

Figura 98. Probetas de referencia y con los tres tipos de residuos antes y después del ensayo de cristalización de sales.

Figura 99. Probetas con residuos de lana de roca tras 15 ciclos de cristalización de sales.

6.5.4. Determinación de la permeabilidad al vapor de agua del mortero endurecido

En este apartado se analiza el grado de resistencia al paso del vapor de agua a través de los morteros confeccionados. En función de la aplicación del mortero interesará que permitan la transpiración para evitar patologías provocadas por la humedad por condensación, o por lo contrario que sean lo más impermeables posible. Esta característica dependerá del grado de difusión que permita el mortero a través de su sistema poroso.

En la Tabla 33 se recogen los resultados obtenidos del ensayo de permeabilidad al vapor de agua conforme al procedimiento indicado en el apartado 5.2.1.15.

Denominación	Peso inicial (g)	Peso 6 semanas(g)	Resultado (kg/msPa)
REF	2298,4	2251,6	1323,652
50%RW	2072,1	2009,2	1192,630
50%FG	2210,5	2151,7	1272,786
50%MIX	1994,7	1897,5	1147,455

Tabla 33. Resultado ensayo de permeabilidad al vapor de agua.

Se puede observar que los valores de permeabilidad al agua son menores para los morteros que incorporan residuos de fibras minerales con respecto a la amasada de referencia sin fibras. Esto se debe a que, por el contrario de lo que sucede para los valores de absorción de agua, se obtienen valores más altos de permeabilidad al vapor de agua en los morteros con mayor cantidad de árido (Arizzi & Cultrone 2012). Esto va relacionado con las características de la interfase entre el árido y la matriz, el CO₂ se difunde mejor en el árido que en la matriz favoreciendo la permeabilidad.

Cabe destacar que, debido a su mayor porosidad (demostrada en apartados anteriores de este estudio), de entre los morteros con fibras, el mortero con residuo de fibra de vidrio es que el mejor resultado obtiene para este ensayo.

6.5.5. Resistencia a la adhesión

La adherencia es una propiedad que influye directamente en el comportamiento tensional que existe en la interfase del mortero-soporte.

Los resultados obtenidos a través del desarrollo experimental se muestran en la Tabla 34. Los morteros elaborados con residuos de fibras disminuyen ligeramente su resistencia a la adhesión, en relación al mortero de referencia. Los morteros con residuos de fibra de vidrio son los que menor valor de resistencia presentan, esto puede ser debido a que la adherencia, entre otros factores, es consecuencia de la formación de cristales producidos en la

hidratación del conglomerante, por lo que las dosificaciones con mayor cantidad de fibra en masa desarrollan resistencias menores a la adhesión.

Denominación	Adhesión (N/mm ²)
REF	0,43
50% RW	0,34
50% FG	0,31
50%MIX	0,46

Tabla 34. Resistencia a la adhesión de los morteros.

En cualquier caso, todos los morteros analizados están por encima del valor mínimo que marca la norma UNE EN-998-1 de 0,30 N/mm², por lo que resultan aptos para su uso.

6.5.6. Contenido de aire ocluido del mortero en estado fresco

La cantidad de aire ocluido de los morteros en estado fresco influye directamente en la porosidad del material, una mayor cantidad de aire ocasiona más porosidad lo que mejora la trabajabilidad y la resistencia a los ciclos de hielo y deshielo, mientras que por otro lado esto empeora las resistencias mecánicas y la adherencia al soporte.

Los resultados del ensayo se muestran en la Tabla 35, donde se observa que al incorporar los residuos de fibras a los morteros aumenta significativamente la cantidad de aire ocluido de los mismos con respecto al de referencia, siendo el mortero con residuos de fibras de vidrio el que presenta una mayor cantidad de aire ocluido (9,9%), seguido del mortero con mezcla de fibras (4,8%).

Denominación	% Aire Ocluido
REF	3,1
30% RW	4,6
30% FG	9,9
30%MIX	4,8

Tabla 35. Resultados del contenido de aire ocluido en estado fresco.

6.5.7. Periodo de trabajabilidad del mortero en estado fresco

En las amasadas la trabajabilidad es la propiedad que nos permite manejar la mezcla sin problemas de segregación hasta el fraguado del conglomerante.

En la Tabla 36 se muestran los resultados obtenidos en el ensayo descrito en el apartado 5.2.1.11., en ellos se observa que residuos de lana de roca mejoran el periodo de trabajabilidad del mortero, alcanzando los 187 minutos frente a los 156 minutos que tiene su homólogo de referencia. Se comprueba que la adición de fibra de vidrio empeora el periodo de trabajabilidad que se encuentra en 56 minutos, esto es debido a que, como ya se ha comentado, al ser más densas las fibras se encuentran en más proporción de masa en la mezcla.

Denominación	Trabajabilidad (minutos)
REF	156
50% RW	187
50% FG	56
50%MIX	47

Tabla 36. Resultados periodo de trabajabilidad de los morteros.

6.5.8. Morteros con fibras comerciales sintéticas de polipropileno

En el presente apartado se caracteriza mecánicamente los morteros de cemento con adición de fibras comerciales de polipropileno, sustituyendo parte del árido medido en volumen, en los mismos porcentajes que en el resto de la investigación (30%, 40% y 50%). Se compara este nuevo compuesto con los morteros elaborados con residuos de fibras minerales ya analizados, al fin de verificar que resultan una alternativa viable a las fibras comerciales más empleadas actualmente.

En la Figura 100 se han representado gráficamente los resultados obtenidos del ensayo de dureza superficial Shore D, de los morteros con fibras de polipropileno y del mortero de referencia.

Como se puede observar la dureza superficial de los morteros con estas fibras disminuye de manera significativa, y que empeora según se aumenta el porcentaje de adición.

En comparación con los morteros con residuos de fibras minerales (apartado 6.2.3.), los morteros con fibras de polipropileno presentan un peor comportamiento de dureza superficial. Cabe destacar que los que peor comportamiento tuvieron fueron los compuestos con residuos de fibras de vidrio al 50%, superando aun así en más de 14 puntos a la dureza de los morteros con fibras de polipropileno con el mismo porcentaje.

Figura 100. Valores de dureza superficial de los morteros con fibras de polipropileno.

En la Figura 101 se ha representado gráficamente los resultados obtenidos de la resistencia a flexión, para los morteros con fibras de polipropileno y para el mortero de referencia.

Se observa que la resistencia a flexión de los morteros empeora de manera significativa con la incorporación de estas fibras y proporcionalmente a la cantidad de fibras empleadas.

Mientras que los morteros con residuos de fibras de lanas minerales en general mejoraron sus valores de resistencia a flexión respecto a los morteros de referencia (apartado 6.2.4.), para los mismos porcentajes los morteros con fibras de polipropileno presentan valores de hasta el 50% por debajo respecto a la referencia.

Figura 101. Valores de resistencia a flexión de los morteros con fibras de polipropileno.

Se puede observar en la Figura 102 los resultados obtenidos de la resistencia a compresión, para los morteros con fibras de polipropileno y para los morteros de referencia.

Se demuestra que los valores de resistencia a compresión de los morteros disminuyen con la incorporación del polipropileno, siendo el mortero con el 50% de fibras el que mayor descenso de esta resistencia sufre (70,96%).

Además, con respecto a los morteros con residuos de fibras, estos tienen valores de resistencia a compresión de hasta un 59,90% superiores a los obtenidos en las mezclas con residuos de polipropileno para el peor de los casos (50%) (apartado 6.2.5.).

En la Figura 103 se muestran las probetas ensayadas con fibras de polipropileno, en ellas se observa que, aunque se haya producido la rotura, el alto porcentaje de fibras hace que la unión fibra-matriz se mantenga sin desmoronarse.

Figura 102. Valores de resistencia a compresión de los morteros con fibras de polipropileno.

Figura 103. Probetas de mortero de cemento con fibras de polipropileno tras el ensayo a compresión, con adiciones del: 30% (izquierda), 40%(centro), 50%(derecha).

Por todo esto se puede concluir que la adición de fibras de polipropileno empleadas en los morteros, en los mismos porcentajes que en el resto de la investigación, producen una reducción de sus propiedades mecánicas.

Por lo tanto, los morteros que incorporan residuos de fibras minerales tienen un mejor comportamiento para estos altos valores de adición que los morteros que incorporan fibras comerciales de polipropileno, lo cual logra uno de los objetivos del presente estudio de incorporar la máxima cantidad de residuo para su revalorización o reciclaje en los morteros.

6.6. FASE 6: ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO POR SIMULACIÓN NUMÉRICA

En esta fase se comprueba la aplicación práctica en un sistema constructivo mediante simulación numérica utilizando el software STAR_CCM+, de los nuevos morteros elaborados con residuos de fibras minerales. Se compara el proceso de transformación de calor, en las mismas condiciones, de una fachada de bloques de mortero utilizados habitualmente, con el proceso de transformación de calor de la misma fachada con los bloques de cemento aligerados de la presente investigación.

Condiciones iniciales de entrada

Se ha estudiado el comportamiento térmico en un sistema constructivo de envolvente vertical, definiendo un modelo de referencia según la metodología empleada en la bibliografía consultada (Santa Cruz & Porras-Amores, 2017).

En la siguiente tabla (Tabla 37) pueden observarse las características tanto del mortero de referencia confeccionado en la presente investigación que se utiliza para el modelo de referencia, como las del mortero con el 30% de residuos de fibras de lana de roca que fue, de todos los elaborados, el que presentó un mejor comportamiento mecánico y térmico en las fases anteriores. Los datos del coeficiente de conductividad térmica y calor específico de los dos compuestos son los obtenidos en el ensayo térmico del apartado 6.2.8. Análisis térmico.

Material	Tipo de residuo	% de residuo	Coeficiente de conductividad térmica (W/mK)	Densidad (g/cm³)	Calor específico (J/kgK)
Bloque de mortero de cemento Referencia	-	0%	2,260	1,172	1000
Bloque de mortero de cemento Aligerado	Lana de Roca	30%	2,170	0,998	1000

Tabla 37. Datos bloques de mortero de cemento de los resultados de la investigación.

Simulación cerramiento vertical

El cerramiento está compuesto por un bloque de mortero de cemento de 20 cm de espesor, un enfoscado de 1,5 cm, una cámara de aire de 4 cm, un aislamiento térmico de 5 cm, un trasdosado de ladrillo hueco doble de 7 cm y un revestimiento de 1,5 cm de espesor.

La simulación consiste en comparar el escenario creado con el bloque de mortero de cemento de referencia, con el escenario creado sustituyéndolo por el bloque de mortero de cemento con el 30% de residuo de fibras de lana de roca.

Figura 104. Sección cerramiento vertical.

En primer lugar, se realiza la geometría del cerramiento, representando 1 m² de superficie del mismo con los espesores correspondientes de cada material (Figura 104). En segundo lugar, a cada material sólido se le han asignado los siguientes valores:

- Constant density
- Segregated solid energy
- Steady, solid
- Gradients
- Three dimensional

Así mismo, para la cámara de aire por ser un gas se le han asignado:

- Constant density
- Segregated fluid temperatura
- Laminar
- Segregated Flow
- Gas
- Steady
- Gradients
- Three dimensional

Posteriormente a cada volumen sólido se le han introducido los parámetros térmicos de dicho material: densidad, coeficiente de conductividad térmica y calor específico (Tabla 16 y Tabla 37).

A continuación, se realiza un mallado tetraédrico del volumen computacional (Figura 105), por ser la más adecuada debido a que ofrece resultados precisos para este tipo de simulaciones.

Figura 105. Mallado tetraédrico

Para el mallado del sistema constructivo se definen las siguientes condiciones iniciales de entrada:

- Una temperatura superficial exterior de -2°C , lo que simula un escenario con una temperatura extrema en invierno en la ciudad de Madrid.
- Una temperatura interior de 22°C , lo que simula una situación de confort térmico en el interior de una vivienda.
- Un coeficiente de transmisión por convección de $8 \text{ W/m}^2\text{K}$, que es el valor que se utiliza en normativa para flujos interiores (Santa Cruz & Porras-Amores, 2017).

Realizada la simulación con la referencia y para el escenario simulación con el bloque aligerado se obtienen los resultados para la temperatura superficial interior y exterior. Como puede observarse en la Figura 106, en la fachada con el bloque de mortero con residuos de fibras la temperatura interior no se reduce significativamente con respecto a la fachada con el bloque de referencia (de $21,124^{\circ}\text{C}$ a $21,116^{\circ}\text{C}$). Esto puede ser debido a que el nuevo material no supone una importante reducción en la transferencia de calor en la solución de envolvente propuesta por m^2 al tratarse de bloques huecos y no macizos, además elementos como la cámara de aire poseen mayor potencial aislante.

Figura 106. Comportamiento térmico de un sistema de fachada para el modelo de referencia (izquierda) y el escenario estudiado (derecha)

Si analizamos el coeficiente de transferencia de calor por conducción de la solución constructiva que hace falta para ambos escenarios según la simulación, se obtiene que para el primer escenario de referencia hacen falta $7,1027 \text{ W/m}^2$ de energía, mientras que para el segundo son necesarios $7,0404 \text{ W/m}^2$, lo que resulta una diferencia energética por m^2 con un 1% de mejoría.

Esto se debe a que el aislamiento que produce el material analizado ponderadamente es muy inferior al que suponen otros materiales de la solución constructiva como el aislamiento o la cámara de aire. Pero sin embargo cabe destacar que según el coeficiente de conductividad térmica analizado en el apartado 6.2.8., únicamente del bloque de mortero aditivado supone una mejora térmica del 14%, por lo que, aunque tenga poco peso su ahorro energético para el sistema constructivo por m^2 el material posee un alto potencial aislante por sí mismo. Cabe destacar que estas simulaciones se han realizado en estado estacionario, por lo que, para tener mejor idea del comportamiento térmico de una solución constructiva como la propuesta, sería más conveniente realizar un análisis dinámico estudiando las condiciones que se van produciendo a lo largo de un año mediante un programa que evalúe la demanda energética.

TRABAJOS CITADOS

- AENOR, A. E. (1999). UNE EN 1015-6:1999. Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 6: Determinación de la densidad aparente del mortero fresco. España.
- AENOR, A. E. (2004). UNE EN 13139/AC:2004. Áridos para morteros. España.
- AENOR, A. E. (2010). UNE EN 998-1:2010 . Especificaciones de los morteros para albañilería. Parte 1: Morteros para revoco y enlucido. España.
- AENOR, A. E. (2012). UNE EN 933-1:2012. Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 1: Determinación de la granulometría de las partículas. Método del tamizado. España.
- Arizzi, Anna, and Giuseppe Cultrone. 2012. "La Influencia de La Interfase Árido-Matriz (ITZ) En Las Propiedades de Morteros de Cal." *Revista de la sociedad española de minerología* 16(junio): 60–61.
- Aydin, Serdar, Halit Yazici, and Bülent Baradan. 2008. "High Temperature Resistance of Normal Strength and Autoclaved High Strength Mortars Incorporated Polypropylene and Steel Fibers." *Construction and Building Materials* 22(4): 504–12.
- Bilodeau, A., V. K R Kodur, and G. C. Hoff. 2004. "Optimization of the Type and

- Amount of Polypropylene Fibres for Preventing the Spalling of Lightweight Concrete Subjected to Hydrocarbon Fire.” *Cement and Concrete Composites* 26(2): 163–74.
- Cáceres, J. M., J. E. G. Hernández, and J. M. Rincón. 1996. “Characterization of Fibers as Rockwool for Insulation Obtained from Canary Islands Basalts.” *Materiales De Construcción* 46(242–43): 61–78.
- Carsana, Maddalena, Massimiliano Frassoni, and Luca Bertolini. 2014. “Comparison of Ground Waste Glass with Other Supplementary Cementitious Materials.” *Cement and Concrete Composites* 45: 39–45. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.09.005>.
- Cebrián, Fernando Muñoz. 2011. “Comportamiento Mecánico Del Hormigón Reforzado Con Fibra de Polipropileno Multifilamento: Influencia Del Porcentaje de Fibra Adicionado.” : 82.
- Chaipanich, Arnon, and Thanongsak Nochaiya. 2010. “Thermal Analysis and Microstructure of Portland Cement-Fly Ash-Silica Fume Pastes.” *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 99: 487–93.
- Chen, Q. Y. et al. 2007. “Characterisation of Products of Tricalcium Silicate Hydration in the Presence of Heavy Metals.” *Journal of Hazardous Materials* 147: 817–25.
- Ding, Yining et al. 2016. “Influence of Different Fibers on the Change of Pore Pressure of Self-Consolidating Concrete Exposed to Fire.” *Construction and Building Materials* 113: 456–69. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.070>.
- Gutiérrez-González, S. et al. 2012. “Lightweight Plaster Materials with Enhanced Thermal Properties Made with Polyurethane Foam Wastes.” *Construction and Building Materials* 28(1): 653–58.
- Jelle, Bjørn Petter. 2011. “Traditional, State-of-the-Art and Future Thermal Building Insulation Materials and Solutions - Properties, Requirements and Possibilities.” *Energy and Buildings* 43: 2549–63.
- Jennings, Hamlin M., and Jeffrey W. Bullard. 2011. “From Electrons to Infrastructure: Engineering Concrete from the Bottom Up.” *Cement and Concrete Research* 41: 727–35. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.03.025>.
- Kim, Hongseop et al. 2015. “Static Mechanical Properties and Impact Resistance of Amorphous Metallic Fiber-Reinforced Concrete.” *Composite Structure* 134: 831–44. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.08.128>.
- Kosior-kazberuk, Marta, and Julita Krassowska. 2015. “Fracture Behaviour of Basalt and Steel Fibre Reinforced Concrete.” *Budownictwo i Inżynieria Środowiska* 6: 73–80.
- Lin, Wei Ting, An Cheng, Ran Huang, Yuan Chieh Wu, et al. 2013. “Rock Wool Wastes as a Supplementary Cementitious Material Replacement in Cement-Based Composites.” *Computers and Concrete* 11(2): 93–104.
- Lin, Wei Ting, An Cheng, Ran Huang, and Si Yu Zou. 2013. “Improved Microstructure of Cement-Based Composites through the Addition of Rock Wool Particles.” *Materials Characterization* 84: 1–9. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matchar.2013.06.020>.
- López-Buendía, Angel M., María Dolores Romero-Sánchez, Verónica Climent, and Celia Guillem. 2013. “Surface Treated Polypropylene (PP) Fibres for Reinforced Concrete.” *Cement and Concrete Research* 54: 29–35. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.08.004>.

- Mana Halvaei, Masoud Jamshidi, Masoud Latifi. 2014. "Application of Low Modulus Polymeric Fibers in Engineered Cementitious Composites." *Journal of Industrial Textiles* 43(4): 511–24.
- Melián, G, and G Barluenga. 2010. "Aumento de La Tenacidad de Hormigones Autocompactables Reforzados Con Fibras Cortas de Polipropileno Toughness Increase of Self Compacting Concrete Reinforced with Polypropylene Short Fibers." *Materiales de construcción. (Madrid)* 60: 83–97.
- Nadal Gisbert, A. et al. 2014. "Analysis Behaviour of Static and Dynamic Properties of Ethylene-Propylene- Diene-Methylene Crumb Rubber Mortar." *Construction and Building Materials* 50: 671–82. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.018>.
- Osseni, Sibiath O.G.q, Clement Ahouannou, Emile A. Sanya, and Yves Jannot. 2016. "Investigation on the Use of Cement Mortar Containing Banana Fibers as Thermal Insulator in Building." *International Journal of Advanced Research* 4(11): 1142–52. [http://www.journalijar.com/article/13306/investigation-on-the-use-of-the-cement-mortar-containing-banana-fibers-as-thermal-insulator-in-building./](http://www.journalijar.com/article/13306/investigation-on-the-use-of-the-cement-mortar-containing-banana-fibers-as-thermal-insulator-in-building/).
- Pane, Ivindra, and Will Hansen. 2005. "Investigation of Blended Cement Hydration by Isothermal Calorimetry and Thermal Analysis." *Cement and Concrete Research* 35: 1155–64.
- Panesar, D. K., and B. Shindman. 2012. "The Mechanical, Transport and Thermal Properties of Mortar and Concrete Containing Waste Cork." *Cement and Concrete Composites* 34(9): 982–92. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.06.003>.
- Ramachandran, V.S., R.M. Paroli, J.J. Beaudoin, and A.H. Delgado. 2002. "Formation and Hydration of Cement and Cement Compounds." In *Handbook of Thermal Analysis of Construction Materials*, William Andrew Inc., 71–142.
- Rouquerol., F. et al. 2014. *Adsorption by Powders and Porous Solids. Principles, Methodology and Applications*. Second Edi. Elsevier Ltd.
- Sánchez Paradela, M. Laura, and Vicente Sánchez Gálvez. 1991. "Comportamiento a Tracción De Cementos Reforzados Con Fibras De Vidrio." *Consejo Superior de Investigaciones Científicas* 43(413): 13.
- Santa Cruz Astorqui, Jaime, and César Porras-Amores. 2017. "Ventilated Façade with Double Chamber and Flow Control Device." *Energy and Buildings* 149: 471–82. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.04.063>.
- Serrano, Rubén, Alfonso Cobo, María Isabel Prieto, and María de las Nieves González. 2016. "Analysis of Fire Resistance of Concrete with Polypropylene or Steel Fibers." *Construction and Building Materials* 122: 302–9.
- Siligardi, Cristina, Paola Miselli, Elena Francia, and Magdalena Lassinantti Gualtieri. 2017. "Temperature-Induced Microstructural Changes of Fiber-Reinforced Silica Aerogel (FRAB) and Rock Wool Thermal Insulation Materials: A Comparative Study." *Energy and Buildings* 138: 80–87. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.12.022>.
- Väntsi, Olli, and Timo Kärki. 2014. "Utilization of Recycled Mineral Wool as Filler in Wood-Polypropylene Composites." *Construction and Building Materials* 55: 220–26.
- Vessalas, K. et al. 2009. "Pozzolanic Reactivity of the Supplementary

Cementitious Material Pitchstone Fines by Thermogravimetric Analysis.”
Journal of Thermal Analysis and Calorimetry 97(1): 71–76.

Xiaochun, Qin, Li Xiaoming, and Cai Xiaopei. 2017. “The Applicability of Alkaline-Resistant Glass Fiber in Cement Mortar of Road Pavement: Corrosion Mechanism and Performance Analysis.” *International Journal of Pavement Research and Technology* 10(6): 536–44.
<https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2017.06.003>.

CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES

A continuación, se resumen las conclusiones que pueden extraerse del trabajo de investigación desarrollado:

Como conclusión principal, destacar que resulta viable, desde el punto de vista físico-mecánico y térmico, la incorporación de residuos de lana mineral en sustitución de parte del árido empleado en la fabricación de morteros de cemento, esto supone una alternativa de menor impacto ambiental a las fibras de refuerzo utilizadas en la actualidad para morteros.

Además, y teniendo en cuenta los objetivos específicos establecidos, de acuerdo con la metodología desarrollada y los resultados obtenidos, se puede concluir que:

CONCLUSIONES AL OBJETIVO 1

En cuanto al objetivo de analizar la viabilidad de utilizar fibras procedentes de residuos de lanas minerales en morteros de cemento, estableciendo las dosificaciones adecuadas a través del diseño de un plan experimental:

- Con estos morteros reforzados es viable reciclar hasta un 50% del volumen de la arena empleada, lo cual supone una gran cantidad de ahorro de materia prima y un elevado reciclaje de volumen de lanas minerales.

CONCLUSIONES AL OBJETIVO 2

Con respecto al objetivo de determinar las propiedades de los morteros de cementos con residuos de fibras para su adecuación a la normativa en vigor:

- Los análisis físicos y químicos de las fibras minerales demuestran que su composición es similar a la de los materiales cementantes complementarios como la ceniza volante y el humo de sílice, por lo que puede resultar un sustituto adecuado de los agregados gruesos y finos en un compuesto a base de cemento. Además, se comprueba que las características físicas y químicas de los residuos de fibras no han sido

alteradas en el proceso habitual de almacenamiento en el vertedero, por lo que en este sentido se presentan adecuadas para su uso.

- Tanto la estructura y composición química, como la microestructura de los morteros con residuos de fibras es similar al mortero de referencia, es decir, no ha habido algún cambio inducido por las fibras, que pueda afectar a su funcionalidad, por lo que el uso de lanas minerales recicladas es viable como aditivo en los morteros.

CONCLUSIONES AL OBJETIVO 3

Con respecto al objetivo de estudiar la viabilidad de realizar los compuestos con árido reciclado:

- Se ha descartado el empleo de árido reciclado en la confección de los morteros con residuos de fibras minerales al comprobarse que esto empeora de forma importante su comportamiento mecánico.

CONCLUSIONES AL OBJETIVO 4

Para el objetivo de conseguir morteros de cemento con propiedades mecánicas y térmicas mejoradas con respecto a los morteros actuales:

- Los compuestos obtenidos, aunque reducen sus resistencias mecánicas a compresión, cumplen los requisitos mínimos exigidos en la normativa vigente, permaneciendo en valores similares a las fibras minerales comerciales empleadas hoy en día.
- La resistencia a flexión de los morteros reciclados se ve mejorada por la incorporación de este tipo de residuos, encontrándose en valores muy parecidos respecto a los que se les incorporan fibras comerciales poliméricas y de vidrio AR.

CONCLUSIONES AL OBJETIVO 5

En cuanto al a completa caracterización de los nuevos materiales puede concluirse que:

- Los ensayos de energía de fractura y de módulo de elasticidad demuestran un buen comportamiento dúctil, una alta capacidad de absorción de energía y una mejor capacidad elástica de los morteros con residuos de fibras minerales frente a los morteros de referencia.
- Los ensayos han demostrado un buen comportamiento al fuego de los morteros confeccionados, la incorporación de estas fibras hace mantener las propiedades mecánicas adecuada para su uso y evita el comportamiento de desprendimiento explosivo de los morteros.
- Los morteros de la presente investigación presentan un buen comportamiento ante las heladas, característica importante para su uso en exteriores.
- Se comprueba que los morteros que incorporan residuos de fibras minerales tienen un mejor comportamiento, para los altos valores de adición del presente estudio, que los morteros que incorporan fibras comerciales de polipropileno.
- El éxito de la fabricación de estos materiales con residuos de lanas minerales como material secundario tendrá importantes implicaciones para el medio ambiente, resultando un material idóneo por su buena compatibilidad con la matriz de cemento.

CONCLUSIONES AL OBJETIVO 6

En cuanto al objetivo de analizar el comportamiento térmico del nuevo material:

- Los ensayos indican una mejora en el comportamiento térmico de los compuestos al disminuir de manera significativa su conductividad térmica, por lo que se sugiere como material para aplicaciones constructivas que requieran una mejora energética del edificio.

CHAPTER 7. CONCLUSIONS

The conclusions that can be drawn from the research hereby developed are summarized below, in accordance with the main objective set out for this Doctoral Thesis.

The main conclusion is that it is feasible -from the point of physical-mechanical and thermal sight- to incorporate waste mineral wool replacing part of the aggregate used in the manufacture of cement mortars, this represents an alternative with less environmental impact to the reinforcement fibers currently used for mortars.

In addition, the following partial conclusions are presented to meet the specific objectives set according to the methodology developed and the results obtained:

CONCLUSIONS OF OBJETIVE 1

Regarding the objective of analyze the feasibility of using fibers from mineral wool waste in cement mortars, establishing the appropriate dosages through the design of an experimental plan:

- With these eco-mortars it is possible to recycle up to 50% of the volume of the sand used, which means large savings of raw material and an increased recycling use of mineral wool.

CONCLUSIONS OF OBJETIVE 2

Regarding the objective of determining the properties of cement mortars with waste fibers for adaptation to the regulations in force:

- The physical and chemical analysis of mineral fibers show that their composition is similar to that of complementary cementing materials such as fly ash and silica fume, so it can be an adequate substitute for coarse and fine aggregates in a composite based on cement. Furthermore, there was found that the physical and chemical waste fiber characteristics

have not been altered in the usual process of storage in the landfill, so in this sense are presented suitable for use.

- Both the structure and chemical composition as the microstructure of the mortars additivated fiber is similar to the reference mortar, ie, there has not been any changes induced by the fibers, which may affect its functionality, so the use of recycled mineral wool as an additive in mortars is viable.

CONCLUSIONS OF OBJETIVE 3

Regarding the aim of studying the feasibility of compounds with recycled aggregate

- The use of recycled aggregate in the manufacture of additive mortars has been ruled out when it is verified that this significantly worsens their mechanical behavior.

CONCLUSIONS OF OBJETIVE 4

For the purpose of obtaining cement mortars with improved mechanical and thermal properties compared to the current mortars:

- The obtained compounds, although they reduce their mechanical resistance to compression, meet the minimum requirements demanded in the current regulations, remaining in values similar to the commercial mineral fibers used today.
- Recycled mortar's flexural strength is enhanced by the incorporation of this type of waste, as in other mortars with incorporated polymer and glass fibers commercial AR.

CONCLUSIONS OF OBJETIVE 5

As for the full characterization of new materials, it can be concluded that:

- Tests of fracture energy and modulus of elasticity show a good ductile behavior, a high energy absorption capacity and a better elastic capacity

of mortars with mineral fiber residues compared to those mortars without additive.

- Tests have shown a good performance of the mortars made with mineral wool when exposed to fire. The incorporation of these fibers keeps mortar's mechanical properties suitable for use and avoids explosive detachment of the mortars.
- Mortars of this research show good performance exposed to frost, an important feature for outdoor use.
- There has been verified that mortars that incorporate mineral fiber residues have a better performance, for the high values of addition of the present study, than mortars that incorporate commercial polypropylene fibers.
- The successful production of these materials with waste mineral wool as a secondary material will have important implications for the environment, resulting in a material suitable for its good compatibility with the cementitious matrix.

CONCLUSIONS OF OBJETIVE 6

About the aim of analyzing the thermal behavior of the new material:

- Tests indicate an improvement in the thermal behavior of the compounds, that reduces significantly its thermal conductivity, so it is suggested as material for construction applications requiring energy improvement of the building.

CAPÍTULO 8. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Como consecuencia de la investigación realizada y de las conclusiones obtenidas, se proponen las siguientes líneas de trabajo para futuras investigaciones:

- Con el objetivo de optimizar las propiedades de los compuestos de la fase 3 con árido reciclado, se propone el empleo de aditivos que puedan hacer estos compuestos mecánicamente viables y que permitan reducir la cantidad de agua del amasado y poder incluso aumentar la proporción de residuo empelado.
- En base a los buenos resultados térmicos obtenidos en la presente investigación, se propone el estudio pormenorizado del comportamiento al aislamiento acústico de los morteros de cemento con lanas minerales recicladas.
- Esta investigación puede ampliarse utilizando los residuos de lanas minerales como posibles cargas en la preparación de otros conglomerantes como hormigones ligeros.
- Realizar el ciclo de vida del nuevo material compuesto.
- Comprobar el comportamiento frente a la retracción de los morteros reciclados confeccionados.
- Realizar el estudio energético con otro programa informático, como por ejemplo el Desing Builder, que pueda realizar un análisis dinámico del comportamiento energético del material en una edificación.
- Analizar su aplicación en otros sistemas constructivos en los que suponga una mayor mejora energética.
- Realizar un estudio económico que valore la viabilidad económica de los morteros elaborados en esta Tesis Doctoral.

BIBLIOGRAFÍA

- AENOR, A. E. (1999). UNE EN 1015-6:1999. Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 6: Determinación de la densidad aparente del mortero fresco. España.
- AENOR, A. E. (1999). UNE EN 1015-7:1999. Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 7: Determinación del contenido en aire en el mortero fresco. España.
- AENOR, A. E. (1999). UNE EN 12370. Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la resistencia a la cristalización de las sales. España
- AENOR, A. E. (2000). UNE EN 1015-3:2000. Métodos de ensayo para morteros de albañilería. Parte 3: Determinación de la consistencia del mortero fresco (por la mesa de sacudidas). España.
- AENOR, A. E. (2000). UNE EN1015-11:2000. Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 11: Determinación de la resistencia a flexión y a compresión del mortero endurecido. España.
- AENOR, A. E. (2000). UNE EN-1015-9:2000. Métodos de ensayo de los morteros para albañilería: Parte 9: Determinación del periodo de trabajabilidad y del tiempo abierto del mortero fresco. España.
- AENOR, A. E. (2000). UNE EN 1015-10:2000. Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 10: Determinación de la densidad aparente en seco del mortero endurecido. España.
- AENOR, A. E. (2000). UNE EN 1365-4:2000. Ensayos de resistencia al fuego de los elementos portantes. Parte 4: Pilares. España.
- AENOR, A. E. (2003). UNE EN 1015-18:2003 . Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 18: Determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad del mortero endurecido. España.
- AENOR, A. E. (2003). UNE EN 1015-19:1999 . Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 19: Determinación de la permeabilidad al vapor de agua de los morteros endurecidos de revoco y enlucido. España.
- AENOR, A. E. (2004). UNE EN 13139/AC:2004. Áridos para morteros. España.
- AENOR, A. E. (2008). UNE EN 1347. Adhesivos para baldosas cerámicas. Determinación de la capacidad humectante. España.
- AENOR, A. E. (2008). UNE EN 146511:2008. Estabilidad de los áridos y fragmentos de roca frente a la acción de los ciclos de humedad-sequedad. España.
- AENOR, A. E. (2009). UNE EN 934-1:2009. Aditivos para hormigones, morteros y pastas. Parte 1: Requisitos comunes. España.
- AENOR, A. E. (2010). Especificaciones de los morteros para albañilería. Parte 1: Morteros para revoco y enlucido. España.
- AENOR, A. E. (2010). UNE EN 934-2:2010+A1:2012 . Aditivos para hormigones, morteros y pastas. Parte 2: Aditivos para hormigones. Definiciones, requisitos, conformidad, marcado y etiquetado. España.
- AENOR, A. E. (2010). UNE EN 934-3:2010+A1:2012. Aditivos para hormigones, morteros y pastas. Parte 3: Aditivos para morteros para albañilería. Definiciones, requisitos, conformidad, marcado y etiquetado. España.
- AENOR, A. E. (2010). UNE EN 998-1:2010 . Especificaciones de los morteros

- para albañilería. Parte 1: Morteros para revoco y enlucido. España.
- AENOR, A. E. (2011). UNE EN 197-1:2011. Cemento. Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes. España.
- AENOR, A. E. (2011). UNE EN 197-1:2011. Cemento. Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes. España.
- AENOR, A. E. (2011). UNE EN 12371:2011. Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la resistencia a la heladicidad. España.
- AENOR, A. E. (2012). UNE EN 1015-2:2012. Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 2: Toma de muestra total de morteros y preparación de los morteros para ensayo. España.
- AENOR, A. E. (2012). UNE EN 998-2:2012. Especificaciones de los morteros para albañilería. Parte 2: Morteros para albañilería. España.
- AENOR, A. E. (2012). UNE EN 933-1:2012. Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 1: Determinación de la granulometría de las partículas. Método del tamizado. España.
- AENOR, A. E. (2012). UNE EN 10456:2012. Materiales y productos para la edificación. Propiedades higrotérmicas. Valores tabulados de diseño y procedimientos para la determinación de los valores térmicos declarados y de diseño. (ISO 10456:2007). España.
- AENOR, A. E. (2013). UNE EN 12390:2013. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 1: Forma, dimensiones y otras características de las probetas y moldes. España.
- AENOR, A. E. (2014). UNE EN 13279-2:2014. Yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción. Parte 2: Métodos de ensayo. España.
- AENOR, A. E. (2015). UNE EN 1363-1. Ensayos de resistencia al fuego. Parte 1: Requisitos generales. España.
- AENOR, A. E. (2016). UNE EN 196-1. Métodos de ensayo de cementos. Parte 10: Determinación del contenido de cromo (VI) soluble en agua en cementos. España.
- Afelma. (2016). Asociación de Fabricantes Españoles de Lanasy Minerales Aislantes
- Alavedra, P. (1997). La construcción sostenible. El estado de la cuestión. Informes de la construcción.
- Albert Cuchí, Peter Sweatman. (2014). Informe GTR 2014. Claves para transformar el sector de la edificación en España.
- Álvarez, J.I.; Martín, A; García Casado, P.J. (1995). Historia de los morteros. Universidad de Navarra.
- Arizzi, Anna, and Giuseppe Cultrone. 2012. "La Influencia de La Interfase Árido-Matriz (ITZ) En Las Propiedades de Morteros de Cal." Revista de la sociedad española de minerología 16(junio): 60–61.
- Aydin, Serdar, Halit Yazici, and Bülent Baradan. 2008. "High Temperature Resistance of Normal Strength and Autoclaved High Strength Mortars Incorporated Polypropylene and Steel Fibers." Construction and Building Materials 22(4): 504–12.
- Ben Yair, M; Slatkine, A; Ben Yair, M;. (1961). Durability of Roman mortars and concretes for hydraulic structures at Caesarea and Tiberias.
- Bilodeau, A., V. K R Kodur, and G. C. Hoff. 2004. "Optimization of the Type and

- Amount of Polypropylene Fibres for Preventing the Spalling of Lightweight Concrete Subjected to Hydrocarbon Fire.” *Cement and Concrete Composites* 26(2): 163–74.
- Brandt, Andrzej M. 2008. “Fibre Reinforced Cement-Based (FRC) Composites after over 40 Years of Development in Building and Civil Engineering.” *Composite Structures* 86: 3–9.
- Bustillo Revuelta, M. (2008). *Hormigones y morteros*. Madrid: Fuego editores.
- Cáceres, J. M., J. E. G. Hernández, and J. M. Rincón. 1996. “Characterization of Fibers as Rockwool for Insulation Obtained from Canary Islands Basalts.” *Materiales De Construcción* 46(242–43): 61–78.
- C.Alonso, A. Hidalgo López &. (2005). Evaluación del impacto medioambiental debido a la lixiviación de productos base cemento. Instituto Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja.
- Carsana, Maddalena, Massimiliano Frassoni, and Luca Bertolini. 2014. “Comparison of Ground Waste Glass with Other Supplementary Cementitious Materials.” *Cement and Concrete Composites* 45: 39–45. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.09.005>.
- Cebrián, Fernando Muñoz. 2011. “Comportamiento Mecánico Del Hormigón Reforzado Con Fibra de Polipropileno Multifilamento: Influencia Del Porcentaje de Fibra Adicionado.” : 82.
- CEN. (1 de Febrero de 2017). Comité Europeo de Normalización. Obtenido de www.cen.eu: <http://www.cen.eu/>
- Cervantes, María del Rosario Leyva. 2014. “Durabilidad de Compuestos a Base de Matrices Minerales Reforzados Con Fibras Naturales.” Universidad autónoma de nuevo león.
- Chaipanich, Arnon, and Thanongsak Nochaiya. 2010. “Thermal Analysis and Microstructure of Portland Cement-Fly Ash-Silica Fume Pastes.” *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 99: 487–93.
- Chen, Q. Y. et al. 2007. “Characterisation of Products of Tricalcium Silicate Hydration in the Presence of Heavy Metals.” *Journal of Hazardous Materials* 147: 817–25.
- Cheng, An, Wei Ting Lin, and Ran Huang. 2011. “Application of Rock Wool Waste in Cement-Based Composites.” *Materials and Design* 32(2): 636–42. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2010.08.014>.
- Claramunt Blanes, Josep. 2013. “Estructuras No Tejidas de Fibras Naturales Como Refuerzo Para Compuestos de Cemento de Elevada Ductilidad.” In *Actas Del X Congreso Nacional de Materiales Compuestos Celebrado En Algeciras El 2, 3, 4 y 5 de Julio de 2013*, , 317–321.
- Claramunt, Josep, Romildo Dias, and Toledo Filho. 2015. “Cellulosic Fiber Reinforced Cement-Based Composites : A Review of Recent.” *Construction and Building Materials* 79: 115–28.
- Corning, O. (31 de Enero de 2017). www.owenscorning.com. Obtenido de <https://www.owenscorning.com/>
- Cortina, M. G., & de Villanueva Domínguez, L. (2002). Aired-time and chamotte hydraulic mortars. *Materiales de Construcción*, 52(266), 65-76.
- Crespo, D. C. (2016). La economía circular, la clave del crecimiento sostenible. *Cemento Hormigón*, 2-3.
- Ding, Yining et al. 2016. “Influence of Different Fibers on the Change of Pore Pressure of Self-Consolidating Concrete Exposed to Fire.” *Construction and Building Materials* 113: 456–69.

- <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.070>.
- Eloy Asensio, M. F. (2016). Evaluación de la gestión de los residuos de construcción y demolición en España en el ámbito de una economía circular. *Cemento Hormigón*, 52-53.
- España, G. d. (2005). Real Decreto 312/2005. Real Decreto 312/2005, de 18 de marzo, por el que se aprueba la clasificación de los productos de construcción y de los elementos constructivos en función de sus propiedades de reacción y de resistencia frente al fuego. España.
- España, G. d. (2008). RC-08. Instrucción para la recepción de cementos. España.
- España, G. d. (2008). Real Decreto 105/2008, de 1 de febrero, por el que se regula la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición.s.l.:s.n.
- Estado, J. d. (2011). Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados. BOE p.56.
- Europea, C. (2010). Comunicado de la Comisión.Europa 2020. Una estrategia para un crecimiento inteligente, sostenible e integrador. Bruselas.
- Europea, C. (2015). Propuesta de Directiva del parlamento Europeo y del Consejo por la que se modifica la Directiva 2008/98/CE,sobre los residuos. Bruselas.
- Europea, U. (2008). Directiva 2008/98/CE. Boletín oficial de la Union Europea.
- Europea., C. (2015). Cerrar el círculo: un plan de acción de la Comisión al Parlamento Europeo, al Consejo, al Comité Económico y Social Europeo y al Comité de las Regiones. Bruselas.
- Fabricio, Hernán. 2014. "Análisis de La Resistencia Mecánica Del Concreto Con Adición de Fibras de Pambil." U niversidad nacional de Loja Área de la Energía, las Industrias y los Recursos Naturales No Renovables.
- Fomento, M. d. (2006). CTE. Código Técnico de la Edificación de España. España.
- Fomento, M. d. (2014). Estrategia a largo plazo para la rehabilitación energética en el sector de la edificación en España en desarrollo del artículo 4 de la Directiva2012/27/UE.
- Frías, Moisés, Raquel Vigil de la Villa, Rosario García, and M.Isabel Sánchez de Rojas. 2013. "The Influence of Slate Waste Activation Conditions on Mineralogical Changes and Pozzolaníc Behavior." *American ceramic society* 96(7): 2276–82.
- Furlan, F., & Alou, V. (1989). *Matériaux de Construction*. Chapitre II: Liants Minéraux. Lausanne: Ecole Polytechnique Federale de Lausanne.
- Furlan, V. (1990). Causes. mechanisms and measurement of damage in cultural heritage materials. The state of the art-Mortars, bricks and renderings. Advanced workshop "Analytical Methodologies for the Investigation of Damaged Stones".
- Gadea, J. et al. 2010. "Reactividad Árido-Álcali En Áridos Empleados Para Hormigón." *Materiales de Construcción* 60(299): 69–78. <http://materconstrucc.revistas.csic.es/index.php/materconstrucc/article/view/427/474>.
- Galán Gutierrez, L., & Amador Blanco, J. (1994). *Hormigón*. Madrid.
- Galindo, J. I. Á., Pérez, A. M., & Casado, P. J. G. (1995). 52. Historia de los morteros. *revista PH*, (13).
- Hincapié, A., & Aguja, E. (2003). Agregado reciclado para morteros. *Revista*

- Universidad EAFIT, 39(132), 76-89.
- Gutiérrez-González, S. et al. 2012. "Lightweight Plaster Materials with Enhanced Thermal Properties Made with Polyurethane Foam Wastes." *Construction and Building Materials* 28(1): 653–58.
- IDAE. (2011). Análisis del consumo energético del sector residencial en España. Informe final. Proyecto SECH-SPAHOUSEC.
- IECA. (3 de Febrero de 2017). Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones. Obtenido de www.ieca.es: https://www.ieca.es/gloCementos.asp?id_rep=179
- Iousef, S., H. Montazeri, B. Blocken, and P. J.V. van Wesemael. 2017. "On the Use of Non-Conformal Grids for Economic LES of Wind Flow and Convective Heat Transfer for a Wall-Mounted Cube." *Building and Environment* 119: 44–61. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.04.004>.
- Jelle, Bjørn Petter. 2011. "Traditional, State-of-the-Art and Future Thermal Building Insulation Materials and Solutions - Properties, Requirements and Possibilities." *Energy and Buildings* 43: 2549–63.
- Jennings, Hamlin M., and Jeffrey W. Bullard. 2011. "From Electrons to Infrastructure: Engineering Concrete from the Bottom Up." *Cement and Concrete Research* 41: 727–35. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.03.025>.
- Jiménez, J. R. et al. 2013. "Use of Fine Recycled Aggregates from Ceramic Waste in Masonry Mortar Manufacturing." *Construction and Building Materials* 40: 679–90.
- Junco Petrement, C. (2012). Morteros aligerados con residuos. Burgos: Tesis doctoral.
- Kim, Hongseop et al. 2015. "Static Mechanical Properties and Impact Resistance of Amorphous Metallic Fiber-Reinforced Concrete." *Composite Structure* 134: 831–44. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.08.128>.
- Kosior-kazberuk, Marta, and Julita Krassowska. 2015. "Fracture Behaviour of Basalt and Steel Fibre Reinforced Concrete." *Budownictwo i Inżynieria Środowiska* 6: 73–80.
- Laffarga Osteret, J., & Olivares Santiago, M. (1995). *Materiales de construcción*. Sevilla: Editan, S.A.
- Lataste, Stephanie J Barnett Jean-francois, Tony Parry, Steve G Millard, and Marios N Soutsos. 2010. "Assessment of Fibre Orientation in Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete and Its Effect on Flexural Strength." *Materials and Structures*: 1009–23.
- Lin, Wei Ting, An Cheng, Ran Huang, Yuan Chieh Wu, et al. 2013. "Rock Wool Wastes as a Supplementary Cementitious Material Replacement in Cement-Based Composites." *Computers and Concrete* 11(2): 93–104.
- Lin, Wei Ting, An Cheng, Ran Huang, and Si Yu Zou. 2013a. "Improved Microstructure of Cement-Based Composites through the Addition of Rock Wool Particles." *Materials Characterization* 84: 1–9.
- López-Buendía, Angel M., María Dolores Romero-Sánchez, Verónica Climent, and Celia Guillem. 2013. "Surface Treated Polypropylene (PP) Fibres for Reinforced Concrete." *Cement and Concrete Research* 54: 29–35. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.08.004>.
- López-Moreno, H. (2015). Thermal Behavior of a Ventilated Façade Using Perforated Ceramic Bricks. *International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering*, 875-880.

- M. Coronado, E. Dosal, A. Coz, J.R. Viguri, A. Andrés. (2011). Estimation of Construction and Demolition Waste Generation and Multicriteria Analysis of C&DW Management Alternatives: A Case Study in Spain. *Waste and Biomass Valorization*, 209-255.
- Majumdar, AJ, and JR Ryder. 1968. "Glass Fibre Reinforcement of Cement Products." *Glass Technol* 9(3): 78–84.
- Mana Halvaei, Masoud Jamshidi, Masoud Latifi. 2014. "Application of Low Modulus Polymeric Fibers in Engineered Cementitious Composites." *Journal of Industrial Textiles* 43(4): 511–24.
- Marino, M. d. (2009). II Plan Nacional Integrado de Residuos (IIPNIR) 2008-2015. BOE nº49, p.124.
- Martínez, Iván, Miren Etxeberria, Elier Pavón, and Nelson Díaz. 2013. "A Comparative Analysis of the Properties of Recycled and Natural Aggregate in Masonry Mortars." *Construction and Building Materials* 49: 384–92.
- Melián, G, and G Barluenga. 2010. "Aumento de La Tenacidad de Hormigones Autocompactables Reforzados Con Fibras Cortas de Polipropileno Toughness Increase of Self Compacting Concrete Reinforced with Polypropylene Short Fibers." *Materiales de construcción. (Madrid)* 60: 83–97.
- Ministerio de Agricultura, A. y. (2015). Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos (PEMAR) 2016-2022. BOE nº 297 (12/12/2015).
- Ministerio de Fomento. (2008). EHE-08. Instrucción de Hormigón Estructural. España.
- Ministerio de Industria, E. y. (s.f.). www.idae.es.
- Mobasher, Barzin, and Surendra P. Shah. 1989. "Test Parameters for Evaluating Toughness of Glass-Fiber Reinforced Concrete Panels." *ACI Materials Journal* 86(5).
- Montenegro, M. C. (2016). Viabilidad de aplicación de materiales reciclados y cenizas de biomasa en la fabricación de materiales. Tesis doctoral. Córdoba.
- Muller, A; Leydolph, B; Stanelle, K;. (2009). Recycling mineral wood waste-Technologies for the conversion of the fiber structure, Part 1. *Interceram*, Volumen 58, 378-381.
- Muñoz-Ruipérez, C., A. Rodríguez, S. Gutiérrez-González, and V. Calderón. 2016. "Lightweight Masonry Mortars Made with Expanded Clay and Recycled Aggregates." *Construction and Building Materials* 118: 139–45.
- M.Yeheyis. (2013). An overview of construction and demolition waste management in Canadá: a lifecycle analysis approach to sustainability. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 15, 81-91.
- Nadal Gisbert, A. et al. 2014. "Analysis Behaviour of Static and Dynamic Properties of Ethylene-Propylene-Diene-Methylene Crumb Rubber Mortar." *Construction and Building Materials* 50: 671–82. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.018>.
- N.Calvo. (2014). A Dynamic Model for Construction and Demolition Waste Management in Spain: Driving Policies Based on Economic Incentives and Tax Penalties. *Sustainability*.
- Naranjo Paredes, A. (2016). Estudio de la aplicabilidad de materiales compuestos en la edificación. Hormigón reforzado con fibra de vidrio. Barcelona.
- Nixon, P.J. 1976. "The Use of Materials from Demolition in Construction."

- Resources Policy 2(4): 276–83.
- Osseni, Sibiath O. G. q, Clement Ahouannou, Emile A. Sanya, and Yves Jannot. 2016. "Investigation on the Use of Cement Mortar Containing Banana Fibers as Thermal Insulator in Building." *International Journal of Advanced Research* 4(11): 1142–52.
<http://www.journalijar.com/article/13306/investigation-on-the-use-of-the-cement-mortar-containing-banana-fibers-as-thermal-insulator-in-building/>.
- Panel), U. N. (2016). *Global Material Flows and Resource Productivity*. Paris.
- Pakravan, H. R., M. Jamshidi, and M. Latifi. 2012. "Investigation on Polymeric Fibers as Reinforcement in Cementitious Composites: Flexural Performance." *Journal of industrial textiles* 42(1): 3–18.
- Pane, Ivindra, and Will Hansen. 2005. "Investigation of Blended Cement Hydration by Isothermal Calorimetry and Thermal Analysis." *Cement and Concrete Research* 35: 1155–64.
- Panesar, D. K., and B. Shindman. 2012. "The Mechanical, Transport and Thermal Properties of Mortar and Concrete Containing Waste Cork." *Cement and Concrete Composites* 34(9): 982–92.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.06.003>.
- Paredes, Alexandra Naranjo. 2016. "Trabajo Final de Master: Estudio de La Aplicabilidad de Materiales Compuestos En La Edificación."
- Petrement, C. J. (2012). *Morteros aligerados con residuos de espumas rígidas de poliuretano: obtención, caracterización y puesta en obra* (Doctoral dissertation, Universidad de Burgos).
- Piñeiro, Sonia Romaniega, Mercedes Del Río Merino, and Cristina Pérez García. 2015. "New Plaster Composite with Mineral Wool Fibres from CDW Recycling." *Advances in Materials Science and Engineering* 2015.
- Ploger, Robert Riis. 1947. "An Investigation of the Compressive Strength of Concrete in Which Concrete Rubble Was Used as Aggregate." Cornell University.
- Porras-Amores, César. 2014. "Las Construcciones Subterráneas Para Bodegas, Un Modelo de Ahorro de Energía Mediante Los Sistemas Constructivos. Estudio de Las Condiciones Higrotérmicas, Ventilación y Modelos de Simulación." Universidad politécnica de madrid escuela.
- Presidencia, M. d. (2008). Real Decreto 105/2008, de 1 de febrero, por el que se regula la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición. BOE nº38,13/02/2008, Boletín Oficial del Estado, España, p.7.
- Puertas, F, T Amat, and T Vazquez. 2000. "Comportamiento de Morteros de Cementos Alcalinos Reforzados Con Fibras Acrílicas y de Polipropileno." *Materiales de construcción*. (Madrid) 50(259): 69–84.
<http://materconstrucc.revistas.csic.es/recursos.biblioteca.upc.edu/index.php/materconstrucc/article/view/400/446>.
- Ragai, J; Ghorab, H.Y.; Antar, A;. (1987). Surface and bulk properties of ancient egyptian mortars. Part II: adsorption and infrared studies. *Cement and Concrete Research*, 17: 12-21.
- Ramachandran, V.S., R.M. Paroli, J.J. Beaudoin, and A.H. Delgado. 2002. "Formation and Hydration of Cement and Cement Compounds." In *Handbook of Thermal Analysis of Construction Materials*, William Andrew Inc., 71–142.
- Rebeiz, Karim S., Amy S. Banko, and Andrew P. Craft. 2005. "Thermal Properties of Polymer Mortar Using Recycled PET and Fly Ash." *Journal of*

- Materials in Civil Engineering 7(2).
- Río Merino, M. (1999). Elaboración y aplicaciones constructivas de paneles prefabricados de escayola aligerada y reforzada con fibra de vidrio E y otros aditivos. Madrid.
- Río Merino, M. (2010). La regulación jurídica de los residuos de construcción demolición (RCD) en España.El caso de la Comunidad de Madrid. Informes de la Construcción, 81-86.
- Río Merino, M; Izquierdo Gracia, P; Acebedo;. (2010). Sustainable construction: construction and demolition waste reconsidered". Waste Management & Research, 118-129.
- Río Merino, Mercedes, Jaime Santa Cruz Astorqui, and Mariano González Cortina. 2005. "Morteros Aligerados Con Arcilla Expandida: Influencia de La Granulometría y La Adicción de Fibras de Vidrio AR En El Comportamiento Mecánico." Informes de la Construcción 57(497): 39–46.
- ROCKWOOL. (31 de Enero de 2017). www.rockwool.es. Obtenido de <http://www.rockwool.es/por+que+rockwool/lana+de+roca?>
- Romaniega Piñeiro, S. (2006). Refuerzo de la escayola mediante fibras de lana mineral procedentes de reciclaje de RCD.
- Romualdi, JP, and GB Batson. 1963. "Mechanics of Crack Arrest in Concrete Beam with Closely Spaced Reinforcement." J. Am. Inst 60: 775–89.
- Rougeron, C. (1977). Aislamiento acústico y térmico en la construcción. Reverte.
- Rouquerol., F. et al. 2014. Adsorption by Powders and Porous Solids. Principles, Methodology and Applications. Second Edi. Elsevier Ltd.
- Saint-Gobain, I. (s.f.).
- Sal'nikov, V. (2003). Properties of mineral wool after long operation in walls of buildings in Middle Ural region. Build Mater (Stroitel'nye Materialy), 42-43.
- San Antonio González, A. D. (2017). Caracterización de compuestos eco-eficientes de yeso aligerado con residuo de poliestireno extruido (XPS) (Doctoral dissertation, Edificacion).
- Sánchez Paradela, M. Laura, and Alfonso Del Águila. 1992. "El Envejecimiento de Las Pastas de Cemento Reforzadas Con Fibras de Vidrio." Informes de la Construcción 42(226): 65–71.
- Sánchez Paradela, M. Laura, and Vicente Sánchez Gálvez. 1991. "Comportamiento a Tracción De Cementos Reforzados Con Fibras De Vidrio." Consejo Superior de Investigaciones Científicas 43(413): 13.
- Santa Cruz Astorqui, Jaime, and César Porras-Amores. 2017. "Ventilated Façade with Double Chamber and Flow Control Device." Energy and Buildings 149: 471–82. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.04.063>.
- Serrano, Rubén, Alfonso Cobo, María Isabel Prieto, and María de las Nieves González. 2016. "Analysis of Fire Resistance of Concrete with Polypropylene or Steel Fibers." Construction and Building Materials 122: 302–9.
- Siligardi, Cristina, Paola Miselli, Elena Francia, and Magdalena Lassinantti Gualtieri. 2017. "Temperature-Induced Microstructural Changes of Fiber-Reinforced Silica Aerogel (FRAB) and Rock Wool Thermal Insulation Materials: A Comparative Study." Energy and Buildings 138: 80–87. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.12.022>.
- Silva, J, J de Brito, and R Veiga. 2010. "Recycled Red-Clay Ceramic

- Construction and Demolition Waste for Mortars Production.” *Journal of Materials in Civil Engineering* 22(3): 236–44.
- Souza, L. P D F, and H. S. Mansur. 2004. “Production and Characterization of Ceramic Pieces Obtained by Slip Casting Using Powder Wastes.” *Journal of Materials Processing Technology* 145(1): 14–20.
- Tam, V. W. (2009). Physio-chemical reactions in recycle aggregate concrete 163(2). *Journal of Hazardous*, 823-828.
- Team, B. (2012). What Makes a Product Green? *Enviromental Building News*. The leading Newsletter on Environmentally Responsible Desing & Construction.21.
- Tejedor, S. P. (2013). Solución para hoja exterior de fachada pacotherm v e-grc. II Jornada sobre innovación en el sector del yeso.
- Terrados, F., & Moreno, D. (2014). "Patio" and "Botijo": Energetic strategies' architectural integration in "Patio 2.12" prototype. *Energy and Buildings*, 70-88.
- Tominaga, Yoshihide, and Bert Blocken. 2015. “Wind Tunnel Experiments on Cross-Ventilation Flow of a Generic Building with Contaminant Dispersion in Unsheltered and Sheltered Conditions.” *Building and Environment* 92: 452–61. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.05.026>.
- Valenciana, G. (2008). Revisión del Plan Integral de Residuos.
- Väntsi, O., & Kärki, T. (2014). Mineral wool waste in Europe: a review of mineral wool waste quantity, quality, and current recycling methods. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 62-72.
- Väntsi, O., & Kärki, T. (2014). Utilization of recycled mineral wool as filler in wood-polypropylene composites. *Construction and Building Materials*, 193(3), 448-461.
- Vessalas, K. et al. 2009. “Pozzolanic Reactivity of the Supplementary Cementitious Material Pitchstone Fines by Thermogravimetric Analysis.” *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 97(1): 71–76.
- Villoria Sáez, P. (2014). Sistema de gestión de residuos de construcción y demolición en obras de edificación residencial. Buenas prácticas en la ejecución de obra.
- Villoria Sáez, P; del Río Merino, M; Porras Amores, C;. (2012). Estimation of construction and demolition waste volume generation in new residential buildings in Spain. *Waste Management & Research*.
- Visakh, P. M., Sabu Thomas, Kristiina Oksman, and Aji P. Mathew. 2012. “Crosslinked Natural Rubber Nanocomposites Reinforced with Cellulose Whiskers Isolated from Bamboo Waste: Processing and Mechanical/Thermal Properties.” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 43(4): 735–41. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesa.2011.12.015>.
- Vitrubio Polión, Marco. 2001. *Compendio de Los Diez Libros de Arquitectura de Vitrubio*.
- Wang, Ru, and Christian Meyer. 2012. “Performance of Cement Mortar Made with Recycled High Impact Polystyrene.” *Cement and Concrete Composites* 34(9): 975–81. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.06.014>.
- Wei-Ting Lin, An Cheng, Ran Huang, Yuan-Chieh Wu, & Ta-Yuan Han. (2012). Rock wool wastes as a supplementary camentitious material replacement in cement-based composites. *Computers and Concrete*, Vol10,nº4, 401-

411.

- Xiaochun, Qin, Li Xiaoming, and Cai Xiaopei. 2017. "The Applicability of Alkaline-Resistant Glass Fiber in Cement Mortar of Road Pavement: Corrosion Mechanism and Performance Analysis." *International Journal of Pavement Research and Technology* 10(6): 536–44. <https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2017.06.003>.
- Yáñez, G. (2008). *Arquitectura solar e Iluminación natural. Conceptos, Métodos y Ejemplos*. Madrid, España: Munilla Lería.
- Zhao, Zengfeng, Sébastien Remond, Denis Damidot, and Weiya Xu. 2015. "Influence of Fine Recycled Concrete Aggregates on the Properties of Mortars." *Construction and Building Materials* 81: 179–86. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.037>.

INDICIOS DE CALIDAD

Congresos y conferencias científicas:

- Autores: Carolina Piña Ramírez; Mercedes del Río Merino; Carmen Viñas Arrebola; Evangelina Atanes Sánchez; Alejandra Vidales Barriguete.

Título: New cement mortar reinforced with mineral wool fibres from cdw recycling

Tipo de participación: Ponencia y artículo.

Congreso: IV International Congress on Construction and Building Research (COINVEDI 2017)

Lugar de celebración: Escuela Politécnica Superior de Ingeniería, Sección de Arquitectura Técnica, de la Universidad de La Laguna (Tenerife).

ISSN: en elaboración

Revisión por pares

Fecha: 14 y 15 de diciembre de 2017

Páginas: en elaboración. Título de las Actas: en elaboración

- Autores: Carolina Piña Ramírez; Evangelina Atanes Sánchez; Marta Kosior-Kazberuk; Dorota Małaszkiwicz.

Título: Characterization of the porous structure of cement mortars additivated with architectural residues insulated from mineral wool.

Tipo de participación: Póster.

Congreso: III International Conference on Technological Innovation in Building (CITE 2018)

Lugar de celebración: Escuela Técnica Superior de Edificación de la Universidad Politécnica de Madrid.

ISSN: 978-84-163-9771-6 / M-7604-2018

Revisión por pares

Fecha: 7, 8 y 9 de marzo de 2018

Páginas: 145-146. Título de las Actas: CITE 2018 - III International Conference on Technological Innovation in Building

- Autores: Marta Kosior-Kazberuk; Julita Krassowska; Carolina Piña Ramírez.

Título: Post cracking behaviour of fibre reinforced concrete with mineral wool fibers residues.

Tipo de participación: Ponencia y artículo.

Congreso: 3rd Scientific Conference Environmental Challenges in Civil Engineering (ECCE 2018).

Lugar de celebración: Faculty of Civil Engineering and Architecture of the Opole University of Technology. Opole, Poland.

ISSN: 978-83-937864-2-8

Revisión por pares

Fecha: 23, 24 y 25 de abril de 2018

Páginas: 78. Título de las Actas: 3rd Scientific Conference Environmental Challenges in Civil Engineering (ECCE).

Publicaciones científicas:

- Autores: Carolina Piña Ramírez; Evangelina Atanes Sánchez; Mercedes del Río Merino; Carmen Viñas Arrebola; Alejandra Vidales Barriguete.

Título: "Feasibility of the use of mineral wool fibres recovered from CDW for the reinforcement of conglomerates by study of their porosity".

Revista: Construction and Building Materials.

(Cuartil Q1) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.026>

- Autores: Carolina Piña Ramírez; Mercedes del Río Merino; Carmen Viñas Arrebola; Alejandra Vidales Barriguete; Marta Kosior-Kazberuk.

Título: "Analysis of the mechanical behaviour of the cement mortars with additives of mineral wool fibres from recycling of CDW".

Revista: Construction and Building Materials.

(Cuartil Q1)

SIGLAS Y ACRÓNIMOS

AENOR	Asociación Española de Normalización y Certificación
AFELMA	Asociación Española de fabricantes de lanas minerales asilantes
ANFAH	Asociación Nacional de fabricantes de aditivos para el hormigón y cemento
AT	Aislamiento térmico
BH	Bloque de hormigón
C	Cámara de aire
CCAA	Comunidades Autónomas
CNUDMAD	Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo
CSIC	Consejo Superior de Investigaciones Científicas
CTE	Código Técnico de la Edificación
EHE	Instrucción de Hormigón Estructural
EPS	Poliestireno Expandido
EUROSTAT	Oficina Europea de Estadística
FG	Fiber Glass
IDAE	Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía
IECA	Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones
IRP	Panel Internacional de Recursos
ISO	International Organization for Standardization
LER	Lista Europea de Residuos
LH	Ladrillo Hueco
PEMAR	Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos
PET	Politereftalato de Etilo
PNIR	Plan Nacional Integral de Residuos de España
PNRCD	Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición
PNUMA	Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente
RAE	Real Academia Española
RCD	Residuos de construcción y demolición
RD	Real Decreto
REF	Referencia
RM	Enfoscado

RI	Guarnecido y enlucido
RW	Rock Wool
SEM	Scanning Electron Microscopy
UE	Unión Europea
UNE	Una Norma Española
UNEP	United Nations Environment Programme
UPM	Universidad Politécnica de Madrid

LISTADO DE TABLAS Y FIGURAS

Listado de tablas:

Tabla 1. Generación y gestión de residuos de construcción y demolición en 2012. Fuente: Plan estatal marco de gestión de residuos (PEMAR 2016-2022).	13
Tabla 2. Número de instalaciones de transferencia, de tratamiento y vertederos que reciban RCD en 2013. Fuente: Plan estatal marco de gestión de residuos (PEMAR 2016-2022).	14
Tabla 3. Características técnicas de los materiales aislantes de origen sintético. Fuente: Elaboración propia.	22
Tabla 4. Características técnicas de los materiales aislantes de origen vegetal. Fuente: Elaboración propia.	24
Tabla 5. Características técnicas de los materiales aislantes de origen animal. Fuente: Elaboración propia.	25
Tabla 6. Características de los materiales aislantes de origen inorgánico. Fuente: Elaboración propia.	26
Tabla 7. Características de la lana de roca y la lana de vidrio (Isover Saint-Gobain, 2017; Rockwool firesafe insulation, 2017).	29
Tabla 8. Cementos recomendados para la fabricación de hormigones de tipo no estructural. Fuente: RC-08 (2008).	41
Tabla 9. Cementos recomendados para la fabricación de morteros de albañilería. Fuente: RC-08 (2008).	41
Tabla 10. Componentes y características. Fuente: Antonio Miravete, “Los nuevos materiales en la Construcción” (2002).	50
Tabla 11. Probetas confeccionadas Fase 2.	86
Tabla 12. Factores de la matriz.	88
Tabla 13. Probetas confeccionadas Fase 3.	89
Tabla 14. Probetas confeccionadas Fase 4 (FE: ensayo de fractura y MY: ensayo de módulo de Young).	91
Tabla 15. Probetas confeccionadas Fase 5 (F: ensayo al fuego; H: ensayo heladicidad; CS: ensayo cristalización de sales; PER: ensayo permeabilidad al vapor de agua; AD: resistencia adhesión; AO: contenido aire ocluido; T: periodo de trabajabilidad; POL: ensayos con polipropileno).	93
Tabla 16. Datos de elementos constructivos. Fuente: Instituto Eduardo Torroja (2007).	96
Tabla 17. Análisis del agua de la Comunidad de Madrid. Fuente: Canal de Isabel II (2017).	100
Tabla 18. Resultados del ensayo de densidad aparente.	133
Tabla 19. Resultados del ensayo de densidad real de los materiales utilizados.	134
Tabla 20. Composición química de las fibras, la arena y el cemento empleados.	137
Tabla 21. Tamaño de las fibras transformadas.	144
Tabla 22. P-valores del análisis estadístico de la muestra para la variable dependiente de densidad.	146
Tabla 23. P-valores del análisis estadístico de la muestra para la variable dependiente de dureza superficial.	149

Tabla 24. P-valores del análisis estadístico de la muestra para la variable dependiente de resistencia a flexión.	152
Tabla 25. P-valores del análisis estadístico de la muestra para la variable dependiente de resistencia a compresión.	155
Tabla 26. Resultados de la caracterización microestructural de los morteros de referencia y de los morteros con el 30% de residuo de fibras minerales.	170
Tabla 27. Macroporos y mesoporos de los morteros.	171
Tabla 28. Parte elástica y plástica de la energía de fractura GF hasta la propagación de grietas.	182
Tabla 29. Valores del Módulo de Young (MPa).	185
Tabla 30. Pérdida de resistencia a flexión ensayo de heladicidad.	191
Tabla 31. Pérdida de peso de las probetas tras el ensayo de cristalización de sales.	192
Tabla 32. Pérdida de resistencia a flexión ensayo cristalización de sales.	193
Tabla 33. Resultado ensayo de permeabilidad al vapor de agua.	195
Tabla 34. Resistencia a la adhesión de los morteros.	196
Tabla 35. Resultados del contenido de aire ocluido en estado fresco.	196
Tabla 36. Resultados periodo de trabajabilidad de los morteros.	197
Tabla 37. Datos bloques de mortero de cemento de los resultados de la investigación.	201

Listado de figuras:

Figura 1. Global material extraction (DE) by four material categories, 1970–2010, million tonnes. Fuente: UNEP (2016).	3
Figura 2. Límites de las emisiones de gases de efecto invernadero de los Estados miembros en 2020 en el marco de la Decisión de Reparto del Esfuerzo. Fuente: Decisión n.º 406/2009/CE.	4
Figura 3. Correlación entre consumo energético y PBI en España. Fuente: Investigación y Ciencia, 2012.	6
Figura 4. Generación de residuos por actividades económicas y hogares, EU-28, 2014. Fuente: Eurostat, 2017.	7
Figura 5. Tratamiento de residuos en la UE-28, 2014 (millones de toneladas). Fuente: European Comission, 2017.	8
Figura 6. Cantidad total de residuos generados en el sector de la construcción, en toneladas, en los países de la UE en el 2014. Fuente: Eurostat 2016.	12
Figura 7. Complejo de Tratamiento Integral de Residuos de Construcción y Demolición en El Molar. Fuente: Elaboración propia.	15
Figura 8. Jerarquía de los residuos. Fuente: Agencia Europea de Medio Ambiente, 2014.	16
Figura 9. Proceso de fabricación de la lana de roca. Fuente: Rockwool, 2015.	31
Figura 10. Proceso de fabricación de la lana de vidrio. Fuente: Afelma, 2017.	32
Figura 11. Esquema de las fases del plan experimental y su relación con los objetivos establecidos.	81
Figura 12. Triturado de los residuos de fibras minerales: lana de vidrio (izquierda) y lana de roca (derecha).	82
Figura 13. Esquema de los ensayos de la Fase 1.	83

Figura 14. Determinación de la consistencia de las mezclas y probetas confeccionadas.	85
Figura 15. Esquema de los ensayos de la Fase 2.....	87
Figura 16. Esquema de los ensayos de la Fase 3.....	90
Figura 17. Confección de probetas de Módulo de Young y energía de fractura.	91
Figura 18. Esquema de los ensayos de la Fase 4.....	92
Figura 19. Esquema de los ensayos de la Fase 5.....	94
Figura 20. Confección de probetas con fibras de polipropileno.....	95
Figura 21. Modelo de referencia en fachada. Fuente: Catálogo de elementos constructivos del CTE. Ministerio de Fomento (2011).	96
Figura 22. Cementos Portland empleados en la fase experimental.	98
Figura 23. Arena de río lavada empleada en la confección de los morteros. ...	99
Figura 24. Centro de tratamiento integral de residuos situado en El Molar en Madrid.	102
Figura 25. Materias primas pesadas en las balanzas analíticas.	103
Figura 26. Estereopícnómetro.	104
Figura 27. Microscopio electrónico.....	105
Figura 28. Preparación de muestras de los morteros a ensayar.	106
Figura 29. Instrumental de laboratorio para el análisis granulométrico.	106
Figura 30. Ensayo de mesa de sacudidas según norma UNE EN-1015-3.....	108
Figura 31. Confección de las muestras a ensayar.	109
Figura 32. Porosímetro empleado en el ensayo.....	109
Figura 33. Balanza empleada en el ensayo de densidad aparente.....	110
Figura 34. Ensayo de aire ocluido del mortero fresco.	111
Figura 35. Instrumental ensayo periodo de trabajabilidad.	112
Figura 36. Probetas saturadas y cálculo del peso saturado-sumergido.	113
Figura 37. Determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad.	114
Figura 38. Probetas confeccionadas y nitrato de potasio empleado.	116
Figura 39. Ensayo de Termogravimetría. TDA-DSC.	117
Figura 40. Equipo de Difracción de rayos X y preparación de muestras.	118
Figura 41. Ensayo de Fluorescencia de rayos X.	118
Figura 42. Llenado de probetas sobre compactadora mecánica.....	119
Figura 43. Curado de probetas en cámara húmeda.....	120
Figura 44. Maquinaria utilizada para ensayos a flexión y compresión.	121
Figura 45. Ensayo de cálculo del Módulo secante de elasticidad en compresión.	122
Figura 46. Preparación de probetas y maquinaria del ensayo de comportamiento de fractura.....	124
Figura 47. Rasillones con mortero para ensayo adhesión.....	125
Figura 48. Durómetro Shore D.	125
Figura 49. Probetas en cámara frigorífica.	126
Figura 50. Probetas en disolución salina.....	128
Figura 51. Ensayo para el cálculo de la conductividad térmica.....	129
Figura 52. Ensayo de resistencia al fuego.....	130
Figura 53. Línea granulométrica de las arenas de río empleadas.....	135
Figura 54. Curva granulométrica de las arenas recicladas empleadas.	136
Figura 55. DRX del cemento CEM II/B-L 32,5N.	139

Figura 56. DRX de los residuos de fibras: lana de roca (RW), fibra de vidrio (FG) y mezcla de fibras (MIX).	139
Figura 57. Análisis térmico del cemento.	141
Figura 58. Análisis térmico de los residuos de lana de roca, fibra de vidrio y mezcla de fibras (de arriba abajo respectivamente).	143
Figura 59. Microscopía SEM de las fibras (de arriba abajo: lana de roca, fibra de vidrio, mezcla de fibras).	144
Figura 60. Densidad real de los compuestos.	146
Figura 61. Comprobación de homogeneidad de las varianzas de cada nivel de densidad.	147
Figura 62. Gráfico de probabilidad normal para los residuos estadísticos de la variable densidad.	147
Figura 63. Valores de dureza superficial Shore D en los compuestos.	148
Figura 64. Comprobación de homogeneidad de las varianzas de cada nivel de dureza superficial.	149
Figura 65. Gráfico de probabilidad normal para los residuos estadísticos de la variable dureza superficial.	150
Figura 66. Valores de resistencia a flexión de los compuestos (MPa).	150
Figura 67. Comprobación de homogeneidad de las varianzas de cada nivel de resistencia a flexión.	152
Figura 68. Gráfico de probabilidad normal para los residuos estadísticos de la variable resistencia a flexión.	153
Figura 69. Valores de resistencia a compresión de los compuestos (MPa).	154
Figura 70. Comprobación de homogeneidad de las varianzas de cada nivel de resistencia a compresión.	156
Figura 71. Gráfico de probabilidad normal para los residuos estadísticos de la variable resistencia a compresión.	156
Figura 72. Consistencia de los morteros.	158
Figura 73. Resultados de absorción de agua por capilaridad de los morteros.	159
Figura 74. Densidad aparente de los morteros en estado endurecido.	160
Figura 75. Resultados del coeficiente de conductividad térmica de los morteros (λ).	161
Figura 76. Efusividad térmica de los morteros.	162
Figura 77. Valores de dureza superficial Shore D de los compuestos con árido reciclado (arriba), de los compuestos con arena de río (abajo).	163
Figura 78. Valores de resistencia a flexión (MPa) de los compuestos con árido reciclado (arriba), y de los compuestos con arena de río (abajo).	164
Figura 79. Valores de resistencia a compresión (MPa) de los compuestos con árido reciclado (arriba), y de los compuestos con arena de río (abajo).	166
Figura 80. Microscopía SEM de los morteros con fibras (De arriba a abajo: con 30% lana de roca (RW), con 30% fibra de vidrio (FG), con 30% mezcla de fibras (MIX)).	169
Figura 81. Volumen de poro acumulado (superior) y diferencial (inferior) obtenido mediante el ensayo de porosimetría de Hg.	172
Figura 82. Isotermas de adsorción/desorción de N ₂ del mortero de referencia y los morteros con el 30% para los tres tipos de residuos de fibras.	175
Figura 83. Volumen de poro acumulado (superior) y diferencial (inferior) obtenido en el ensayo de adsorción/desorción de N ₂ .	176
Figura 84. DRX del cemento y los morteros con el 30% de fibras	177

Figura 85. Análisis térmico de los morteros aditivados y de referencia: pérdida total de masa vs temperatura.	180
Figura 86. Análisis térmico de los morteros aditivados y de referencia: derivada de la pérdida de masa rente a la temperatura.	180
Figura 87. Análisis térmico de los morteros aditivados y de referencia: energía por unidad de masa y de tiempo vs temperatura con evento exotérmico hacia arriba.	181
Figura 88. Carga P versus deflexión (δ) envoltantes de morteros con residuos de fibras de lana mineral.	182
Figura 89. Probetas con fibras de lana de roca después de la prueba del ensayo de fractura.	183
Figura 90. Curvas de carga (P) frente a la carga- desplazamiento del borde de la fisura para los morteros con residuos de fibras de lanas minerales.	184
Figura 91. Prueba de fuego de los morteros con exposición directa (arriba) y morteros tras el ensayo (abajo).	186
Figura 92. Imágenes termográficas del inicio del incendio.	187
Figura 93. Dureza superficial de los morteros antes (izquierda) y después (derecha) del ensayo a fuego.	188
Figura 94. Resistencia a flexión de los morteros antes (izquierda) y después (derecha) del ensayo a fuego.	189
Figura 95. Resistencia a compresión de los morteros antes (izquierda) y después (derecha) del ensayo a fuego.	189
Figura 96. Conductividad térmica de los morteros antes (izquierda) y después (derecha) del ensayo a fuego.	190
Figura 97. Probetas con residuos de fibras antes (izquierda) y después (derecha) de 25 ciclos de heladicidad.	191
Figura 98. Probetas de referencia y con los tres tipos de residuos antes y después del ensayo de cristalización de sales.	193
Figura 99. Probetas con residuos de lana de roca tras 15 ciclos de cristalización de sales.	194
Figura 100. Valores de dureza superficial de los morteros con fibras de polipropileno.	198
Figura 101. Valores de resistencia a flexión de los morteros con fibras de polipropileno.	199
Figura 102. Valores de resistencia a compresión de los morteros con fibras de polipropileno.	200
Figura 103. Probetas de mortero de cemento con fibras de polipropileno tras el ensayo a compresión, con adiciones del: 30% (izquierda), 40%(centro), 50%(derecha).	200
Figura 104. Sección cerramiento vertical.	202
Figura 105. Mallado tetraédrico.	203
Figura 106. Comportamiento térmico de un sistema de fachada para el modelo de referencia (izquierda) y el escenario estudiado (derecha).	204

ANEXOS

ANEXO 1: INFORME ISOTERMAS ADSORCIÓN / DESOCIÓN DE N₂

ANEXO 2: DIAGRAMAS DEL ENSAYO DE ENERGÍA DE FRACTURA

ANEXO 3: RESULTADOS DEL ENSAYO DE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA

ANEXO 4: RESULTADOS DEL ENSAYO DE POROSIMETRÍA DE MERCURIO

ANEXO 5: OTROS RESULTADOS DEL ENSAYO AL FUEGO