UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE EDIFICACIÓN

Programa de Doctorado Innovación Tecnológica en Edificación
**RECICLAJE DE RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN (RCD) DE TIPO
CERÁMICO PARA NUEVOS MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN SOSTENIBLES**

Tesis Doctoral

Rocío Santos Jiménez – Máster Oficial en Innovación Tecnológica en Edificación
Directora: Mercedes del Río Merino – Doctora Arquitecta
Director: Mariano González Cortina – Doctor Arquitecto
Madrid, 2018

TESIS DOCTORAL

TÍTULO: “Reciclaje de residuos de construcción y demolición (RCD) de tipo cerámico para nuevos materiales de construcción sostenibles”

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 la Tesis
el día_____de_____de_____en la Escuela Técnica
Superior de Edificación, acuerda otorgarle la calificación de:

EL PRESIDENTE

LOS VOCALES

EL SECRETARIO

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a todas las personas que me han acompañado y han hecho posible la realización de la presente Tesis Doctoral, y de forma especial:

A Mercedes del Río y Mariano González, mis directores de Tesis, por su ayuda y apoyo incondicional. Gracias por haberme abierto el camino hacia la investigación, acompañándome en todo momento y contribuir a mi formación sin dejar que me rinda.

A todos y cada uno de mis compañeros del Grupo de Investigación TEMA por su apoyo, ayuda y buenos momentos que he disfrutado a su lado, en especial a Paola, una gran amiga que es todo bondad y generosidad, con la que espero poder volver a trabajar en un futuro y seguir consiguiendo éxitos.

Al personal del Laboratorio de la Escuela Técnica Superior de Edificación, en especial a Santiago por su ayuda y consejos.

A la fábrica de cerámica La Paloma, a las empresas constructoras Arpada y CMS que me facilitaron el residuo cerámico y a mi amigo Gerar el cual siempre me guardaba los residuos que se producían en sus obras.

A Francisca Puertas y María del Mar Alonso del Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (IETcc-CSIC) por contribuir positivamente a mi formación en el ámbito de la química.

A Alessandro Carreri de la empresa SICIT 2000 S.P.A. que nos donó amablemente el aditivo retardador de fraguado para el yeso.

A Xabier Arroyo de CAI de Técnicas Geológicas por ayudarme a entender e interpretar imágenes SEM.

A los miembros del tribunal de prelectura por haber accedido a formar parte del mismo y por sus buenos consejos que me ayudaron a mejorar el trabajo.

A mis amigos, en especial a Mamen, Maribel, Aye, Eva, Loreto, Gerar, Isma y Pili, los cuales han sufrido mis ausencias y siempre me han sabido transmitir su apoyo y ánimo para llegar a la meta.

A Nacho Ferré, por ser mi jefe y buen compañero durante estos años, facilitándome siempre el ausentarme de mi puesto de trabajo con el fin de terminar este proyecto.

Y finalmente gracias a mi familia que me acompañaron en esta aventura y que, de forma fiel me animaron todos los días sin descanso, especialmente a mis Padres, mi hermana Belén, Raquel, George y Javi.

A mi Madre,

ÍNDICE

RESUMEN.....	1
SUMMARY.....	2
1.INTRODUCCIÓN	5
1.1 El yeso. Material tradicional de construcción.....	5
1.1.1 Características técnicas del yeso	10
1.1.2 Producción de yeso para la construcción	17
1.1.3 Aplicaciones del yeso en la construcción	18
1.1.4 El consumo de yeso en la construcción	30
1.1.5 Impacto ambiental del yeso tradicional.....	31
1.1.6 Posibles mejoras para el yeso en la construcción	32
1.2 Los Residuos de Construcción y Demolición (RCD). Los residuos cerámicos.....	33
1.2.1 Tipología de residuos.....	33
1.2.2 Generación de residuos	38
1.2.3 Buenas prácticas de reciclaje de RCD	46
1.2.4 Los residuos cerámicos	48
1.2.5 Producción de los materiales cerámicos	48
1.2.6 Aplicaciones de los materiales cerámicos	51
1.2.7 El consumo de los materiales cerámicos	52
1.2.8 Los procesos de recuperación y reciclaje de los materiales cerámicos.....	55
1.3 El consumo de energía. La economía circular y los nuevos materiales.....	56
1.3.1 Problemática derivada del uso y transformación de la energía	58
1.3.2 La economía circular.....	63
1.3.3 Los nuevos materiales.....	65
1.4 Conclusiones parciales.....	65
2.ESTADO DE LA CUESTIÓN	69
2.1 Estudios sobre la incorporación de aditivos y adiciones en compuestos de yeso.....	69
2.2 Estudios sobre la incorporación de residuos en compuestos de yeso	76
2.3 Estudio sobre el uso de residuos de material cerámico.....	81
2.4 Conclusiones parciales	83

3. JUSTIFICACIÓN DE LA TESIS DOCTORAL.....	87
4. OBJETIVOS DE LA TESIS DOCTORAL.....	93
5. METODOLOGÍA.....	97
5.1 Fase 0: Materiales a utilizar y trabajos previos	97
5.1.1 Materiales a utilizar	97
5.1.2 Caracterización de la Escayola E-35.	100
5.1.4 Selección de los porcentajes de adición y granulometría de la chamota.....	102
5.2 Fase 1: Escayola con adiciones de residuo cerámico.....	104
5.2.1 Denominación de las muestras a ensayar	104
5.2.2 Confección de probetas	106
5.2.3 Ensayos realizados.....	107
5.2.4 Elección del residuo cerámico que presenta mejor comportamiento	117
5.3 Fase 2: Compuestos seleccionados	117
5.3.1 Caracterización química y mineralógica del residuo cerámico seleccionado.....	117
5.3.2 Mejoras a aplicar	121
5.3.3 Caracterización de los nuevos materiales.....	121
5.4 Fase 3: Viabilidad de la aplicación del compuesto definitivo.....	125
5.4.1 Caracterización del compuesto seleccionado	125
6.RESULTADOS	135
6.1 Fase 1: Escayola con adiciones de residuo cerámico.....	135
6.1.1 Relación A/E de referencia	135
6.1.2 Resultados de los ensayos realizados en la FASE 1	136
6.1.3 Elección del residuo cerámico que presenta mejor comportamiento	143
6.2 Fase 2: Compuestos seleccionados	146
6.2.1 Caracterización química y mineralógica del residuo cerámico seleccionado.....	146
6.2.2 Mejoras a aplicar	149
6.2.3 Caracterización de los nuevos materiales.....	149
6.2.4 Elección de los compuestos que presentan mejor comportamiento	164
6.3 Fase 3: Comportamiento del compuesto como revestimiento.....	169
6.4.1 Caracterización del compuesto seleccionado	169

7. CONCLUSIONES.....	201
8. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.....	209
9. BIBLIOGRAFÍA.....	211
9.1 Bibliografía referenciada.....	211
9.2 Bibliografía generada.....	225

RESUMEN

La Unión Europea ha desarrollado políticas de gestión orientadas al desarrollo sostenible dentro del plan Horizonte 2020, apostando por cambios específicos entre los que se encuentran la reutilización y reciclado de residuos que se producen en grandes cantidades. Asimismo según la ficha técnica de “Residuos de Construcción y Demolición” publicada por el Ministerio de Medio Ambiente, en España el 54% de los residuos generados en el ámbito de la construcción corresponden a desechos de materiales cerámicos, los cuales se contemplan en la Lista Europea de Residuos como “Residuos Industriales No Peligrosos”.

Debido a esta situación, se han ido incorporando, en el reglamento interno español, una serie de normativas enfocadas a la minimización del impacto ambiental ocasionado por la edificación, como por ejemplo el Real Decreto 105/2008 el cual promueve que la gestión de residuos debe realizarse de manera adecuada, convirtiéndolos en recursos y generando un ahorro de materias primas. Por ello el CEDEX ha redactado una guía de reutilización de RCD como materia prima alternativa para la fabricación de mortero, hormigón, ladrillos y áridos ligeros. Sin embargo, aún falta por incluir información sobre la posibilidad de incorporar estos RCD en la fabricación de productos de yeso.

Por tanto, el objetivo principal de la presente Tesis Doctoral es analizar la viabilidad de incorporar en una matriz de escayola residuos cerámicos (chamota) procedentes de la industria y de la construcción y demolición de edificios, así como buscar aplicaciones.

Para ello se diseña un plan experimental en tres fases para demostrar la viabilidad de introducir varios tipos de residuos cerámicos procedentes de fábrica, obra nueva y obra de rehabilitación en una matriz de escayola. En la primera fase del plan experimental se analizan dichos residuos y se añaden en diferentes porcentajes y granulometrías, seleccionando finalmente los que mejores resultados ofrecen. En una segunda fase se lleva a cabo una serie de mejoras sobre el material objeto de estudio y en la tercera fase se realiza un estudio más profundo sobre la aplicación de dichos materiales como revestimiento interior continuo.

Los resultados obtenidos muestran compuestos que mejoran los valores de referencia de la escayola sin adiciones respecto a la dureza superficial, absorción de agua por capilaridad, adherencia y las resistencias mecánicas. Por lo que se alcanza el objetivo de la tesis, sustituir materia prima costosa para el medio ambiente (el yeso) por un material reciclado (RC) y obtener un compuesto viable para ser empleado como revestimiento de paramentos interiores en el sector de la edificación, ofreciendo así una alternativa a la reutilización del residuo cerámico.

SUMMARY

The European Union has developed management policies based on the sustainable development within the 2020 Horizon framework. They are focused on specific changes such as the recycling of waste produced in a huge quantities. Also, according to the data sheet "Construction and Demolition Waste" published by the Ministry of Environment, in Spain 54% of the waste generated correspond to ceramics, which are referred to in the European Waste List (MAM Order / 304/2002) as "Non-Hazardous Industrial Waste (RINP)".

Because of this situation, the Spanish government has created several regulations focused on minimizing the environmental impact caused by the construction industry and, in particular, a specific standard for the proper management of the CDW (Royal Decree 105/2008), which aims to promote their reduction and avoid landfilling, promoting as well the correct waste management to turn them into resources and save raw materials. Therefore CEDEX has created a guide to reuse CDW as raw material for the manufacture of mortar, concrete, brick and lightweight aggregate. However, no manual establishes strategies for recycling wastes in gypsum composites.

Due to these reasons, the aim of this Doctoral Thesis is to analyze the feasibility of incorporating ceramic waste (chamotte) generated from the industry, building construction and building demolition projects, in a plaster matrix, as well as seeking applications.

An experimental plan is designed in three phases to prove the feasibility of introducing different types of ceramic waste (CW) in a plaster matrix. In the first phase of the experimental plan, these CW are analyzed and added in different percentages and granulometries. Then the ones that provide the best results were selected. In a second phase, some improvements have been apply on the material. In the third pase a Deep syudy was carried out a on the application as interior finishing.

The experimental result show how these compounds improve their properties such as surface hardness, capillarity water absorption, adhesion and mechanical properties. Due to these reasons, the main aim of this Doctoral Thesis has been achieved. The gypsum has been replacement by recycling materials which are an alternative for reducing the ceramic waste in an immediately future.

CAPÍTULO 1
INTRODUCCIÓN

1. INTRODUCCIÓN

El proceso de construcción de un edificio, su uso, mantenimiento y posterior derribo es causa directa de contaminación, produciendo emisiones, residuos y siendo además consumidor de una gran cantidad de energía. A día de hoy sabemos que nuestro planeta no es capaz de soportar indefinidamente el actual orden económico internacional, que los recursos naturales son bienes limitados y que los residuos sólidos, líquidos o gaseosos de nuestro sistema de vida y la destrucción de ecosistemas conllevan un grave riesgo para la salud de la sociedad.

En España, el sector de la construcción es una de las actividades que ha evolucionado más lentamente en los últimos años y que además tiene un mayor impacto ambiental, ya que contribuye en gran medida al consumo de recursos naturales, a la contaminación y a la ocupación de territorio. En términos estadísticos, se puede decir que los edificios son responsables del 75% del consumo energético (Passivhaus-ECCN, 2018).

La modernización del sector de la construcción hacia un concepto más sostenible es inevitable, por ello el diseño de materiales eco-eficientes que sustituyan a los materiales tradicionales es una opción a tener en cuenta. Estos materiales deben considerar la minimización de la explotación de recursos naturales, que ayuden a reducir la cantidad de energía tanto en su fabricación como en su uso final y que generen menor cantidad de residuos o ayuden a reducirlos (Halada, 2003).

Por todo ello este trabajo de investigación se va a centrar en buscar la manera de analizar el yeso como material natural de uso habitual desde hace siglos en el sector de la edificación y la viabilidad de sustituir parte de esa materia prima con residuo cerámico. de este modo se daría solución a dos grandes problemas que a día de hoy preocupan a la sociedad: se reduciría la explotación de un recurso natural y se buscarían nuevas aplicaciones para reducir el residuo.

1.1 El yeso. Material tradicional de construcción

La palabra yeso recoge dos acepciones distintas. Sirve para designar el mineral o la roca natural y el producto obtenido a partir de ellos. (Río Merino, et al., 2003)

Cuando se habla del yeso como mineral se refiere a una roca de origen sedimentario de precipitación química, formada por evaporación de las sales disueltas en agua de mar o en lagos salados, en la era secundaria y terciaria, que

precipitan formando depósitos sedimentarios llamados evaporitas, constituida por cloruros y sulfatos de calcio, magnesio y potasio, muy abundante en la naturaleza.

Este mineral, también llamado Aljez o piedra de yeso, está constituido principalmente por sulfato de calcio con dos moléculas de agua ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), denominado sulfato de calcio dihidratado o simplemente dihidrato. Se representa en la naturaleza en distintas variedades: selenita, variedad transparente incolora; yeso alabastro, de forma granular; espato satinado, fibroso; punta de lanza, fácilmente exfoliable en forma de aglomerado de pequeños cristales; yeso sacaroideo, espejuelo, rosa del desierto, etc. (Villanueva Domínguez, et al. 2001) (Arredondo, F, 1986).

El aljez puede presentar diversas impurezas como arcillas, sílice, dolomía, etc., debiendo tener una pureza en dihidrato adecuada para poderse utilizar como materia prima para la obtención del yeso de construcción. Se distinguen cinco clases en función del contenido de sulfato de calcio dihidrato. (Tabla .1.01).

CLASE	Composición mineralógica	Composición química
	Contenido de $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ mínimo (%)	Agua de cristalización mínimo (%)
I Extra	95,00	19,88
I	90,00	18,83
II	80,00	16,74
III	70,00	14,55
IV	60,00	12,56

Tabla 1.01. Clasificación del Aljez según UNE 102001 (Villanueva Domínguez et al., 2001)

Además, según el catálogo de elementos constructivos del Código Técnico de la Edificación (CTE) encontramos las siguientes clasificaciones.

- Según el tipo de material (Tabla 1.02):

Yesos				
Material	HE			
	ρ kg / m ³	λ W / m·K	c_p J / kg·K	μ
Yeso, de alta dureza	1200 < ρ ≤ 1500	0,56	1000	4
	900 < ρ ≤ 1200	0,43	1000	4
Yeso, dureza media	600 < ρ ≤ 900	0,30	1000	4
Yeso, baja dureza	ρ ≤ 600	0,18	1000	4

Tabla 1.02. Clasificación del yeso como material según C.T.E.

– Según los productos de yeso (Tabla 1.03):

Productos de yeso				
Producto	HE			
	ρ kg / m ³	λ W / m·K	c_p J / kg·K	μ
Placa de yeso o escayola	750 ≤ ρ ≤ 900	0,25	1000	4
Placa de yeso laminado (PYL)	750 ≤ ρ ≤ 900	0,25 ⁽¹⁾	1000	4
Placas de yeso armado con fibras minerales	800 < ρ ≤ 1000	0,25	1000	4

Tabla 1.03. Clasificación del yeso como producto según C.T.E.

Siendo:

ρ Densidad, en kg/ m³.

λ Conductividad térmica, en W/m.K. La conductividad térmica, λ , incluye el efecto del revestimiento de papel.

C_p Calor específico, en J/Kg.K.

μ Factor de resistencia a la difusión del vapor de agua, adimensional.

De las dos moléculas de agua dihidratado, 1 ½ moléculas se encuentran débilmente unidas al sulfato de calcio, mientras que la ½ molécula restante se encuentra fuertemente unida.

Al someter el aljez a un proceso térmico, dependiendo de la temperatura, se deshidrata parcial o totalmente obteniéndose el yeso de construcción formado

fundamentalmente por sulfato de calcio semihidratado, $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$, y anhidritas formadas fundamentalmente por sulfato de calcio anhidro, CaSO_4 .

Llamamos yeso de construcción al producto pulverulento procedente de la cocción de la piedra de yeso o aljez, que una vez mezclado con agua, en determinadas proporciones, es capaz de fraguar en el aire.

En función de la temperatura de cocción del aljez se obtienen los productos mostrados en la Tabla 1.04.

TEMPERATURA	DENOMINACIÓN	FÓRMULA QUÍMICA
Ambiente	Aljez o piedra de yeso	$\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$
120°C a 180°C	Semihidrato (SH)	$\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$
180°C a 300°C	Anhidrita soluble (AnIII)	$\text{CaSO}_4 \text{ III}$
300°C a 700°C	Anhidrita II artificial (AnII)	$\text{CaSO}_4 \text{ II}$
>1.000°C	Anhidrita I (AnI)	$\text{CaSO}_4 \text{ I}$

Tabla 1.04. Productos obtenidos en función de la temperatura (Villanueva Domínguez et al., 2001).

Dependiendo de ciertos factores de transformación, estos productos resultantes, pueden presentar distintos estados o formas alotrópicas.

Las distintas fases del sistema $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$ se describen en la Tabla 1.05.

PRODUCTO	VARIEDADES ALOTRÓPICAS
$\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$	SHa y SHb
$\text{CaSO}_4 \text{ (AnIII)}$	AnIIIa, AnIIIb y AnIII' b
$\text{CaSO}_4 \text{ (AnII)}$	AnIIa, AnIIb y AnIIp

Tabla 1.05. Distintas fases del sistema $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$ (Arredondo, F, 1986).

El semihidrato a se obtiene cuando el proceso de cocción del aljez se produce en atmósfera saturada o próxima a la saturación.

Por el contrario, el semihidrato b, se origina en proceso de cocción en atmósfera seca.

El principal constituyente de los yesos de construcción es la variedad b de las distintas fases de deshidratación del aljez (Villanueva Domínguez, et al. 2001) (Arredondo, F, 1986).

Hay constancia de que ya en el siglo IX a.C., en Çatal Hüyük (Turquía), el yeso se utilizaba como materia prima en la realización de revestimientos. Desde entonces y a lo largo de la historia de la humanidad, este material se ha ido utilizando como materia prima en los revestimientos para interiores, llegando a considerarse hoy en día como un material muy versátil, pues en diversas proporciones y con distintos aditivos, cubre una amplia gama de productos de características muy distintas.

En España, empieza a utilizarse el yeso para revestimientos, de forma masiva, con los árabes y desde entonces su empleo ha estado ligado a la tradición de nuestro país, fundamentalmente por tres factores:

- La gran abundancia de terreno yesífero, que representa un 60% del total de la superficie del país.
- La gran cantidad de la materia prima, con más de un 80-85% de pureza.
- El bajo coste del proceso de fabricación, en comparación con otros materiales de construcción, al requerir temperaturas más bajas que otros productos de la construcción (200° - 700°C).

El procedimiento de fabricación del yeso comienza con la extracción del aljez, que generalmente procede de canteras a cielo abierto, posteriormente esta materia prima es triturada, calentada y molida de acuerdo con el tipo de yeso que se desee obtener.

Originalmente, el yeso se cocía en hornos morunos, obteniéndose así un material tradicional o artesanal que se conoce como yeso de primera generación y ya entonces había dos tipos de yeso: el yeso negro o moreno (de granulometría gruesa) y el yeso blanco (de granulometría fina).

Desde el final de los años 50 se comenzó a industrializar la fabricación del yeso mediante el empleo de hornos continuos o intermitentes, en instalaciones fijas. Consiguiéndose materiales más uniformes a los que se denominaba yesos industriales o yesos de segunda generación. Los yesos de segunda generación

mantenían el yeso grueso y fino originales aunque más uniformes y añadían un yeso más fino y de mejor calidad denominado escayola.

A finales de los años 60 se comenzó a fabricar lo que serían los yesos de tercera generación, que son los que incorporan aditivos, apareciendo los yesos aligerados, los yesos de alta dureza superficial, los yesos proyectables y los yesos adhesivo.

1.1.1 Características técnicas del yeso

A continuación se describen las características técnicas del yeso en relación a: la trabajabilidad, la habitabilidad, la durabilidad y la seguridad.

- **Trabajabilidad**

Esta propiedad del yeso depende de la moldeabilidad, la consistencia variable, el fraguado rápido regulable, la expansión del fraguado, la adherencia, las resistencias iniciales y la modificabilidad de trabajo sobre elementos ya fraguados.

- **Moldeabilidad:** es la propiedad por la que un producto se adapta a cualquier molde y, gracias a esta propiedad, es idóneo para su utilización en prefabricados, obteniéndose piezas que asombran por la escasa variación dimensional entre ellas.
- **Consistencia variable:** durante su fabricación, la relación agua/yeso utilizada influye en la resistencia final del yeso (que es inversamente proporcional al cuadrado del factor agua/yeso utilizado) y en el rendimiento del material (cantidad necesaria del mismo para obtener una cantidad determinada de dihidrato).

Durante su puesta en obra se puede regular la consistencia del producto variando la cantidad de agua de amasado. De esta relación dependerá la resistencia final, el tiempo de fraguado, la porosidad, la densidad del yeso endurecido e influye enormemente en la habitabilidad y durabilidad del producto.

A mayor relación agua/yeso menores densidades y resistencias a compresión y tracción (Villanueva Domínguez, 1975).

- Fraguado regulable: el yeso tiene un fraguado rápido en comparación con la cal y el cemento, siendo el tiempo muy variable según el proceso de fabricación, de las distintas proporciones de producto que tenga, de las distintas adiciones utilizadas y de las distintas fases de deshidratación.

A mayor relación agua/yeso los tiempos de fraguado son más prolongados, aunque también influyen otros factores como la temperatura del agua o la rapidez del amasado.

Si se quieren regular estos tiempos de fraguado la forma más idónea es la adición en fábrica de los correspondientes aceleradores o retardadores.

- Expansión del fraguado: desde el amasado hasta después del principio de fraguado tiene lugar una pequeña contracción.

Durante el tiempo de fraguado hasta el final de la hidratación se produce un aumento de volumen.

Con el secado aparece de nuevo una retracción. Siempre que esta expansión esté dentro de unos límites presentará ventajas. Por ejemplo, en los materiales prefabricados al tener que reproducir fielmente la forma de los moldes.

- Adherencia: Cuando se encuentra en estado fluido, se adhiere a otros materiales al introducirse en poros y oquedades.
- Resistencias iniciales: Se adquieren resistencias a edades tempranas, siendo a los 6 - 7 días en condiciones de humedad y temperatura ambiente cuando se alcanzan las resistencias de trabajo.
- Modificabilidad: El yeso presenta una gran facilidad en los trabajos del material ya endurecido, utilizando utensilios sencillos para el corte o adaptación de los derivados del yeso, y modificando con facilidad las unidades de obra si se han ejecutado mal.

- Habitabilidad

Este material tiene propiedades que contribuyen al acondicionamiento térmico, higratérmico, acústico y lumínico de los edificios (Villanueva Domínguez. 1975).

- Aislamiento térmico: el Coeficiente de Conductividad Térmica (λ) se define como la cantidad de calor, o flujo de calor que pasa en un tiempo determinado por unidad de superficie de una muestra de extensión finita, caras plano-

paralelas de espesor unidad, cuando se establece una diferencia de temperatura entre sus caras de un grado.

Este valor, λ , depende de su densidad, del estado de humedad en que se encuentre, de la temperatura, porosidad, tamaño de los poros y tipo de gas que pueda quedar encerrado en el interior del material.

A menor densidad, mayor cantidad de poros y burbujas en su interior, lo que hace que el material sea menos conductor y el contenido de agua hace que aumente la conductividad del material.

Por tanto, en productos de yeso ligeros se alcanzan excelentes valores de aislamiento térmico (Tablas 1.06 y 1.07).

MATERIALES	λ (W/m·K)
Mortero de cemento fraguado	0,93
Hormigón ordinario	1,28
Cerramiento de ladrillo	0,34 – 1,05
Partición de ladrillo	0,28 – 0,86
Piedras compactas (granito, basalto y mármol)	2,91 – 4,07
Piedras porosas (arenisca y caliza blanca)	0,79 – 2,91
Tabiques y cielorasos de yeso	0,29
Vidrio	0,76
Yesos	0,01 – 0,70

Tabla 1.06. Valores de conductividad térmica para distintos materiales de construcción (Villanueva Domínguez. 2001).

TIPO DE YESO	λ (W/m·K)
Enlucido de yeso	0,30
Enlucido de yeso con perlita	0,18
Placa de yeso laminado	0,18
Placa de escayola	0,30

Tabla 1.07. Coeficiente de conductividad térmica de cálculo según NBE-CT 79, ya derogada (Villanueva Domínguez. 2001).

Bajo una presión exterior sobre el yeso, aparece en las capas límites los fenómenos de convección, pasando de ser libres a ser forzados, y en este caso el “coeficiente de transmisión del calor por convección” depende directamente del “coeficiente de fricción” y de la velocidad del viento.

Cuanto más lisa sea la superficie, menor será el coeficiente de fricción y por tanto, mayor será el aislamiento térmico (Tabla 1.08).

Material	Coeficiente de fricción F
Vidrio	1,00
Yeso alisado	1,20
Madera	1,25
Hormigón	1,62
Fábrica de ladrillo	1,78

Tabla 1.08. Coeficiente de fricción de algunos materiales, según Diamant (Villanueva Domínguez. 2001).

Por tanto, el yeso está colaborando de forma eficaz en el aislamiento térmico de elementos constructivos expuestos al viento.

- La relación emisividad-absorción también influye en el aislamiento de la capa límite, ya que el coeficiente de transmisión por radiación depende directamente de la emisividad.

A mayor emisividad mayor transmisión de calor y menor resistencia térmica.

El yeso tiene una alta emisividad pero por el contrario tiene una baja absorción, por lo que el efecto en el aislamiento térmico es favorable.

El yeso emite aproximadamente el 90% del calor recibido, por lo que es muy apto para su utilización en calefacción por paneles radiantes.

- Inercia térmica: depende de la difusividad de los materiales en relación con el comportamiento higrotérmico, de la velocidad de enfriamiento de los paramentos y de la velocidad de difusión de la onda térmica (proporcional a la difusividad del material y al factor de amortiguamiento).

El yeso es un material que proporciona una inercia térmica similar a la de los elementos de construcción tradicionales.

- Confort térmico superficial: Se entiende por confort térmico superficial a la sensación térmica percibida al tocar la superficie de un material, con independencia de la que realmente posee.

El confort superficial depende del “coeficiente de penetración térmica” del material, y cuanto menor sea éste, más confortable será el tacto de la superficie. El yeso puede considerarse un material adecuadamente cálido.

- Regulación higrotérmica: el yeso puede actuar como regulador higrotérmico, colaborando naturalmente con otros factores.

Podemos afirmar que a través del yeso las edificaciones transpiran. Además, debido a su microestructura porosa, formada por agrupaciones cristalinas de sulfato cálcico hidratado, es capaz de almacenar moléculas de vapor de agua en el interior de su masa cuando las condiciones ambientales presentan un exceso de éste, y de cederlas al ambiente cuando se modifiquen las anteriores condiciones.

Para una frecuencia determinada y en tabiques simples, puede afirmarse, según la ley de Berger, que el aislamiento a ruido aéreo depende directamente de su peso por metro cuadrado de superficie.

La ligereza del yeso no favorece el aislamiento acústico. Aunque se ha intentado aumentar la densidad de las particiones, mediante adición de materiales más pesados, resulta antieconómico mejorar el aislamiento acústico de los tabiques de yeso a base de aumentar su peso, por ello, cuando se requieren aislamientos acústicos elevados, se recurre a tabiques de varias capas.

- Absorción sonora: La absorción de cada material viene determinada por su “coeficiente de absorción”, siendo éste la energía absorbida por unidad de superficie, tomando como absorción máxima la de una ventana de superficie unidad.

Las superficies lisas de yeso tienen un bajo coeficiente de absorción, alrededor de 0,02.

La solución para la mejora de este coeficiente es el moldeo de placas de yeso con un gran número de penetraciones trasdosadas con materiales absorbentes (Tabla 1.09).

Material	Coeficiente medio de absorción acústica
Acero	0,100
Mármol	0,010
Hormigón	0,015
Yeso	0,020
Corcho	0,160

Tabla 1.09. Valores del coeficiente de absorción acústica en distintos materiales, según Neufret (Villanueva Domínguez. 2001).

- Durabilidad

Las acciones a las que están sometidas los revestimientos interiores, las podemos clasificar en mecánicas y debidas al agua.

En cuanto a las acciones mecánicas destacan las debidas a impactos o choques. Por tanto. la propiedad que más interesa conocer es la de su dureza superficial que por regla general y en condiciones normales de utilización es suficiente. De todas formas esta propiedad está relacionada directamente con la densidad del revestimiento y por tanto de la relación A/Y con la que se amase.

- Dureza superficial: a menor relación agua/yeso, mayor es la dureza superficial.

Se observa a continuación en la siguiente tabla distintos valores de dureza superficial en función de la relación A/Y utilizada (Tabla 1.10).

Tipo de yeso	Relación A/Y	Dureza superficial (bars)
Enlucido Tradicional	1,20	38,50 – 52,00
	1,00	62,00 – 66,00
Yeso Proyectado	0,60	135,00
	0,40	482,00
Prefabricados	0,80	166,00 – 132,00
	0,60	188,00

Tabla 1.10. Valores de dureza superficial para distintos tipos de yeso (Villanueva Domínguez. 1975).

- Variaciones dimensionales: se consideran importantes las debidas a causa de la humedad y la temperatura.

El yeso una vez que ha secado tiende a aumentar su volumen por humectación y a reducirlo una vez seco, produciéndose variaciones de en torno a los 1,5 – 2,0 mm/m.

Oscilaciones similares se producen debido a oscilaciones térmicas por debajo de los 100°C. Cabe advertir que por encima de los 117°C el yeso sufre transformaciones internas de deshidratación, que modifican su propia estructura interna, con el consiguiente envejecimiento. Se estima que estas temperaturas serán alcanzadas únicamente en condiciones especiales, por ejemplo durante un incendio.

- Alteraciones debidas al agua: el yeso experimenta una enorme pérdida de resistencia en condiciones de humedad. El grado de absorción de esta agua está relacionado con la porosidad del yeso, y por tanto, con su densidad y la cantidad de agua de amasado.

A medida que un yeso se aproxima a su peso específico, que está en torno a 2,5 g/cm³, absorbe menos agua y mejor se comporta frente a ella (Villanueva Domínguez. 1975).

- Seguridad

- Protección frente al fuego: el yeso es un material incombustible y con bajo coeficiente de conductividad térmica, contiene agua libre y no produce bajo la acción del fuego gas o vapor tóxico, corrosivo o asfixiante (Villanueva Domínguez. 1975).

Está clasificado como Euroclase A1 (no contribución al fuego) por tener menos de un 1% en peso o volumen de materia orgánica.

Todas estas propiedades proporcionan a los elementos de yeso cualidades de protección pasiva frente al fuego.

Una vez comentadas todas las propiedades del yeso, cabe mencionar que en la presente tesis doctoral se va a enfocar la investigación en la búsqueda de un nuevo material reciclado en base de yeso el cual conserve o mejore su buena trabajabilidad con el fin de asegurar que va a poder ser empleado en obra debidamente, así como mejorar su dureza superficial y absorción de agua por capilaridad para que de este modo aseguremos que dicho material va a poder

ofrecer un buen comportamiento para ser empleado en obra. Por todo lo anterior, cabe destacar que el yeso es un material muy demandado en el sector de la construcción, ofrece buenas propiedades, pero sin embargo debe evolucionar hacia un yeso del Siglo XXI, el cual reduzca su impacto ambiental, convirtiéndose en un material sostenible con el medioambiente.

1.1.2 Producción de yeso para la construcción

La producción mundial de yeso procedente de fuentes naturales se estima en 100 millones de toneladas anuales. Esta producción se obtiene principalmente de seis países, entre los que se encuentra España con un 7,7% (Figura 1.01).

Figura 1.01. Producción mundial de yeso en 2012 (Merchant Research & Consulting Ltd, 2016)

En la Unión Europea, España es el líder indiscutible de producción y el principal exportador del continente. Sin embargo, el sector español del yeso está mayoritariamente en manos de empresas multinacionales de matriz europea, que o bien han adquirido los activos productivos de empresas nacionales preexistentes, o se han instalado directamente en el país.

A nivel nacional, como se puede ver en la Figura 1.02, Andalucía es la Comunidad Autónoma con mayor porcentaje de producción, con un 42%. Seguido por la Comunidad de Madrid, Castilla la Mancha y Cataluña.

Figura 1.02. Producción de yeso en España en 2012 (Gobierno de España, 2014)

1.1.3 Aplicaciones del yeso en la construcción

El yeso como material de construcción es muy abundante en el sentido de que es necesario para numerosos trabajos para la correcta terminación de una edificación. Las aplicaciones del material son: principalmente como revestimiento de paramentos interiores tanto verticales como horizontales, material para la elaboración de prefabricados, así como la tabiquería de yeso lamiendo.

1.1.3.1- Revestimientos de yeso.

Durante siglos, los revestimientos con pasta de yeso se han ejecutado mediante la aplicación manual de yesos tradicionales o normales, sin aditivos en su composición, sobre unos soportes que básicamente se limitaban a los constituidos por cerámica, piedra y madera.

Hoy día todo el proceso ha evolucionado debido a la posibilidad de la aplicación mecánica, a la utilización de yesos especiales con aditivos, y a la diversidad de

soportes que hay que revestir en un edificio, ya que es una de las principales aplicaciones del yeso.

En obra nos encontramos una gran variedad de materiales para ser revestidos con yeso, que podemos agrupar en la siguiente relación:

- Fábricas de ladrillo: hueco sencillo, hueco doble, perforado, etc.
- Fábricas de bloques cerámicos.
- Fábricas de bloques de hormigón.
- Elementos de hormigón armado: pilares, vigas, viguetas de forjado, etc.
- Bovedillas de forjado: cerámicas, de hormigón aligerado, de escayola, de Poliestireno, etc.
- Placas de aislamiento térmico: Poliestireno expandido o extruido, poliuretano, vidrio celular, etc.
- Perfiles de acero laminado
- En las fábricas de ladrillo conviene comentar que la utilización de piezas de gran formato produce tabiques más rígidos al disminuir la cantidad de juntas, siendo más propensos a la aparición de fisuras.
- Los perfiles de acero laminado deben ser protegidos previamente para evitar el contacto con el yeso, lo cual se consigue normalmente forrándolos con material cerámico.

Muchos de estos soportes necesitan una preparación previa en la superficie para la interfase de unión y/o revestimientos protectores.

Los revestimientos a base de yeso han evolucionado notablemente en los últimos años con la fabricación de yesos especiales y con la incorporación de la técnica de proyección mecánica.

Sin embargo se sigue manteniendo la idea básica de aplicar una capa de regularización de unos 15 mm., “guarnecido”, sobre la que normalmente se realiza un acabado más fino denominado “enlucido”. Las variantes del guarnecido radican en la técnica empleada en su ejecución, pudiendo realizarse manualmente mediante tendido y mecánicamente mediante proyección.

- **El guarnecido** es un revestimiento continuo conglomerado confeccionado con pasta de yeso grueso y aplicado sobre un soporte para regularizar su superficie. Su espesor se determina en función de las irregularidades planimétricas del soporte que se recubre, debiendo estar comprendido entre 10 y 20 mm (el espesor nominal que se maneja habitualmente es de 12 mm).

Su ejecución varía según la separación de las referencias utilizadas para conseguir su planeidad, denominándose:

- Maestreado

Cuando se realizan maestras en las esquinas, rincones, guarniciones de huecos y además en los paños se intercalan las maestras necesarias para que su separación sea inferior a la longitud de la regla que se va a apoyar en ellas. Normalmente esta separación no suele superar 1,50 m.

- Semimaestreado

Cuando se realizan maestras solamente en las esquinas, rincones, y guarniciones de huecos, ejecutando el pañeado “a buena vista”, es decir, sin utilizar ninguna maestra de referencia, sólo se contempla bajo el criterio de conseguir un acabado de carácter rústico e irregular, expresamente definido en la Memoria de calidades y en la definición de la unidad de obra.

A continuación se presentan los requerimientos mínimos exigidos a esta aplicación, que vienen regulados principalmente por las normas UNE-EN 13279-1 (AENOR, 2009) y UNE-EN 13279-2 (AENOR, 2014):

- Densidad: para yesos DE CONSTRUCCIÓN (B2) $<800 \text{ kg/dm}^3$, de acuerdo con RP 35.03 (AENOR, 2009).
- Reacción al fuego: A1 ($<1\%$ materia orgánica). Con mayor cantidad de materia orgánica seguir norma UNE-EN 13501-1 (AENOR, 2010).
- Conductividad térmica: si no cumple los valores mínimos que aparecen en la Tabla 1.11, seguir norma UNE-EN 12664 (AENOR, 2002).

Densidad (kg/m^3)	Conductividad térmica a 23°C y 50% de humedad relativa (W/mk)
600	0,18
700	0,22
800	0,26
900	0,3
1000	0,34
1100	0,39
1200	0,43
1300	0,47
1400	0,51
1500	0,56

Tabla 1.11. Conductividad térmica mínima para yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso, norma UNE-EN 13279-1 (AENOR, 2009)

- Contenido en conglomerante: > 50%.
- Tiempo de fraguado mínimo: 20 min (aplicación manual).
- Tiempo de fraguado mínimo: 50 min (aplicación mecánica).
- Resistencia a flexión: en general $\geq 1 \text{ N/mm}^2$, valores más específicos se muestran en la Tabla 1.12.

Conglomerante	Resistencia a flexión
YG	$\geq 2 \text{ N/mm}^2$
YG/L	$\geq 2 \text{ N/mm}^2$
YPM	$\geq 1 \text{ N/mm}^2$
E30	$\geq 3 \text{ N/mm}^2$
E30/L	$\geq 3 \text{ N/mm}^2$
E35	$\geq 3,5 \text{ N/mm}^2$
E35/L	$\geq 3,5 \text{ N/mm}^2$
YP	$\geq 3 \text{ N/mm}^2$
YA	$\geq 1 \text{ N/mm}^2$
YPM/A	$\geq 1 \text{ N/mm}^2$

Tabla 1.12. Resistencia mecánica a flexión mínima para yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso, especificadas en el RP 35.01 (AENOR, 2009), el RP 35.02 (AENOR, 2009) y el RP 35.03 (AENOR, 2009).

- Resistencia a compresión: $\geq 2 \text{ N/mm}^2$.
- Adherencia: si la rotura aparece en la interfase yeso-soporte, el valor debe ser $\geq 0,1$.
- Dureza superficial: ≥ 65 unidades Shore C y ≥ 45 unidades Shore C. Shore C para yesos aligerados, de acuerdo con RP 35.03 (AENOR, 2009).
- Dureza superficial sobre soporte: los valores mínimos se muestran en la Tabla 1.13.

Conglomerante	Dureza superficial
YG	$\geq 45 \text{ u. Shore C}$
YG/L	$\geq 45 \text{ u. Shore C}$
YPM	$\geq 65 \text{ u. Shore C}$

Tabla 1.13. Dureza superficial mínima para yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso especificadas en el RP 35.01 (AENOR, 2009) y el RP 35.02 (AENOR, 2009).

Otros requerimientos opcionales se presentan a continuación:

- Resistencia al fuego, norma UNE-EN 13501-2 (AENOR, 2010).

- Aislamiento directo al ruido aéreo, normas UNE-EN ISO 140-3 (AENOR, 1995) y UNE- EN ISO 717-1 (AENOR, 2013).
- Absorción acústica, norma UNE-EN ISO 354 (AENOR, 2004).
- Resistencia térmica, norma UNE-EN ISO 6946:2007 (AENOR, 2012).
- **El enlucido** o blanqueo es una capa de terminación preparada con pasta de yeso fino y se aplica sobre una superficie previamente guarnecida. Con él se obtiene un acabado más liso y satinado, que puede servir de base a cualquier tipo de pintura.

Esta preparación implica que al terminar la aplicación del guarnecido se debe humedecer su superficie y a continuación pasar un “peine” o el borde de una llana dentada para producir estrías o surcos que faciliten la adherencia del posterior enlucido. Este se debe iniciar cuando el guarnecido esté prácticamente seco y tenga un alto grado de endurecimiento.

La pasta de yeso fino se tiende con la llana sobre la superficie del paramento, comprimiéndola fuertemente y sucesivas veces contra el guarnecido hasta que forme un mismo cuerpo con él. Esta reiterada presión va compactando y reduciendo el espesor de la pasta y alisando su superficie hasta conseguir una gran adherencia entre ambas capas y un acabado más fino y satinado.

Cuando haya que interrumpir la ejecución del enlucido se debe hacer de tal forma que se asegure la trabazón entre esta parte y la siguiente. Para ello se corta con la llana la capa interrumpida formando líneas onduladas cortadas en bisel. Sin embargo, por razones prácticas, el enlucido que se realiza habitualmente tiene un espesor entre 1 y 3 mm, y se aplica sobre el guarnecido cuando aún conserva gran parte del agua de amasado, aunque debe tener consistencia suficiente para no desprenderse ni deformarse al aplicar el enlucido.

Como observaciones a tener en cuenta en la ejecución del enlucido se pueden mencionar:

- Se prepara en cantidades menores que las del yeso grueso, ya que se emplea menos cantidad de pasta por unidad de superficie, y, en general, su fraguado es más rápido.
- Al igual que el guarnecido, el enlucido se cortará en las juntas estructurales del edificio y a nivel del rodapié.
- Por último, en paramentos que vayan a ser alicatados por la otra cara, primero se alicata y después se da el yeso para evitar eflorescencias.

A continuación se presentan los requerimientos mínimos exigidos a esta aplicación, que vienen regulados principalmente por las normas UNE-EN 13279-1 (AENOR, 2009) y UNE- EN 13279-2 (AENOR, 2014):

- Densidad: para yesos aligerados (YA) $<800 \text{ kg/dm}^3$, de acuerdo con RP 35.03 (AENOR, 2009).
- Reacción al fuego: A1 ($<1\%$ materia orgánica). Con mayor cantidad de materia orgánica seguir norma UNE-EN 13501-1 (AENOR, 2010).
- Conductividad térmica: si no cumple los valores mínimos de la Tabla 9 seguir norma UNE-EN 12664 (AENOR, 2002). Contenido en conglomerante: $> 50\%$.
- Tiempo de fraguado mínimo: 20 min (aplicación manual). Tiempo de fraguado mínimo: 50 min (aplicación mecánica).
- Resistencia a flexión: en general $\geq 1 \text{ N/mm}^2$, valores más específicos se muestran en la Tabla 10.
- Resistencia a compresión: $\geq 2 \text{ N/mm}^2$.
- Adherencia: si la rotura aparece en la interfase yeso-soporte, el valor debe ser $\geq 0,1$. Dureza superficial: $\geq 65 \text{ u. Shore C}$ y $\geq 45 \text{ u. Shore C}$ para yesos aligerados, de acuerdo con RP 35.03 (AENOR, 2009).
- Dureza superficial sobre soporte: los valores mínimos se muestran en la Tabla 11.
- Tiempo de fraguado Vicat $> 20 \text{ min}$.

Otros requerimientos opcionales se presentan a continuación:

- Resistencia al fuego, norma UNE-EN 13501-2 (AENOR, 2010).
- Aislamiento directo al ruido aéreo, normas UNE-EN ISO 140-3 (AENOR, 1995) y UNE- EN ISO 717-1 (AENOR, 2013).
- Absorción acústica, norma UNE-EN ISO 354 (AENOR, 2004).
- Resistencia térmica, norma UNE-EN ISO 6946:2007 (AENOR, 2012).

1.1.3.2- Prefabricados de yeso.

Los prefabricados de yeso son aquellos que se confeccionan a partir de un conglomerante, amasados generalmente con agua y luego moldeados, extrusionados, laminados, etc., para darles la forma definitiva previa a la puesta en obra. El endurecimiento se realiza mediante el fraguado del conglomerante.

Las ventajas de la prefabricación en la construcción es que favorece la mayor exactitud dado que el dimensionado es más preciso y la rapidez de ejecución.

Además mejora el control económico ya que no existe demasiado desperdicio del material, la calidad y el control del mismo en obra.

Los materiales prefabricados de yeso se clasifican:

- Bloques, placas y paneles de yeso:

Los bloques y placas de yeso se fabrican a partir de pasta de yeso. Su moldeo se realiza vertiendo la masa previamente mezclada y homogeneizada, con una consistencia fluida, en un molde tratado con un desencofrante para que no se pegue la pasta. El molde suele ser metálico. Por último, el endurecimiento se produce cuando fragua el yeso. La humedad residual del yeso se elimina en túneles de secado.

Los paneles están elaborados con papel que es transportado en una cinta sin fin, mientras se produce el fraguado del yeso. Al final del recorrido existe una máquina cizalladora que los corta. Después del corte pasan a un túnel de secado, a cuya salida se produce el empaquetado y posterior almacenaje para posterior distribución.

Este tipo de elemento constructivo representa un campo importante de la albañilería en seco ya que ofrece una gran rapidez de ejecución y son fácilmente manejables debido a su poco peso siendo estables y duraderos. Además por su poco peso no sobrecarga en exceso la estructura, teniendo un buen comportamiento a flexión y resistencia al choque. Así mismo^{3r} proporcionan un buen aislamiento, tanto térmico como acústico, y favorable comportamiento ante el fuego.

Las formas comerciales más habituales son:

- Bloques de yeso: se realizan a partir de yeso de prefabricados (YP). Pueden ser macizos o huecos y además de los bloques se fabrican también piezas de entrevigado.
- Placas para tabiques: YP o Escayola E-30. Pueden ser macizas o huecas.
- Placas para falsos techos: Escayola E-30 o E-35. Pueden ser lisas, con relieves o perforadas.
- Placas estucadas: se moldean en unos bastidores metálicos sin fondo, sobre una mesa de cristal. Se coloca sobre el paramento que se quiera revestir una vez fraguada la escayola, se alisan, se pulen y finalmente se abrillantan.

- Paneles de yeso laminado: la fabricación está totalmente automatizada, los materiales empleados son el yeso, el agua y el cartón. Generalmente se suelen añadir aditivos.

En primer lugar se amasa el yeso con agua en una mezcladora y en caso de haber aditivos se introducirían en este momento.

De la mezcladora la pasta se vierte sobre una lámina de cartón continua, y el conjunto se hace pasar a través de unos cilindros laminadores en los que se añade la cara superior de cartón. Al pasar por estos cilindros laminadores también se calibra el espesor del papel, anchura y posible relieve.

- Paneles simples para paramentos interiores: anchuras de 60 – 120 cm., y espesores de 10 – 19 mm.
- Acabados de los bordes: a escuadra, biselados o redondeados.
- Paneles repelentes o resistentes al agua: se añaden silicona en distintos grados.
- Paneles contra el fuego o incombustibles.
- Paneles para acabados verticales: se les añade un acabado en relieve pegado al panel.
- Paneles perforados o granulados: normalmente para falsos techos.
- Paneles mixtos:
 - Paneles con barrera de vapor: llevan una lámina de aluminio en una de sus caras.
 - Paneles para techos registrables: llevan una cara interior plástica.
 - Paneles aislantes: pueden llevar poliestireno expandido, lana de vidrio o lana de roca.
- Paneles sándwich: Consisten en dos paneles con un núcleo aislante.

Para su colocación se precisan elementos auxiliares, perfiles de distintas formas fabricados en acero galvanizado. Generalmente los paneles son atornillados a la perfilería y la unión entre paneles se tapa con una pasta de juntas y se sella con unas bandas especiales de papel.

A continuación se presentan los requerimientos mínimos exigidos para los paneles destinados a tabiquería, que vienen regulados principalmente por las normas UNE-EN 12859 (AENOR, 2012) y UNE-EN 15318 (AENOR, 2009):

- Dimensiones: longitud ≤ 1000 mm, espesor 50-150 mm y superficie mínima 0,1 m². Densidad: baja (600-800 kg/m³), media (800-1100 kg/m³) y alta (1100-1500 kg/m³). Resistencia mecánica a flexión: > 1,7 KN (espesor 50 mm), > 1,9 KN (espesor 60 mm), > 2,3 KN (espesor 70 mm), > 2,7 KN (espesor 80 mm), > 4,0 KN (espesor 100 mm). Dureza superficial: 40 unidades (densidad baja), 55 unidades (densidad media), 80 unidades (densidad alta).
- Resistencia al impacto: la huella dejada por una bola de acero con una energía potencial de 245 J no será superior a 20mm de diámetro.
- Reacción al fuego: A1 (<1% materia orgánica). Con mayor cantidad de materia orgánica seguir norma UNE-EN 13501-1 (AENOR, 2010).
- Resistencia al fuego (véase tabla 1.14), para los casos no contemplados en la siguiente tabla, es necesario el ensayo en un laboratorio acreditado.

Espesor	Clase de densidad	E min. Paneles macizos	E min. Paneles perforados	E min. Paneles macizos	E min. Paneles perforados
50	baja (L)				
50	media (M)	60		60	
50	alta (H)				
60	L				
60	M	120	60	120	60
60	H	120	60	120	60
70	L				
70	M	180	120	180	120
70	H	180	120	180	120
80	L				
80	M				
80	H				
100	L				
100	M	240	180	240	180
100	H	240	180	240	180

Tabla 1.14. Valores de uso para la resistencia al fuego de tabiques de paneles de yeso, norma UNE-EN 15318 (AENOR, 2009)

Aislamiento acústico (véase tabla 1.15), para los casos no contemplados en la tabla anterior, es necesario el ensayo en un laboratorio acreditado.

Espesor (mm)	Clase de densidad L 600-800	Clase de densidad M 800-1100	Clase de densidad H 1100-1500
50	29 _(-2,-3) a 30 _(-1,-2)	30 _(-1,-2) a 33 _(-1,-3)	33 _(-1,-3) a 35 _(-1,-2)
60	30 _(-1,-3) a 31 _(0,-2)	31 _(0,-2) a 34 _(-1,-2)	34 _(-1,-2) a 37 _(0,-2)
70	31 _(-1,-3) a 33 _(-1,-2)	33 _(-1,-2) a 35 _(0,-2)	35 _(0,-2) a 39 _(-1,-3)
80	31 _(-1,-2) a 34 _(-1,-2)	34 _(-1,-2) a 37 _(-1,-3)	37 _(-1,-3) a 40 _(0,-3)
100	32 _(-1,-2) a 35 _(0,-3)	35 _(0,-3) a 39 _(-1,-4)	39 _(-1,-4) a 44 _(-1,-5)

Tabla 1.15. Valores de uso para el aislamiento acústico en dB de tabiques sin aberturas y tabiques sin aberturas y de gran altura, norma UNE-EN 15318 (AENOR, 2009)

- Desviación en la planicidad de los paneles: <1 mm.
- Contenido de humedad: ≤8%.
- Capacidad de absorción de agua: clase H2 ≤5% y clase H1≤2.5%.

Otros requerimientos opcionales se presentan a continuación:

- Aislamiento directo al ruido aéreo, normas UNE-EN ISO 140-3 (AENOR, 1995) y UNE- EN ISO 717-1 (AENOR, 2013).

Por otro lado se presentan los requerimientos mínimos exigidos a las placas de yeso laminado, que vienen regulados principalmente por la norma UNE-EN 520 (AENOR, 2010):

Resistencia a flexión: los valores mínimos son los que aparecen en la tabla 1.16.

Tipo de placa	Espesor nominal (mm)	Carga de rotura a flexión (N)	
		Transversal	Longitudinal
Común	9,5	160	400
	12,5	210	550
	15,0	250	650
	t	16,8xt	43xt
Resistencia mejorada	12,5	300	725
	15,0	360	870
	t	24xt	58xt
Preparada para enlucir	9,5	125	180
	12,5	165	235

Tabla 1.16 Valores mínimos de resistencia a flexión de placas de yeso laminado, norma UNE-EN 520 (AENOR, 2010)

Otros requerimientos opcionales se presentan a continuación:

- Deformación bajo carga, norma UNE-EN 520 (AENOR, 2010).
- Reacción al fuego, norma UNE-EN 13501-1 (AENOR, 2010).

- Resistencia al fuego, norma UNE-EN 13501-2 (AENOR, 2010).
- Resistencia al impacto, norma ISO 7892 (International Organization for Standardization, 1988).
- Permeabilidad al vapor de agua, norma UNE-EN 12524 (AENOR, 2000) y UNE-EN ISO 12572 (AENOR, 2002).
- Permeabilidad al aire, norma UNE-EN 12114 (AENOR, 2000).
- Aislamiento directo al ruido aéreo, normas UNE-EN ISO 140-3 (AENOR, 1995) y UNE-EN ISO 717-1 (AENOR, 2013).
- Absorción acústica, norma UNE-EN ISO 354 (AENOR, 2004). Resistencia térmica, norma UNE-EN 12664 (AENOR, 2002). Ortogonalidad $\leq 2,5$ mm por m de anchura.
- Absorción de agua para placas de yeso laminado con capacidad de absorción de agua reducida, los valores máximos son los que aparecen en la tabla 1.17.

Clases de absorción de agua	Absorción de agua superficial (g/m ²)	Absorción total de agua (%)
H1	180	≤ 5
H2	220	≤ 10
H3	300	≤ 25

Tabla 1.17. Valores de absorción máximos para placas de yeso laminado con capacidad de absorción de agua reducida, norma UNE-EN 520 (AENOR, 2010)

- Factor de resistencia al vapor de agua para placas de yeso laminado para exteriores, ≤ 25 .
- Densidad de placas de yeso laminado de densidad controlada, $\geq 0,8 \times 10^3$ kg/m³.
- Diámetro de huella para dureza superficial de placas de yeso laminado de alta dureza, ≤ 15 mm.

Y por último se presentan los requerimientos mínimos exigidos a paneles para techos suspendidos, que vienen regulados principalmente por las normas UNE-EN 13964 (AENOR, 2008) y UNE-EN 14246 (AENOR, 2007):

- Ortogonalidad: < 1 mm.
- Reacción al fuego: A1 ($< 1\%$ materia orgánica). Con mayor cantidad de materia orgánica seguir norma UNE-EN 13501-1 (AENOR, 2010).
- Humedad: se debe comprobar el aislamiento térmico y el punto de condensación de acuerdo con las normas UNE-EN ISO 6946 (AENOR, 2012) y UNE-EN ISO 10211-1 (AENOR, 1995). El contenido medio de

humedad no debe ser superior al 6% y ningún valor individual debe ser superior al 8%.

- Resistencia a flexión: $\geq 6\text{kg}$ en paneles para techos desmontables y $\geq 4\text{kg}$ en paneles para techo continuos.
- PH: 6,5-10,5.

Otros requerimientos opcionales se presentan a continuación:

- Resistencia al fuego, norma UNE-EN 13501-2 (AENOR, 2010). Resistencia al impacto, norma UNE-EN 13964 (AENOR, 2008).
- Resistencia sísmica, norma UNE-EN 1998-1 (AENOR, 2011).
- Aislamiento directo al ruido aéreo, norma UNE-EN ISO 140-3 (AENOR, 1995) y UNE-EN ISO 717-1 (AENOR, 2013).
- Absorción acústica, norma UNE-EN ISO 354 (AENOR, 2004).
- Aislamiento térmico, norma UNE-EN ISO 6946 (AENOR, 2012) y UNE-EN ISO 10211-1 (AENOR, 1995) (datos obtenidos con las normas UNE-EN 12524 (AENOR, 2000), UNE-EN 12664 (AENOR, 2002) o UNE-EN 12667 (AENOR, 2002).
- Permeabilidad al vapor de agua, norma UNE-EN 12524 (AENOR, 2000).

1.1.3.2. Otras aplicaciones de yeso

- Las placas pueden tener recubrimientos de barita o láminas de plomo que se atornillan al tabique para ser usadas en salas radiológicas de hospitales y clínicas, para servir como barrera contra las radiaciones ionizantes. También pueden cubrirse con láminas de fibra de vidrio que son totalmente lavables, para cocinas industriales o fábricas de alimentos.
- El polvo de aljez se emplea en los procesos de producción del cemento Portland, donde actúa como elemento retardador del fraguado.
- El yeso en albañilería también se utiliza para la confección de morteros simples para la construcción de tabiques y bóvedas para formación de cielos rasos, esgrafiados, estucos. También se emplea motivos de adorno en la edificación. Junto con arcilla se emplea como fertilizante y sin fraguar es un aditivo retardador de la solidificación en el cemento. También se usa como fundente cerámico y como relleno de pinturas.

- El espatado satinado y la variedad alabastro se tallan y pulen con fines ornamentales. Los ejemplares cristalizados como rosa del desierto, se venden como objetos decorativos y a coleccionistas. Debido a su exfoliación laminar y su transparencia, así como su baja conductividad térmica, los romanos lo utilizaron en algunos casos a modo de aislante en ventanas, como hoy se usa el vidrio (como el caso del Yacimiento romano de Segobriga –Madrid). Como materiales de carga en la industria del papel y la goma.

1.1.4 El consumo de yeso en la construcción

En general, el consumo mundial de yeso no ha dejado de crecer y de hecho se prevé que para el año 2023 se duplique con respecto al consumo estimado para el año 2014. De todos los continentes, Asia es el mayor consumidor de yeso, seguido de lejos por América y Europa. El país con mayor consumo es China y además es el país con la previsión de aumento de consumo más importante, a diferencia de los países de la Unión Europea y Estados Unidos cuyo consumo se prevé que aumente en próximos años pero de manera poco significativa (véase Figura 1.03).

Figura 1.03. Previsión de consumo mundial de yeso (Smithers Apex, 2016)

1.1.5 Impacto ambiental del yeso tradicional

El primer factor de impacto ambiental del yeso tradicional es su origen, ya que se obtiene de la explotación de canteras de aljez. Dentro de los impactos ambientales derivados del desarrollo de la explotación de canteras se encuentran:

- Alteraciones del suelo y modificación de sus propiedades. Destrucción de la flora y la fauna.
- Pérdida de la biodiversidad.
- Alteraciones en las aguas superficiales (alteración de los ríos, drenajes superficiales, contaminación física y química de las aguas superficiales).
- Alteraciones en las aguas subterráneas (depresión del nivel freático, contaminación química del acuífero).
- Impactos sobre los riesgos geológicos (aumento del riesgo de desprendimientos o deslizamientos).
- Cambios geomorfológicos y del paisaje (modificación del relieve, alteración del color, rotura de la cuenca visual, introducción de formas extrañas, focalización de la percepción en la cantera en detrimento de otros puntos).
- Alteraciones en la atmósfera (emisión de polvo, ruido y vibraciones).
- Impactos sobre el medio socio-económico (limitación en los usos del suelo, destrucción de recursos culturales, impactos sobre las vías de comunicación).

Otro de los factores que más impacto tiene es el proceso de calcinación a alta temperatura, por el uso de combustibles fósiles y la emisión de gases de efecto invernadero, aunque hay que destacar que los conglomerantes son los que menos temperatura necesitan para su proceso de fabricación.

También hay que tener en cuenta que, a pesar de que no es un material escaso, al ser un recurso natural, es necesario transportarlo tanto a las fábricas donde se produce, como a los países o zonas donde sí es escaso, lo que en general conlleva a un consumo de combustibles fósiles.

1.1.6 Posibles mejoras para el yeso en la construcción

Dadas las circunstancias en que se encuentra el planeta, sería ideal reducir los factores que generan mayor impacto sobre el ecosistema, creando así un Yeso del Siglo XXI, sostenible con el medioambiente y propio de la economía circular. Para ello las medidas a tener en cuenta para mejorar la producción del yeso serían:

- En primer lugar reducir la explotación de las canteras naturales sustituyendo parte de la materia prima por RCD ya generado durante la actividad de la edificación. De este modo disminuiría igualmente las emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera así como se reduciría las grandes cantidades de residuos que actualmente se depositan en vertedero.
- Al sustituir parte de la materia prima del yeso por RCD, habría que analizar detenidamente cada composición para mejorar o mantener las características técnicas originales del yeso. De ese modo se podría elaborar “nuevos yesos reciclados” que mejoren su comportamiento ante las sus distintas aplicaciones, siempre cumpliendo las exigencias establecidas por normativa:
 - Como material de revestimientos continuos de paramentos interiores es la aplicación más comercial, por ello se podría mejorar sus propiedades frente a la dureza superficial, absorción de agua por capilaridad, adherencia, resistencias mecánicas, así como su trabajabilidad.
 - Como material para prefabricados de yeso, se podría mejorar su trabajabilidad, dureza superficial, así como sus resistencias a flexión y compresión.

1.2 Los Residuos de Construcción y Demolición (RCD). Los residuos cerámicos.

Los residuos son productos de la actividad humana sin valor y por tanto son considerados como desecho. De hecho, la Directiva Marco de Residuos 2008/98/CE (El Parlamento Europeo, 2008) los define como “cualquier sustancia u objeto del cual su poseedor se desprenda o tenga la intención o la obligación de desprenderse”.

El ser humano ha generado residuos desde la antigüedad, sin embargo, estos residuos entonces no eran considerados un problema, ya que en general eran residuos orgánicos biodegradables o residuos que podían utilizarse en la fabricación de utensilios o materiales de construcción. Con la formación de grandes núcleos sociales los residuos comenzaron a suponer un problema sanitario y estético y por ello se comenzó a gestionar su acumulación. Pero no es hasta la edad contemporánea en que se produce el desarrollo industrial y el crecimiento descontrolado de la población, cuando los residuos vuelven a destacar debido tanto a la cantidad generada, como por la composición de los mismos: materiales naturales, productos químicos, metales, etc. (Alcaide Tur, 2012).

Los Residuos de Construcción y Demolición (RCD), también llamados residuos inertes y conocidos habitualmente como escombros, son aquellos que se generan en las actividades propias de construcción y esencialmente durante la rehabilitación, reforma, demolición y mantenimiento de edificios o infraestructuras en general.

1.2.1 Tipología de residuos

La composición de los RCD varía según se trate de nueva construcción, rehabilitación o demolición. También depende de la actividad para la que se ha diseñado el edificio, así como la zona donde se haya realizado la obra y la edad de la misma, ya que los materiales una vez utilizados van sufriendo variaciones importantes en el tiempo.

Se tratan de residuos constituidos básicamente por tierras y áridos mezclados, piedras, restos de hormigón, ladrillos, vidrios, restos de pavimentos asfálticos, materiales refractarios, plásticos, yesos y maderas.

La generación de RCD ha aumentado como consecuencia del crecimiento urbanístico. Hasta hace poco tiempo el destino de estos residuos era el vertedero,

lo que provocó la saturación de los mismos con unos materiales susceptibles de ser recuperados y reciclados.

La mala gestión de estos residuos crea un grave problema a nuestro entorno, agravándose cada año. El abandono indiscriminado de éstos en lugares conocidos como “escombreras”, que son en realidad vertederos ilegales, ha creado fuertes impactos sobre el medio. Además del deterioro ambiental y paisajístico causado, también hay que tener en cuenta que se está perdiendo una suma importante de materiales que podrían ser recuperados y reutilizados, ya que muchos de estos residuos tienen un valor económico considerable (II PNIR 2008-2015).

En las últimas décadas la generación de los RCD ha sufrido un importante incremento, lo que ha dado lugar a que las distintas Administraciones Públicas comenzaran a regular la gestión de este tipo de residuos. El II Plan Nacional Integrado de Residuos, 2008-2015 (II PNIR), estableció una serie de actuaciones que deben llevarse a cabo durante determinados periodos de tiempo, con el objetivo de controlar y reducir la generación de estos residuos, así como fomentar su correcta gestión (II PNIR 2008-2015).

Además ya está vigente el III Plan Estatal de Residuos 2016 – 2022 el cual pretende ser el instrumento para orientar la política de residuos en España, impulsando las medidas necesarias para mejorar las deficiencias detectadas y promoviendo las actuaciones que proporcionan un mejor resultado ambiental y que aseguren la consecución de los objetivos legales. Este programa junto con el Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos constituyen los instrumentos claves para la aplicación de la política de prevención y gestión de residuos en España.

En Europa, el catálogo Europeo de RCD, clasifica los residuos en nueve grupos:

- Mezclas de hormigón, ladrillos, tejas y materiales cerámicos.
- Madera, vidrio y plástico.
- Mezclas bituminosas, alquitrán de hulla y otros productos alquitranados.
- Metales (incluidas sus aleaciones).
- Tierra (incluida la excavada en zonas contaminadas), piedras y lodos de drenaje.
- Materiales de aislamiento y materiales de construcción que contienen amianto.
- Materiales de construcción a base de yeso.
- Otros residuos de construcción y demolición.

Asimismo, dentro de cada grupo aparecen especificados algunos residuos como peligrosos, de conformidad con la Directiva 2008/98 CE sobre residuos peligrosos, a cuyas disposiciones están sujetos, a menos que se aplique el apartado 5 del artículo 1 de esta Directiva.

En España, en cambio, en la mayoría de los planes de gestión, se clasifican los RCD en dos grandes grupos:

- Residuos de Nivel I, residuos generados por el desarrollo de las grandes obras de infraestructura de ámbito local o supramunicipal, siendo resultado de los excedentes de excavación de los movimientos de tierra generados en el transcurso de dichas obras.
- Residuos de Nivel II, generados principalmente en las actividades propias del sector de la construcción, de la demolición, de la reparación domiciliaria y de la implantación de servicios.

Los residuos se pueden categorizar atendiendo a diferentes factores, como su naturaleza, su composición, su destino o su efecto en el medio ambiente. A continuación se desarrollan las tres clasificaciones, que por su uso, se consideran más importantes:

A) atendiendo a su naturaleza.

B) atendiendo a su procedencia.

C) atendiendo a la codificación de la Lista Europea de Residuos (LER).

A) Clasificación de los residuos atendiendo a su **naturaleza** (Planética.org, 2011)

- Residuos orgánicos: todo desecho de origen biológico, que alguna vez estuvo vivo o fue parte de un ser vivo. Es biodegradable y por tanto constituye una fuente importante de abonos de alta calidad.
- Residuos inorgánicos: todo desecho de origen no biológico, de origen industrial o de algún otro proceso no natural.
- Residuos peligrosos: todo desecho, ya sea de origen biológico o no, que constituye un peligro potencial y por lo cual debe ser tratado de forma especial.

B) Clasificación de los residuos atendiendo a su **procedencia**:

- Residuos del sector productivo primario: que proceden de las actividades agrícolas, ganaderas, forestales o mineras.

- Residuos del sector productivo secundario: que proceden de las actividades industriales de transformación y se pueden clasificar a su vez en:
 - Residuos inertes: son aquellos residuos que no experimentan transformaciones físicas, químicas o biológicas significativas. Los residuos inertes no son solubles ni combustibles, ni reaccionan física ni químicamente ni de ninguna otra manera, ni son biodegradables, ni afectan negativamente a otras materias con las cuales entran en contacto de forma que puedan dar lugar a contaminación del medio ambiente o perjudicar a la salud humana. La lixiviabilidad total, el contenido de contaminantes de los residuos y la del lixiviado deberán ser insignificantes, y en particular no deberán suponer riesgo para la calidad de las aguas superficiales y/o subterráneas. Algunos ejemplos de estos residuos son restos escombros y chatarra (Gobierno de España, 2001).
 - Residuos peligrosos: peligrosos: son aquellos residuos que en cualquier estado físico o químico, contienen elementos o sustancias que pueden representar un peligro para el medio ambiente, la salud humana o los recursos naturales. Para identificarlos se debe comprobar si presentan una o varias de las características peligrosas enumeradas en el anexo III de la Ley 22/2011, pudiendo ser calificados como: explosivos, oxidantes, fácilmente inflamables, irritantes, nocivos, tóxicos, cancerígenos, corrosivos, infecciosos, tóxicos para la reproducción, mutagénicos, que emiten gases tóxicos o muy tóxicos al entrar en contacto con el aire, con el agua o con un ácido, sensibilizantes, ecotóxicos y/o susceptibles, después de su eliminación, de dar lugar a otra sustancia por un medio cualquiera, por ejemplo, un lixiviado que posee alguna de las características anteriormente enumeradas; además de aquellos que pueda aprobar el Gobierno de conformidad con lo establecido en la normativa europea o en los convenios internacionales de los que España sea parte, así como los recipientes y envases que los hayan contenido (Jefatura del Estado, 2011). A su vez, estos residuos aparecen la Lista Europea de Residuos identificados con el símbolo asterisco (*). Residuos radiactivos: son aquellos materiales o productos de desecho, para el cual no está previsto ningún uso, que contiene o está contaminado con radionucleidos en concentraciones o niveles de actividad superiores a los establecidos por el Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, previo informe del Consejo de Seguridad Nuclear (Comisión Nacional de Energía, 1997).

- Residuos del sector productivo terciario: que proceden de la actividad doméstica, comercial y de la construcción. Los más importantes son:
 - Residuos sanitarios: son aquellos residuos generados en hospitales, clínicas o laboratorios farmacéuticos.
 - Residuos sólidos: son aquellos residuos generados en las actividades realizadas en los núcleos urbanos o en sus áreas de influencia.

C) Clasificación de los residuos atendiendo a la **codificación de la Lista Europea de Residuos**:

La Lista Europea de Residuos (LER), inicialmente publicada en la Orden MAM/304/2002 (Gobierno de España, 2002), establece un listado de 20 capítulos en los que tienen cabida todos los residuos existentes. El sistema de codificación LER se estructura en 3 niveles de desagregación: el primer nivel correspondiente a los capítulos es representado mediante un código numérico de 2 cifras; el segundo nivel correspondiente a los subcapítulos se caracteriza por un código numérico de 4 cifras que incorpora en sus 2 primeras cifras el código del capítulo al que pertenece; finalmente, los residuos son codificados con un código numérico de 6 cifras que incorpora el código del subcapítulo del que forma parte. Los residuos peligrosos aparecen en la lista señalados con un asterisco de acuerdo con la Directiva del Consejo 2008/98/CE (El Consejo de las Comunidades Europeas, 1991).

Los capítulos en que se clasifican los residuos en la Lista Europea de Residuos son:

- Residuos de la prospección, extracción de minas y canteras y tratamientos físicos y químicos de minerales.
- Residuos de la agricultura, horticultura, acuicultura, silvicultura, caza y pesca; residuos de la preparación y elaboración de alimentos.
- Residuos de la transformación de la madera y de la producción de tableros y muebles, pasta de papel, papel y cartón.
- Residuos de las industrias del cuero, de la piel y textil.
- Residuos del refino de petróleo, purificación del gas natural y tratamiento pirolítico del carbón.
- Residuos de procesos químicos inorgánicos.
- Residuos de procesos químicos orgánicos.

- Residuos de la fabricación, formulación, distribución y utilización (FFDU) de revestimientos (pinturas, barnices y esmaltes vítreos), adhesivos, sellantes y tintas de impresión.
- Residuos de la industria fotográfica.
- Residuos de procesos térmicos.
- Residuos del tratamiento químico de superficie y del recubrimiento de metales y otros materiales
- Residuos de la hidrometalurgia no férrea.
- Residuos de moldeado y del tratamiento físico y mecánico de superficie de metales y plásticos.
- Residuos de aceites y de combustibles líquidos.
- Residuos de disolventes, refrigerantes y propelentes orgánicos.
- Residuos de envases; absorbentes, trapos de limpieza, materiales de filtración y ropas de protección no especificados en otra categoría.
- Residuos de la construcción y demolición (incluida la tierra excavada de zonas contaminadas).
- Residuos de servicios médicos o veterinarios o de investigación asociada (salvo los residuos de cocina y de restaurante no procedentes directamente de la prestación de cuidados sanitarios).
- Residuos de las instalaciones para el tratamiento de residuos, de las plantas externas de tratamiento de aguas residuales y de la preparación de agua para consumo humano y de agua para uso industrial.
- Residuos municipales (residuos domésticos y residuos asimilables procedentes de los comercios, industrias e instituciones), incluidas las fracciones recogidas selectivamente.

1.2.2 Generación de residuos

La generación de residuos está muy ligada al consumo. Por tanto a nivel mundial las grandes potencias son las que más residuos generan en general, destacando Asia, Norte América y Europa. En la Unión Europea, en 2010, la generación total de residuos por parte de las actividades económicas y los hogares ascendió a 2.502 millones de toneladas. Esta cifra fue ligeramente superior a la de 2008, pero inferior a las de 2004 y 2006. Las cifras relativamente bajas correspondientes a 2008 y 2010 reflejan, en parte, la desaceleración de la actividad económica como consecuencia de la crisis económica y financiera (véase Figura 4).

De los países de la Unión Europea que más residuos generan destacan Alemania y Francia, que generan más de 300 millones de toneladas de residuos anuales cada uno. Además, casi la mitad de los países de la Unión Europea, entre los que se encuentra España, generan más de 100 millones de toneladas de residuos anualmente (véase Figura 1.04).

Figura 1.04. Residuos generados por países de la Unión Europea en 2014 (Eurostat, 2017)

La actividad económica que más residuos genera en la Unión Europea es la del sector de la construcción, responsable de un 33% de los residuos totales generados (véase Figura 1.05). La gran mayoría de los residuos de construcción y demolición (RCD) están compuestos por residuos minerales o del suelo (tierra excavada, residuos de la construcción de carreteras, lodos de drenaje, rocas residuales, residuos mineros, etc.). Pero si no se tienen en cuenta estos residuos, la generación de residuos en el sector de la construcción no ha dejado de aumentar desde 2004 a 2010 en la Unión Europea (European Commission, 2014)

Figura 1.05. Generación de residuos en la Unión Europea por actividades económicas en 2014 (Eurostat, 2017)

El estudio realizado por Fischer y Werge (2009) analiza la generación de RCD per cápita en los Estados miembros de la UE y Noruega durante la época 1995-2006 y entre los datos que recoge se observa que todos los países donde los datos de más de un año están disponibles, a excepción de Alemania, han aumentado la generación de RCD per cápita en el período 1995 a 2006, siendo Luxemburgo, Francia y Finlandia los países con mayor generación de residuos per cápita.

A partir del 2006 no se han encontrado estudios o informes que analicen la generación de RCD per cápita para cada año. Sin embargo, en el año 2014 Eurostat determinó los valores de generación de RCD per cápita para la UE para los años 2006, 2008 y 2010, de los cuales se observa que Luxemburgo sigue siendo el país con mayor generación de RCD superando las 14,00 t per cápita y que el resto de países en general mantienen o aumentan su generación de residuos desde el año 2006 al 2010 (Villoria Sáez, 2014)

La Directiva 98/2008/CE establece el siguiente objetivo para los RCD: "En el año 2020, la reutilización, el reciclado y la recuperación de otros materiales, incluyendo las operaciones de relleno con residuos no peligrosos de construcción y demolición se incrementará alcanzando como mínimo el 70% en peso de los

RCD generados (excluido el material de origen natural definido en la categoría de 170504 en la LER)". Cabe señalar que esta Directiva no establece objetivos para cada categoría de residuo de forma individual, sino que exige un objetivo global y que, por otra parte, la definición de reciclado excluye explícitamente "[...] la transformación en materiales que se van a usar como combustibles o para operaciones de relleno."

Actualmente el promedio de reciclaje de RCD en la Unión Europea llega aproximadamente al 50%. Dinamarca, Alemania, Irlanda, Países Bajos y Estonia, cumplen con el objetivo de reciclaje marcado por la Directiva 98/2008/CE, superando el 80% de RCD reciclado, mientras que Austria, Bélgica, Francia, Lituania y el Reino Unido reciclan entorno al 60-70% del RCD. La posición de España no es alentadora, aún hoy, continúa en la parte inferior de la lista, con Chipre y la República Checa, cuya tasa de reciclaje es muy inferior al 40% (véase Figura 1.06).

Figura 1.06. Porcentaje de RCD reciclado sobre el total generado en la Unión Europea en el año 2014 (Eurostat, 2017)

En España, en los últimos años el crecimiento de los núcleos urbanos (promovido por una buena situación económica) y por tanto de la actividad de construcción, ha ocasionado unos índices muy elevados de generación de residuos. Al igual que en la Unión Europea, las estadísticas europeas para el año 2010 reflejan que el sector de la construcción en España es el sector que más residuos genera con un 28% sobre el residuo total generado (véase Figura 1.07).

Figura 1.07. Generación de residuos en España por actividades económicas en 2010 (European Commission, 2014)

En cuanto al estudio por comunidades autónomas, el segundo Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición (II PNRCD) analiza la generación de residuos en la industria española durante los años 2001 y 2005, y publica los datos de RCD generados en cada comunidad autónoma. De los datos publicados se observa que la generación de RCD en España ha crecido en los cinco años analizados a un ritmo medio del 8,7% anual y que casi la mitad de los residuos (el 49,2%) se han generado en Cataluña, la Comunidad Valenciana y Andalucía. Una cuarta parte se ha generado en Madrid, Castilla-La Mancha y Galicia. El resto de los residuos se distribuyen de una forma, casi homogénea, entre Ceuta, Melilla y las restantes comunidades autónomas (véase Tabla 1.18).

CCAA	Habitantes	Toneladas/año			
		2008	2009	2010	2011
Andalucía	8.370.975		2.644.125	3.159.626	1.680.470
Aragón	1.347.095	1.986.112	272.048	502.491	380.245
Asturias (Principado de)	1.084.341	338.692	378.401	372.401	324.979
Balears (Illes)	1.106.049	870.655	738.703	548.130	416.248
Canarias	2.118.519				294.886
Cantabria	592.250	144.410	100.523	83.379	122.018
Castilla y León	2.559.515				
Castilla-La Mancha	2.098.373	666.143	891.980	789.954	772.260
Cataluña	7.512.381	7.408.785	4.714.237	3.527.020	3.200.000
Comunitat Valenciana	5.111.706	1.768.817	2.396.304	2.327.161	
Extremadura	1.107.220	68.499	175.891	111.820	29.717
Galicia	2.797.653	490.932	628.863	546.797	
Madrid (Comunidad de)	6.458.684	3.300.573	2.706.045	2.790.573	2.677.506
Murcia (Región de)	1.461.979	1.281.088	726.944	214.614	
Navarra (Comunidad Foral de)	636.924	462.595	360.642	307.696	195.702
País Vasco	2.178.339	1.782.251	1.380.082		
Rioja (La)	322.415	162.903	202.902	268.240	221.764
Total en España	46.864.418	20.732.455	18.317.690	15.549.902	10.315.795

Tabla 1.18. Toneladas de RCD generados en España por comunidad autónoma para el período 2011-2013 (GERD, 2015)

Por otra parte, según datos publicados en la estrategia de residuos de la Comunidad de Madrid para los años 2006-2016, el 80% de los RCD generados corresponden a residuos minerales o áridos. Si no se tienen en cuenta los áridos, los residuos más generados son la madera, los metales y los plásticos (Consejería de Medio Ambiente y Ordenación, 2016).

Aunque los últimos datos de generación de RCD en España se refieren al año 2012 (53 millones de toneladas), no se ha encontrado información del RCD reciclado para ese mismo año. En cambio, ambos datos se han obtenido para el año 2009, donde sólo el 13,6% de los RCD generados en España fueron reciclados (véase Tabla 1.19).

	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

Tabla 1.19. Porcentaje de RCD reciclado en cada país en el año 2012 (Eurostat, 2017)

1.2.2.1 Problemática derivada de la generación de residuos

Los principales problemas reconocidos actualmente derivados de la generación de residuos son (Lorenzo García, 2013):

- El agotamiento de los ecosistemas.
- La contaminación de los suelos.
- La contaminación de los acuíferos lixiviados.
- La contaminación de las aguas superficiales.
- La emisión de gases de efecto invernadero.
- La ocupación incontrolada del territorio generando la destrucción del paisaje y de los espacios naturales.
- La creación de focos infecciosos.
- La proliferación de las plagas de roedores e insectos.
- La producción de malos olores.

1.2.2.2 La gestión de los residuos

La gestión de residuos supone el conjunto de sistemas, herramientas y planes utilizados para controlar el camino definido por el residuo, desde su generación hasta su disposición final de forma controlada y segura para el medio ambiente. De hecho la Directiva 2008/98/CE lo define como “la recogida, el transporte, la valorización y la eliminación de los residuos, incluida la vigilancia de estas operaciones, así como el mantenimiento posterior al cierre de los vertederos, incluidas las actuaciones realizadas en calidad de negociante o agente”.

Dentro de la gestión de residuos se incluye una jerarquía de prioridades que establece medidas destinadas a proteger el medio ambiente y la salud humana mediante la prevención o la reducción de los impactos adversos de la generación y gestión de los residuos, la reducción de los impactos globales del uso de los recursos y la mejora de la eficacia de dicho uso (véase Figura 1.08). Cada una de estas opciones debe ser analizada para cada tipo de residuo para determinar cuál es la opción que mejores resultados medio ambientales globales suponga (Villoria Sáez, et al., 2012). Aunque existen varias opciones para gestionar los residuos, no todos los procesos permiten aplicar con éxito medidas que tienden a la prevención, por lo que una vez que se da el residuo, generalmente la manera más indicada para disminuir su impacto al medio ambiente es volver a utilizarlo (González Madariaga, 2005).

Figura 1.08. Jerarquía de gestión de residuos Directiva 2008/98/CE (El Parlamento Europeo, 2008)

Las buenas prácticas en gestión de residuos pueden convertirse en una herramienta eficaz de promoción entre los posibles clientes, ya que los criterios ambientales son cada vez más tenidos en cuenta a la hora de adjudicar obras por la Administración o el sector privado (Villoria Sáez, et al., 2013).

Por otra parte, una correcta gestión de residuos, además de ser beneficiosa para el medio ambiente, puede llegar a suponer una reducción de costes al disminuirse el gasto en recursos naturales y al propiciar una disminución de tiempos de trabajo debido a la organización que precisa (Cámaras Oficiales de Comercio, 2006).

Por último, el fomentar medidas como la reutilización o el reciclaje frente a la valorización o la eliminación supone evitar métodos como la incineración. Las incineradoras de residuos son instalaciones caras de construir y de mantener. Las que funcionan actualmente tienen períodos de amortización de varias décadas y requieren de un aporte sostenido de residuos para hacer viable la recuperación de las inversiones. Además, la incineración promueve la emisión de gases contaminantes, con el sobrecoste medioambiental que ello conlleva (Greenpeace, 2010).

1.2.3 Buenas prácticas de reciclaje de RCD

Existen diversas guías y manuales que determinan las posibles aplicaciones de los residuos de RCD en las obras. A nivel internacional cabe destacar la “Construction and demolition waste guide recycling and re-use across the supply chain”, la cual determina buenas prácticas para la reutilización de escombros de ladrillo y hormigón como bases y sub-bases para la ejecución de carreteras (Department of the environment, 2012). También destaca el “Construction & Demolition Waste Manual”, que clasifica los RCD según su viabilidad de reutilización o reciclaje en obra (Gruzen Samton LLP with City Green Inc., 2003).

A nivel nacional, destaca el catálogo digital de residuos utilizables en construcción, desarrollado por los técnicos del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX). No obstante, este catálogo contempla únicamente el reciclaje de residuos de hormigón, materiales cerámicos y asfaltos (CEDEX, 2012). Sin embargo, en ningún caso presenta estrategias de reutilización para otros residuos de naturaleza no inerte, como por ejemplo la madera, el yeso o el vidrio.

En general, entre las buenas prácticas de reciclaje de RCD encontradas destacan principalmente:

- La contratación de suministradores que recojan su propio residuo, estos a su vez pueden introducir de nuevo estos materiales en su sistema de producción (Begum, et al., 2007).
- El reciclaje del hormigón, en general, las principales aplicaciones de los residuos de hormigón son los áridos reciclados y cabe destacar que este es el único caso de reciclaje de RCD contemplado en normativa.

Según la EHE-08 el árido reciclado puede emplearse, en su fracción gruesa, tanto para hormigón en masa como hormigón armado de resistencia característica no superior a 40N/mm^2 , quedando excluido su empleo en hormigón pretensado. Aunque es recomendable que la proporción de árido grueso reciclado no supere el 20%.

Por otra parte, el árido fino reciclado no se considera apto para la fabricación de nuevos hormigones, por lo que debe separarse y utilizarse en otras aplicaciones, como por ejemplo:

- En la elaboración de morteros para revestimientos interiores y en trabajos de albañilería interior en general, evitando cambios en la temperatura y en la humedad (CEDEX, 2012).
- En la mejora de las propiedades mecánicas de suelos cohesivos y arenas limosas mediante su aplicación en columnas de grava.
- En los rellenos para la formación del paisaje de zonas ajardinadas comunes, en pistas forestales, materiales para muros y aplicaciones acústicas.
- En la mejora de la granulometría de suelos y, eventualmente, para la neutralización de suelos ácidos.

Sin embargo, en términos generales, no es conveniente reciclar el residuo de hormigón in situ, pues para esto es necesario realizar una serie de controles de calidad, tanto al árido como al hormigón. Estos controles aumentan significativamente el coste económico y el riesgo de no cumplir con la resistencia mínima que obliga la normativa actual. Una buena alternativa es la compra de áridos reciclados, provenientes de las plantas de reciclaje de RCD, para fabricar el hormigón elaborado in situ. Los áridos provenientes de estas instalaciones tienen, no solo la ventaja de que ya han pasado un control de calidad del producto terminado, sino que tienen un precio competitivo con respecto a los áridos naturales.

Como se puede observar en la Tabla 1.20, el precio medio del árido reciclado ronda los 3,27 €/t, frente a los 8,00 €/t del árido natural extraído en cantera.

TARIFA VENTA DE PARA EL 2014 (€/t)	
Arena de miga	4,75
Zahorra 0-20mm	3,00
Zahorra 0-40mm	4,00
Grava 20-40mm	4,00
Zahorra 0-60mm	2,00
0-40mm Cerámico-hormigón	3,50
20-40mm Cerámico- hormigón	1,00
40-80mm Cerámico- hormigón	3,50
0-6 mm Material para relleno	3,00

Tabla 1.20. Precio de venta de árido reciclado en la planta de reciclaje de Navalcarnero, Madrid (UTE, Planta de Navalcarnero, 2016)

1.2.4 Los residuos cerámicos

El sector cerámico español ha sido el mayor productor europeo de este material para la construcción en los años de esplendor de la construcción, con más de 30 millones de toneladas anuales. (Asociación Española de Fabricantes de Ladrillos y Tejas de Arcilla Cocida 2018 - Hispalyt). Por ello España ha sido también una referencia a nivel de innovación y tecnología industrial gracias a las grandes inversiones en I+D realizadas en aquellos años y las que continúan actualmente dentro de las posibilidades de cada empresa.

Cabe destacar el esfuerzo inversor que el sector ha realizado en materia de I+D+i en los últimos años. Se han mejorado los procesos industriales en busca de una mayor eficiencia y menor consumo energético (Hispalyt, 2017).

Gracias al avance tecnológico, la industria cerámica estructural ha incrementado su producción un 70% desde 1990, mientras que las emisiones específicas de CO₂ se han reducido un 18%, lo que demuestra el compromiso medioambiental de uno de los sectores que cumple con las directrices del protocolo de Kyoto (Hispalyt, 2017).

1.2.5 Producción de los materiales cerámicos

El proceso de fabricación industrial actual de los materiales cerámicos ha evolucionado notablemente en los últimos años y contempla las siguientes etapas, que en la mayor parte de los casos están automatizadas y, en muchos casos, robotizadas:

- 1º) Extracción de arcillas: La extracción de arcillas se realiza en canteras y bajo estrictos controles de seguridad y respeto medioambiental. Una vez explotadas las canteras, estas se regeneran para diferentes usos, preferentemente agrícolas.

Con el fin de homogeneizar la materia prima extraída de las canteras, para iniciar su proceso de envejecimiento y maduración, se constituyen lechos de homogenización.

La materia prima, procedente de las canteras se almacena antes de entrar en la línea de fabricación. El tipo de almacenamiento depende de si la molienda se hace por vía húmeda o por vía seca.

- 2º) Desmenuzado, mezcla y molienda: La preparación de la materia prima utilizada en la elaboración de los materiales cerámicos consiste en un desmenuzado previo a la entrada en la planta y en una molienda en la planta.

En el desmenuzado se reduce el tamaño del grano de la arcilla consiguiendo una homogeneización del material, evitando un mayor consumo energético y alargando la vida útil de los equipos. Una vez desmenuzada, los diferentes tipos de arcilla se almacenan en silos.

- 3º) Amasado: Una vez que se han alcanzado los niveles de granulometría requeridos en la materia prima se introduce la arcilla en la amasadora, donde se producirá la primera adición de agua, para obtener una masa plástica moldeable por extrusión. La cantidad de agua que se introduce depende de la humedad con la que venga la arcilla de la cantera y de las condiciones climáticas a las que esté expuesta durante la fase de almacenamiento.

- 4º) Moldeo: Posteriormente se hace pasar la arcilla por la extrusora o galletera, donde, mediante bomba de vacío, se extrae el aire que pudiera contener la masa y se presiona contra un molde, obteniendo una barra conformada con la forma del producto. Con este sistema, se reduce el consumo de agua en la industria y se puede trabajar con pastas cerámicas más secas.

- 5º) Cortado y apilado: Tras su paso por la extrusora, la barra conformada se hace pasar a través del cortador donde se fijarán las dimensiones finales del producto. El material cerámico se apila en estanterías o vagonetas antes de introducirlo en el secadero.

6º) Secado y cocción: El material apilado se introduce en el secadero, donde se busca reducir el contenido de humedad de las piezas hasta un 1-2%. El material procedente del secadero entra en el horno túnel para el proceso de cocción, que consta de tres zonas diferenciadas, calentamiento, cocción y enfriamiento. La tecnología actual de los hornos túneles permite lograr una producción industrial de materiales cerámicos con un excelente rendimiento térmico. Así, se logra reducir el consumo energético y también las emisiones de gases a la atmósfera.

7º) Empaquetado y almacenamiento: Terminado el proceso de cocción, se produce el desapilado de los materiales cerámicos procedentes de las vagonetas, y su depósito sobre la línea de empaquetado y plastificado. Por último, los paquetes se almacenan en el patio exterior a la espera de ser transportados hasta el emplazamiento de las obras.

Figura 1.09. Esquema de producción de materiales cerámicos (Hispalyt, 2018).

1.2.6 Aplicaciones de los materiales cerámicos

- Ladrillos: Los ladrillos son utilizados en construcción en cerramientos y fachadas. Se utiliza principalmente para construir muros o tabiques. Lo habitual es que se reciban con mortero. Según su forma, los ladrillos se clasifican en diferentes tipos: perforado, macizo (con menos de 10% de perforaciones), manual (simulan ladrillos de fabricación artesanal), aplantillado (perfil curvo), caravista (se utilizan en exteriores con un acabado especial), refractario (para hornos o chimeneas).

- Termoarcilla: La Termoarcilla es una arcilla con aditivos que desaparecen en la cocción. Tiene una baja densidad y mayor grosor que el ladrillo convencional.

Se fabrica partiendo de una mezcla de arcilla, esferas de poliestireno expandido y otros materiales granulares, que se gasifican durante el proceso de cocción a más de 900 °C sin dejar residuos, se origina una fina porosidad homogéneamente repartida en la masa cerámica del bloque. Se trata de macroporos visibles.

Este formato de piezas cerámicas tiene un coste reducido de puesta en obra y rapidez de ejecución ya que el bloque Termoarcilla tiene grandes dimensiones, por lo que los muros se construyen con menor número de piezas, y tienen las testas machihembradas, permitiendo el encaje entre bloques, sin necesidad de colocar mortero en la junta vertical. Al final, se ahorra mortero y tiempo para levantar un muro.

Referente al medioambiente y a la salud: Termoarcilla hace posible la construcción de una vivienda sana sin problemas de toxicidad, radiaciones ni alergias. Por sus características especiales, Termoarcilla facilita el ahorro energético.

- Tejas: Las tejas se fabrican con arcilla cocida. Sus cualidades principales son que protegen contra el calor y su impermeabilidad. Y otra virtud muy estimable es su duración indefinida.

Las tejas cerámicas se fabrican con arcilla, mezclada con agua hasta formar una pasta que puede moldearse. Tras conseguir la forma deseada, se las deja secar al aire un tiempo, fase en la que pueden aplicarse tratamientos especiales como el esmaltado que aumenta su duración. Finalmente, las tejas se cuecen a muy altas temperaturas, adquiriendo su forma, dureza y color definitivos.

Según la forma, hay tejas curvas, mixtas y planas. Las curvas son las más comunes, tienen forma acanalada y troncocónica.

- Baldosas de barro cocido y azulejos: estas piezas son empleados para la el revestimiento tanto para el interior como el exterior de la vivienda. Las baldosas pueden ir con varios acabados cumpliendo con la normativa de resvalicidad correspondiente para cada caso y los azulejos admiten varios acabados como puede ser liso, esmaltado, coloreados, etc.

1.2.7 El consumo de los materiales cerámicos

A continuación se muestran los resultados publicados por la Asociación Española de Fabricantes de Ladrillos y Tejas de Arcilla Cocida (Hispalyt, 2018) hasta el ejercicio 2016. Los datos se recogen en la Tabla 1.21.

AÑO	Número empresas	Producción (t/año)	Volumen Negocio (millones €)	Volumen medio negocio	Número empleados	Plantilla media
2007	430	28.800.000	1.505	3,50	14.140	32,88
2008	300	20.000.000	1.000	3,33	10.300	34,33
2009	280	9.400.000	700	2,50	8.300	29,64
2010	275	7.700.000	450	1,64	6.800	24,73
2011	260	6.900.000	380	1,46	6.000	23,08
2012	220	5.200.000	285	1,30	5.000	22,73
2013	210	4.100.000	230	1,10	4.000	19,05
2014	200	3.900.000	210	1,05	3.800	19,00
2015	195	4.100.000	230	1,18	3.700	18,97
2016	185	4.350.000	250	1,35	3.500	18,92
2015-2016	-5,13%	6,10%	8,70%	14,57%	-5,41%	-0,29%
2007-2016	-56,98%	-84,90%	-83,39%	-61,39%	-75,25%	-42,47%

Tabla 1.21. El sector de la Cerámica Estructural. Ejercicio 2016 (Hispalyt).

Del total de producción, no se aprecian cambios significativos en la demanda de las distintas familias de producto, siendo el desglose por tipos de productos, para el año 2016, el siguiente que se muestra en la Tabla 1.22.

FAMILIA DE PRODUCTOS	%	Toneladas/año
Adoquines	0,50%	21.750
Ladrillos Cara Vista	10,50%	456.750
Bovedillas	2,50%	108.750
Ladrillos y Bloques para revestir	51,00%	2.218.500
Bloques para Revestir	8,00%	348.000
Tableros	5,00%	217.500
Tejas	14,50%	630.000
Otros	8,00%	348.000
TOTAL	100,00%	4.350.000

Tabla 1.22. Producción de material cerámico por tipo de producto. Ejercicio 2016 (Hispalyt, 2018).

El sector de cerámica estructural viene sufriendo desde 2008, al igual que otros sectores ligados a la construcción, una bajada de ventas que ha obligado a las empresas a adaptarse irremediabilmente a la situación. Esta adaptación pasa por concentrar la producción en determinados meses del año, hecho que ha tenido a lo largo de los últimos años una repercusión directa en la bajada del número de trabajadores, el volumen de negocio, etc.

El año 2015 fue el primer año desde que empezó la crisis en el que se experimentó un incremento en los datos de producción (5,13%) y de facturación (9,52%) con respecto al año 2014. En lo que respecta a 2016, se ha podido constatar un incremento similar al del año anterior, tanto en los datos de producción (6,10%) como de facturación (8,70%).

En lo que a número de empresas se refiere, en el año 2007 había en el sector 430 empresas, mientras que en 2015 se redujo 195 y en el año 2016 llegó a 185. Esto implica una reducción del 56,98% con respecto al año 2007 y del 5,13% con respecto al año anterior.

En cuanto a la producción, en el año 2007 la producción era de 28,8 millones de toneladas, mientras que en el año 2015 fue de 4,1 millones de toneladas y en el año 2016 fue de 4,35 millones de toneladas. Esto implica una reducción de la producción del 84,90% con respecto al año 2007, y un incremento del 6,10% con respecto al año anterior.

En cuanto al volumen de negocio, en el año 2007 la facturación era de 1.505 millones de euros, mientras que en el año 2015 fue de 230 millones de euros y en el año 2016 fue de 250 millones de euros. Esto implica una reducción del 83,39% con respecto al año 2007, y un incremento del 8,70 % con respecto al año anterior.

En lo que a número de empleados se refiere, en el año 2007 había 14.140 trabajadores, mientras que en el año 2015 había 3.700 y en el año 2016 había 3.500. Esto implica una reducción del 75,25% con respecto al año 2007, y una reducción del 5,41% con respecto al año anterior.

Por lo tanto, tras el análisis de los datos anteriores, Hispalyt afirma que en el año 2014 el sector tocó fondo y que en el año 2015 se inició la recuperación del sector que se ha mantenido igualmente en el año 2016. No obstante, las cifras de partida son tan bajas, que para percibir una clara recuperación en el sector serían necesarias unas cifras de crecimiento más elevadas y continuadas en el tiempo. (Informe Coyuntura Económica de la Confederación Española de Asociaciones de Fabricantes de Productos de Construcción CEPCO)

Según se recoge en el último informe de Coyuntura Económica de la Confederación Española de Asociaciones de Fabricantes de Productos de Construcción (CEPCO) publicado en Noviembre 2017, los datos relativos a la producción en el sector azulejero español atisban un aumento en torno al 8%, alcanzando los 530 millones de metros cuadrados. En cuanto a las ventas totales, “éstas podrían crecer alrededor del 7% hasta alcanzar los 3.520 millones de euros, de las que cerca del 75% son ventas en los 187 países a los que exporta”, según informa la Asociación Española de Fabricantes de Azulejos y Pavimentos Cerámicos (Ascer).

En el mercado nacional, el crecimiento desde el segundo trimestre sigue siendo positivo, pero ya no a un ritmo de dos dígitos, pudiendo alcanzar a final de 2017 un incremento en torno al 9-10%, superando los 820 millones de euros de ventas en el mercado doméstico.

La cifra estimada de exportación en 2017 alcanzará los 2.700 millones de euros (+5%), una cifra récord en el sector. Por regiones, entre enero y noviembre Europa se ha mantenido como principal mercado del sector azulejero y aglutina el 47,7% del total de las exportaciones. Por su parte, es destacable, según Ascer, el fuerte crecimiento de ventas a EEUU (+25,5%), que ya ocupa el segundo puesto en el ranking de países destinatarios de nuestras cerámicas (Ascer, 2017)

En lo que respecta a la exportación a la Federación Rusa, ésta se incrementa en un +9,2%, y Europa del Este, que había descendido en los años anteriores, comienza a crecer en torno al 8,2%. Como nota negativa, desde Ascer destacan “el bloqueo a la importación en Argelia que ha supuesto el cierre del mercado, así como la caída en el mercado saudita (-19,2%), lastran las cifras de exportación (Ascer, 2017). Del mismo modo, regiones importadoras con volumen como Oriente Próximo (-0,6%) o el Magreb (-27,8%) están teniendo un comportamiento negativo, afectando negativamente a la exportación global”.

Las previsiones para 2018 muestran, según Ascer, que la tendencia en el mercado nacional seguirá al alza, pero seguramente a menor ritmo que en los últimos tres años, con crecimientos entre el 6% y el 9 %. Asimismo, fuentes de Ascer concluyen que “a pesar de la persistencia de ciertas incertidumbres como las negociaciones del Brexit o el impacto de Argelia, para la exportación es factible un escenario de crecimientos globales del 7-9%”, concluyen fuentes de Ascer.

1.2.8 Los procesos de recuperación y reciclaje de los materiales cerámicos

Actualmente en España no existe normativa que considere la reutilización de todos los RCD que se generan. Únicamente la Instrucción del Hormigón Estructural EHE-2008, contempla recomendaciones sobre la utilización de áridos reciclados para la fabricación de hormigones.

Esta situación está llevando a muchos centros especializados a elaborar manuales sobre la reutilización de RCD. A nivel nacional, el catálogo del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) incluye las siguientes aplicaciones para los RCD procedentes de los residuos cerámicos:

La utilización de árido reciclado es cada vez más habitual en el campo de la construcción, en ámbitos muy variados como son la construcción de explanaciones (terraplenes y rellenos), capas de firmes de carreteras, o en la fabricación de hormigón. Los destinos de estos materiales reciclados dependerán de la naturaleza o composición mayoritaria de los residuos. Así, mientras que para explanaciones se suelen utilizar materiales procedentes tanto de residuos cerámicos, como de asfalto, de hormigón o mezclas de estos, para otras aplicaciones más restrictivas, como la fabricación de hormigón, los materiales reciclados suelen proceder de residuos de hormigón o en algunos casos de mezcla de residuos de hormigón y cerámicos. Cada una de estas aplicaciones obliga a fijar distintos niveles de exigencias en las propiedades del árido reciclado. (CEDEX, 2014).

El reciclaje de residuos cerámicos, por lo que respecta a los residuos cerámicos pueden, por un lado, recuperarse y reutilizarse directamente, como los ladrillos sobrantes o las tejas, o transformarse y utilizarse como sustitución de materias primas naturales, principalmente como áridos reciclados. Las principales aplicaciones de los residuos cerámicos son:

- Rellenos y terraplenes. Deben evitarse residuos de árido procedente de ladrillos refractarios, por su contenido en periclase, que puede hacerlos expansivos y debe evitarse también la presencia de madera, ya que puede pudrirse y dejar huecos en la capa de relleno (CEDEX, 2014).

- Bases y sub-bases granulares de nuevos firmes, tratadas o sin tratar. La reutilización que se puede hacer de los ladrillos de demoliciones de edificación depende de su naturaleza y del tipo de mortero empleado. La contaminación con cal o cemento no suele representar un problema, pero la presencia de mortero de yeso puede originar contenidos inaceptablemente altos de sulfatos en los ladrillos triturados.
- En el caso de que el constructor disponga de ladrillos y tejas cerámicos en cantidades significativas, se pueden triturar para constituir una sub-base excelente para carreteras con tráficos medios o ligeros, siempre y cuando la granulometría y el nivel de contaminantes sean aceptables y no superen espesores superiores a 20 cm para su correcta compactación.
- Fabricación de hormigones y morteros. Dada la reducida densidad del escombros triturado, estaría en la condición de árido ligero, por lo que puede ser de aplicación para la obtención de hormigones ligeros sin finos (CEDEX, 2012).
- El hormigón no ligero fabricado con ladrillo triturado suficientemente denso se puede utilizar en la construcción de estructuras de hormigón en masa y hormigón armado, tales como: muros de sótano, pilares, chimeneas, hormigón armado prefabricado, elementos para tejados y bloques de hormigón o tejas de hormigón para tejados. Además, también es viable el uso de los residuos cerámicos procedentes de la construcción y la demolición como árido grueso en la fabricación de elementos de hormigón no estructural, así como para la ejecución de pavimentos continuos sobre mortero, tipo empedrados.
- Para pavimentos asfálticos el ladrillo triturado no es aceptable debido a su alto requerimiento de betún y alto contenido de huecos.

1.3 El consumo de energía. La economía circular y los nuevos materiales

En la civilización moderna, la disponibilidad de energía está fuertemente ligada al nivel de bienestar, a la salud y a la duración de vida del ser humano. Por ello, el consumo mundial de energía se ha incrementado aproximadamente en un 33% en los últimos 40 años (CNE, 2013) y el pronóstico es que siga creciendo (véase Figura 1.10). Estados Unidos, Asia y Europa, son los mayores consumidores de energía (U.S. Energy Information Administration, 2012). Y dentro de la Unión

Europea, los países que, con diferencia, más energía primaria consumen son Alemania, Francia, Reino Unido, Italia y España (European Commission, 2014).

Figura 1.10. Previsión de consumo mundial de energía (U.S. Energy Information Administration, 2013)

En la Unión Europea el sector económico que más energía consume es el de los transportes (33% de la energía final consumida). Seguido por el sector de la construcción (25% de la energía final consumida) (véase figura 1.11).

Figura 1.11. Energía final consumida por sectores en la Unión Europea en el año 2011 (EuropeanCommission, 2014)

En España, estos valores son muy similares; el sector de los transportes también es el sector que más energía final consume (41%), seguido por el sector

de la construcción, que supone un 19% del consumo de energía final, de la cual un 97% corresponde a la fase de uso o residencial (IDAE, 2011).

1.3.1 Problemática derivada del uso y transformación de la energía

La extracción del yeso en las canteras, como posterior transporte a fábricas para su calcinación y preparación del producto final, así como traslado hasta el lugar de consumo, requiere un consumo de energía que repercute sobre el ecosistema en el que habitamos.

El consumo excesivo de recursos energéticos conlleva consecuencias económicas, medio ambientales y sociales. Las principales consecuencias económicas derivadas del uso de la energía provienen del agotamiento de los recursos energéticos no renovables (véase Figura 1.12), que siguen siendo los combustibles líderes a nivel mundial (REN21, 2016).

Debido a este inevitable agotamiento de recursos energéticos no renovables, las estimaciones realizadas por la “International Energy Agency” muestran una tendencia de subida de precio muy elevada. Por tanto, en un futuro podría llegarse a niveles en los que no será económicamente viable su utilización y en el caso de países cuya dependencia energética sea importante, como ocurre en general en la Unión Europea, este hecho tendrá mayor relevancia, y por tanto será imprescindible invertir en soluciones para reducir el consumo energético y sustituir las fuentes de energía limitadas por otras fuentes de energía.

Figura 1.12. Previsión del agotamiento de los combustibles fósiles desde el año 2000 al 2050 (Martín Larrañaga, 2009)

Otra consecuencia económica derivada del consumo de fuentes de energía no renovables es que la mayoría de los países no producen este tipo de combustibles, teniendo que importarlos de otros países, creando la llamada dependencia energética. Los principales países que producen combustibles fósiles se encuentran en América y Asia (véase tabla 1.23, pero en muchos casos los mayores productores de energía no son los principales importadores (véase Tabla 1.24). Así, en el caso del petróleo los mayores productores son Turkmenistán, Arabia Saudí y Estados Unidos y sin embargo, los principales importadores son Arabia Saudí y Rusia. En cuanto al carbón, los principales productores son China y Estados Unidos, mientras que los principales importadores son Indonesia y Australia. Y en el caso del gas natural, los principales productores son Rusia y Estados Unidos, mientras que los principales importadores son Rusia y Canadá.

	Petróleo (barriles/día)		Carbón (mill. ton.)		Gas natural (m3)	
1	Turkmenistán	10.900.000	China	3549	Rusia	669.600.000.000
2	Arabia Saudí	9.900.000	E.E.U.U.	935	E.E.U.U.	651.300.000.000
3	E.E.U.U.	8.453.000	India	595	Canadá	160.100.000.000
4	Irán	4.231.000	Australia	421	Irán	146.100.000.000
5	China	4.073.000	Rusia	359	Qatar	116.700.000.000
6	Canadá	3.592.000	Indonesia	443	Noruega	103.100.000.000
7	Iraq	3.400.000	Sudáfrica	259	China	102.700.000.000
8	Emiratos Árabes	3.087.000	Alemania	197	Arabia Saudí	99.230.000.000
9	Venezuela	3.023.000	Polonia	144	Nigeria	92.000.000.000
10	México	2.934.000	Kazakstán	126	Argelia	84.610.000.000

Tabla 1.23. Principales productores mundiales de combustibles fósiles en el año 2011 (U.S. Energy Information Administration, 2011)

	Petróleo (barriles/día)		Carbón (mill. ton.)		Gas natural (m³)	
1	Arabia Saudí	7.635.000	Indonesia	383	Rusia	173.000.000.000
2	Rusia	5.010.000	Australia	301	Canadá	107.300.000.000
3	Irán	2.523.000	Rusia	134	Noruega	85.700.000.000
4	Emiratos Árabes	2.395.000	E.E.U.U.	114	Argelia	59.400.000.000
5	Noruega	2.184.000	Colombia	82	Países Bajos	55.660.000.000
6	Iraq	2.170.000	Sudáfrica	74	Turkmenistán	49.400.000.000
7	Kuwait	2.127.000	Canadá	35	Qatar	39.300.000.000
8	Nigeria	2.102.000			Indonesia	32.600.000.000
9	Canadá	1.929.000			Malaysia	31.600.000.000
10	E.E.U.U.	1.920.000			E.E.U.U.	23.280.000.000

Tabla 1.24. Principales importadores mundiales de combustibles fósiles en el año 2011 (U.S. Energy Information Administration, 2011)

En el caso de la Unión Europea los datos muestran que los países de la Unión Europea dependen cada vez más de las importaciones de energía primaria para satisfacer su demanda energética y de hecho, son muchos los países con una dependencia energética superior al 60%, entre los que se encuentra España (véase figura 1.25). Las tasas de dependencia energética más altas corresponden a Chipre, Malta y Luxemburgo, mientras que las más bajas se registraron en Estonia, Rumania, la República Checa y Dinamarca (que además exporta energía). En cuanto a países exportadores de energía a la Unión Europea, Rusia ha mantenido

Figura 1.25. Dependencia energética en porcentaje para los países de la Unión Europea en el año 2012 (European Commission, 2014)

Por último, otra consecuencia económica que no suele tenerse en cuenta es la inversión necesaria para asegurar la seguridad en el uso de fuentes de energía no renovables, la alta inversión requerida para obtener y transformar los recursos renovables y el gasto derivado de remediar los daños provocados por el uso y transformación de la energía (National Academy of Engineering, 1990).

Las consecuencias medio ambientales derivadas del uso y transformación de las fuentes de energía no renovables son varias, destacando primero la producción de residuos, como son los residuos radiactivos o los gases de efecto invernadero, y segundo la contaminación de aguas y suelos y el impacto ecológico derivado de la creación de centrales, líneas eléctricas, generadores, etc. (ETSIM-UPM, 2012).

Los gases de efecto invernadero son los principales responsables del cambio climático y están relacionados con el calentamiento global, la subida del nivel del

mar y la disminución de precipitaciones, entre otros. En la figura 1-9 se indica la evolución de la intensidad en carbono del consumo energético mundial, donde se observa que en áreas desarrolladas, la tendencia es de descenso o de relativa estabilización, mientras en los países en desarrollo de Asia tiende a crecer, debido al crecimiento del consumo de carbón para generar energía eléctrica.

En general, de mantenerse la tendencia actual, se prevé que las emisiones a nivel mundial en el 2020 aumenten un 20%, lo cual demostraría el hecho de que las políticas energéticas actuales no son sostenibles (Tejero González, 2012). Por otra parte, no sólo las emisiones de gases de efecto invernadero son preocupantes para la atmósfera terrestre. También en cuanto a la calidad del aire es importante tener presente la limitación de ciertos compuestos al ambiente, lo cual ha supuesto el desfavorecimiento del uso de ciertos combustibles fósiles, en especial el carbón, por los compuestos generados en su combustión, causantes de la lluvia ácida.

1990	2005	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
287,8	439,6	407,7	370,3	356,8	356,6	351,8	322,9	324,2	335,7
MtCO ₂ eq									

Tabla 1.26. Evolución de las emisiones de gases de efecto invernadero período 1990-2015 (Gobierno de España, 2015)

En cuanto a las consecuencias sociales, éstas dependen directamente de las consecuencias anteriores. El consumo de energía está ligado al nivel de bienestar de las personas, y de su precio depende la accesibilidad a más y mejores servicios energéticos. Por otra parte los gases de efecto invernadero y los residuos peligrosos afectan a la salud de las personas.

Asimismo, cabe destacar el impacto estético que suponen algunos elementos relacionados con la obtención o con el transporte de la energía, como las torres eléctricas utilizadas para distribuir la energía eléctrica, las centrales nucleares, los aerogeneradores eólicos, etc.

En España, el petróleo y el gas natural siguen siendo los combustibles líderes muy por encima del resto de fuentes de energía (véase figura 1.13). Por ello, a pesar de que España produce energía nuclear, energías renovables y en menor medida carbón y energía hidráulica, aún tiene una dependencia energética de casi el 80%. En general el consumo de petróleo y gas natural depende casi al 100% de la importación, mientras que únicamente un 40% del carbón utilizado en España es

importado y tanto la energía nuclear, como la hidráulica y las energías renovables proceden 100% del autoabastecimiento (Gobierno de España, 2015)

Figura 1.13. Consumo de energía primaria en España en el año 2010 (Gobierno de España, 2010)

En el sector de la construcción un 84% de la energía consumida proviene de energías no renovables (véase Tabla 1.27). Y el mayor peso de este consumo lo tiene especialmente la demanda de calefacción y refrigeración (IDAE, 2011).

SECTOR	CARBÓN	PETRÓLEO	GAS NATURAL	ENERG. REN.	ENERG. ELÉC.
INDUSTRIA	1.663	4.347	7.635	1.255	6.195
Extractivas (no energéticas)	0	80	63	0	102
Alimentación, bebidas y tabaco	21	310	617	266	883
Textil, Cuero y Calzado	0	95	142	0	182
Pasta, Papel e Impresión	0	186	557	400	334
Química	134	495	1.738	5	728
Minerales No Metálicos	164	2.306	1.260	192	649
Siderurgia y Fundición	1.283	285	265	0	1.207
Metalurgia no férrea	61	92	342	2	729
Transformados Metálicos	0	167	525	1	323
Equipo Transporte	0	113	98	0	240
Construcción	0	82	148	13	233
Resto Industria	0	136	1.879	374	585
Madera, Corcho y Muebles	0	24	38	316	119
Otras	0	112	1.841	59	465
TRANSPORTES	0	33.599	92	1.693	272
Carretera	0	26.505	35	1.693	—
Ferrocarril	0	519	0	0	258
Marítimo	0	822	0	0	—
Aéreo	0	5.753	0	0	—
Oleoductos	0	0	0	0	0
Otros no especificados	0	0	58	0	14
USOS DIVERSOS	198	5.740	6.381	2.825	14.169
Agricultura	0	1.504	135	73	350
Pesca	0	0	0	0	0
Comercio, servicios y admin.	0	1.345	1.020	104	7.072
Residencial	122	2.891	4.183	2.647	6.379
Otros no especificados	76	0	1.042	1	368

Tabla 1.27. Consumos energéticos (ktep) por sectores en España en el año 2011 (IDAE, 2011)

1.3.2 La economía circular

La **economía circular** es una filosofía de organización de sistemas inspirada en los seres vivos, que persigue el cambio de una economía lineal (producir, usar y tirar) hacia un modelo circular, tal y como ocurre en la naturaleza.

«Una Europa que utilice eficazmente los recursos» es una de las siete iniciativas emblemáticas que forman parte de la estrategia Europa 2020 que pretende generar un crecimiento inteligente, sostenible e integrador. Actualmente es la principal estrategia de Europa para generar crecimiento y empleo, con el respaldo del Parlamento Europeo y el Consejo Europeo.

Figura 1.13. Modelo esquemático del funcionamiento de una economía circular (economiacircular.org)

Esta iniciativa emblemática pretende crear un marco político destinado a apoyar el cambio a una economía eficiente en el uso de los recursos y de baja emisión de carbono que nos ayude a:

- Mejorar los resultados económicos al tiempo que se reduce el uso de los recursos.
- Identificar y crear nuevas oportunidades de crecimiento económico e impulsar la innovación y la competitividad.
- Garantizar la seguridad del suministro de recursos esenciales.
- Luchar contra el cambio climático y limitar los impactos medioambientales del uso de los recursos.

Esta iniciativa emblemática ofrece un marco de medidas a largo plazo y, de manera coherente, otras a medio plazo entre las cuales ya está identificada una estrategia destinada a convertir a la UE en una «economía circular» basada en una sociedad del reciclado a fin de reducir la producción de residuos y utilizarlos como recursos.

1.3.3 Los nuevos materiales.

Tras las exigencias de la Directiva Europea para el año 2020 donde demandan que se debe reciclar hasta un 70% en peso de los RCD, el agotamiento de los recursos no renovables de los que disponemos para la obtención de las materias primas y el compromiso que debemos adquirir por preservar el medio ambiente, la sociedad se ve obligada a la necesidad de invertir y promover en la innovación de nuevos materiales reciclados para la construcción.

Toda esta filosofía de producción ecoeficiente viene igualmente ligada a la economía circular mencionada anteriormente, donde en el ámbito de la construcción promueve utilizar a los edificios como digestores de sus propios residuos.

1.4 Conclusiones parciales

El consumo de energía sigue aumentando en el mundo entero junto con la emisión de gases contaminantes y España se encuentra entre los países de la Unión Europea que más energía consumen, sobre todo en el sector de la construcción. El mayor causante de este impacto ambiental son los materiales tradicionales que siguen empleándose en este sector, por ello la construcción debe evolucionar y para ello se deben empezar a crear materiales eco-eficientes que minimicen la explotación de recursos naturales, que ayuden a reducir la cantidad de energía tanto en su fabricación como en su uso final y que generen menor cantidad de residuos o ayuden a reducirlos.

Por otra parte, España se encuentra entre los países de la Unión Europea que más residuos genera con más de 100 millones de toneladas anuales, destacando el sector de la construcción como el sector que más residuos genera. En este sentido, la Directiva 98/2008/CE establece como objetivo para el año 2020, la reutilización, el reciclado y la recuperación de un 70% en peso de los RCD.

Actualmente los áridos de hormigón son los RCD que más se están reutilizando. Sin embargo, existen muchos otros RCD que pueden ofrecer un valor añadido si se usan como agregados a los materiales convencionales, como es el caso del residuo cerámico, el cual es de los más abundantes a día de hoy suponiendo hasta un 54% del total de los RCD generados. Este material destaca por sus propiedades arcillosas, las cuales contribuyen a mejorar la dureza superficial de los revestimientos, así como la absorción de agua por capilaridad. La realidad es que a pesar de que puede ser recuperado para su reciclaje o su reutilización, la opción más rentable para la gestión de estos residuos sigue siendo su traslado a

vertedero. A pesar de que ya existe normativa sobre la reutilización de RCD en hormigones, no existe normativa que regule el empleo de RCD en compuestos de yeso.

Por otra parte, el consumo mundial de yeso no ha dejado de crecer en los últimos años, siendo España el mayor productor de toda la Unión Europea. La obtención de este material de construcción genera un gran impacto ambiental derivado de la explotación de las canteras y del consumo energético para el proceso de calcinación a alta temperatura del aljez. El yeso sigue teniendo gran interés como material de construcción debido a múltiples aplicaciones en las obras de edificación.

El principal problema al que se enfrenta la sociedad es el consumo lineal tanto de la energía como del uso de materiales, es decir, que los genera, los utiliza y los elimina. Esta situación es la que se pretende resolver incorporando criterios de economía circular de la que anteriormente se ha hablado. Lo ideal es que una vez que se haya terminado con la vida útil del material, que se pueda transformar de algún modo para volver a inicial una cadena de producción y que no exista la opción de acopiarlo en un vertedero.

Por otro lado encontramos que el consumo del yeso no va a cesar, por lo que con el fin de preservar el medio ambiente, se deben buscar alternativas para reducir esa explotación de canteras que no son ilimitadas y si se puede sustituir parte de la materia prima con algo de residuo, estaríamos reduciendo dos grandes inconvenientes de la actualidad en el sector de la edificación.

CAPÍTULO 2

ESTADO DE LA CUESTIÓN

2. ESTADO DE LA CUESTIÓN

El estado de la cuestión se ha estructurado en los siguientes subapartados:

- Estudios sobre la incorporación de aditivos en compuestos de yeso.
- Estudios sobre la incorporación de residuos en compuestos de yeso.
- Estudios sobre el uso de residuos de material cerámico en materiales de construcción.

2.1 Estudios sobre la incorporación de aditivos y adiciones en compuestos de yeso

Gran parte de la investigación acerca del yeso como material compuesto se basa en el estudio de la modificación de sus propiedades por la incorporación de aditivos. Por ejemplo, existen estudios como el de Jiang y Luan (2011) que incorporan polvo de sepiolita para mejorar el comportamiento de los compuestos de yeso frente al agua, el de Huang, et al., (2010), que incorporan carbonato cálcico para aumentar la resistencia al fuego de los compuestos de yeso con corcho, el de Ramezani, et al., (2012), que incorporan serrín para mejorar el comportamiento acústico o el estudio de Hummel, et al., (2007), que utilizan zeolita para incorporar al yeso la propiedad de mejora de la calidad del aire.

Sin embargo con muchos más los estudios que se centran en **mejorar la resistencia del yeso** mediante la adición de materiales fibrosos naturales, minerales o sintéticos. Entre los estudios encontrados destacan los llevados a cabo por:

- Hernández Olivares, et al. (1992) llevaron a cabo una serie de ensayos mecánicos con escayola reforzada con fibras de sisal. Las mejoras más importantes son el incremento de la tenacidad en los ensayos de flexotracción (del orden de 60 veces más que la tenacidad de la matriz con el 2% de adición de 40 mm de longitud) y la capacidad de absorción de energía del material compuesto (llegando a ser 40 veces superior que sin reforzar). Con fibras largas (40 mm) y 2% de adición, se consiguen mejoras en la resistencia a flexotracción de hasta el 20% respecto a la matriz de referencia.
- Del Río Merino, et al. (2001) analizaron la influencia del grado de dispersabilidad de las fibras de vidrio en el comportamiento mecánico del compuesto y en su trabajabilidad.

- Romaniega Piñeiro y Del Río Merino (2010) estudiaron la viabilidad del reciclaje de residuos de lana de roca como alternativa a la fibra de vidrio utilizada en la actualidad como elemento de refuerzo en los prefabricados de yeso. Tras la comparación de series realizadas con fibra de vidrio E y con residuo de lana de roca, se constataron mejoras en estas últimas en cuanto a dureza Shore C, peso y resistencia a compresión. Sin embargo, la resistencia a flexotracción que presentan las probetas aditivadas con fibra de vidrio es mayor que las objeto de estudio.
- Rodríguez Orejón y del Río Merino (2010) incorporaron residuo de yeso laminado calcinado (YLC) a distintos tipos de yesos (yeso grueso, fino y escayola). Para porcentajes elevados de adición la dureza disminuye significativamente, las probetas demandan mayor cantidad de agua (posiblemente por el porcentaje de celulosa que contiene el residuo) y las resistencias mecánicas se mantienen en valores aceptables. Se consideran mezclas admisibles las adiciones del 3-4% de residuo.
- Hang, et al. (2011) analizaron el refuerzo de compuestos de yeso con fibras de algodón.
- Mohandesi et al. (2011) estudiaron la resistencia de compuestos de yeso reforzados con fibras de polipropileno y poliparafenileno tereftalamida (kevlar) distribuidas aleatoriamente en una matriz de yeso.
- Ochoa, Bonilla, Borrachero y Payá, J. (2013) llevaron a cabo una serie de ensayos mecánicos con escayola con adiciones de un producto de origen orgánico de las hojas de la planta Agave americana. Las mejoras más importantes son que para una misma consistencia, se mejoran las resistencias mecánicas. Los tiempos de fraguado de la pasta se aumentaron lo que ayudaría mejorar los tiempos de aplicación del yeso y a disminuir las retracciones plásticas. Las modificaciones de estas propiedades físicas no afectan considerablemente las resistencias mecánicas finales.
- Lucolano et al. (2015) investigaron la resistencia mecánica de los compuestos de yeso reforzados con fibra de abacá.
- Lima and Faria (2016) analizaron el refuerzo de los compuestos de yeso con fibras de avena y lana.

Por otro, también ha suscitado interés el investigar cómo mejorar el **tiempo de fraguado** de los compuestos. Entre todos los estudios analizados cabe destacar los siguientes:

- Eve, et al. (2006) que analizaron la cristalización de compuestos de yeso reforzados con fibra de poliamida y aditivados con látex.
- Shneider, et al. (2007) que estudiaron el control del tiempo de fraguado mediante la adición de diferentes aditivos, como ácido cítrico y ácido tartárico, entre otros.
- Magallanes-Rivera, et al. (2009) que investigaron los mecanismos de hidratación de compuestos de yeso aditivados con ácido cítrico y málico.
- Lanzón y García Ruiz (2012) que analizaron el efecto del ácido cítrico en las propiedades de los compuestos de yeso.
- Gutiérrez-González, et al. (2013) que estudiaron la influencia de los residuos de polvo de poliamida sobre las propiedades reológicas de las pastas de yeso.
- Kocemba y Mucha (2016) que analizaron la posibilidad de controlar el tiempo de fraguado mediante el uso de diferentes tipos de hidroxietil metil celulosa.

También en los últimos años son muchos los estudios que están analizando la **mejora del comportamiento térmico** del yeso, entre los que destacan los llevados a cabo por:

- Pichniarczyk, et al. (2005) que estudiaron las propiedades de un compuesto de yeso sobresaturado con una solución en ácido sulfúrico y resinas de silicona como posible material alternativo para aislamiento térmico, de características similares a las lanas minerales.
- Demir y Baspinar (2008) que analizaron el efecto que tienen las adiciones de humo de sílice y perlita en el comportamiento térmico de compuestos de yeso.

- Borreguero, et al. (2010) que estudiaron la mejora del comportamiento térmico de bloques de yeso al aditivoslos con materiales de cambio de fase.
- Vimmrová, et al. (2010) que estudiaron la mejora del comportamiento térmico de bloques de yeso al aditivoslos con materiales de cambio de fase.
- Oliver (2012) que diseñó una placa de yeso con propiedades térmica mejoradas incorporándole materiales de cambio de fase.
- Cherki, et al. (2014) que utilizaron partículas de corcho para mejorar el aislamiento térmico de placas de yeso para falso techo.
- Gencel, et al. (2016) que analizaron el efecto de la diatomita en el comportamiento térmico de los compuestos de yeso.

Y otros trabajos que se centran en **reducir la densidad** del material como los desarrollados por:

- Arikan y Sobolev (2002) que incorporaron diferentes aditivos al yeso para modificar sus propiedades, entre ellos sulfonato de olefina, que es un agente espumante utilizado en cosmética y con el que consiguió reducir la densidad un 36% con una disminución de resistencia mecánica del 42%.
- Del Río Merino y Hernández Olivares (2004) que analizaron el efecto que tienen en una matriz de yeso los aditivos inclusores de aire y los aditivos espumantes comercializados para morteros y hormigones y observaron que a pesar de la formación de microburbujas, el uso de estos aditivos aireantes no permite reducir la densidad y con el uso de espumantes sólo se consigue reducir la densidad en un 7%, pero esta reducción conlleva una gran pérdida de resistencia mecánica del 17% a flexión y del 52% a compresión.
- Vimmrová et al. (2011) que estudiaron el comportamiento térmico de los compuestos de yeso aligerados bien con sulfato de aluminio y carbonato cálcico, con los que obtuvieron una reducción de densidad del 70%, acompañada de pérdidas de resistencia mecánica del 93% a flexión y del 97% a compresión, o con sulfato de aluminio y ácido cítrico, con los que obtuvieron una reducción de densidad del 30%, acompañada de una pérdida de resistencia mecánica del 66% a flexión y del 77% a compresión.

- Huang, et al. (2013) que utilizaron dióxido de manganeso para catalizar peróxido de hidrógeno utilizándolo como agente espumante en compuestos de yeso.
- Vimmrová et al. (2016) que utilizaron polvo de aluminio como agente espumante para producir yeso aligerado.

Pero no solo se han encontrado trabajos que utilizan aditivos para reducir la densidad, otros trabajos incorporan al yeso agregados ligeros, también denominados cargas ligeras o áridos ligeros. Estos agregados se han utilizado para **aligerar materiales** desde la antigüedad, en concreto la bóveda del Panteón en Roma se construyó en el siglo II d.C. con una mezcla de argamasa aligerada con toba volcánica y piedra pómez (Cowan, 1977). Los agregados ligeros que se utilizan actualmente pueden ser materia prima o residuos y a su vez se pueden clasificar en:

- Naturales inorgánicos: que proceden de la desintegración natural o artificial de las rocas como la piedra pómez, las puzolanas o las tobas volcánicas o de un proceso industrial por el cual se calienta el mineral para que expanda. Algunos ejemplos de estos son la perlita, la vermiculita o la arcilla expandida.

Existen numerosos estudios sobre la incorporación de estos áridos ligeros en compuestos de yeso, entre los que cabe destacar los llevados a cabo por:

- Del Río Merino, et al. (1998) que compararon el efecto de diferentes agregados ligeros utilizados en compuestos de yeso para su aplicación en prefabricados, entre ellos perlita, con la que obtuvieron una reducción de densidad del 23%, acompañada de una pérdida de resistencia mecánica del 38% a flexión y del 14% a compresión, vermiculita exfoliada, con la que consiguió reducir la densidad en un 13%, acompañada de una pérdida de resistencia mecánica del 25% a flexión y del 34% a compresión y arcilla expandida, con la que consiguieron reducir la densidad en un 20%, acompañada de una pérdida de resistencia mecánica del 45%.
- Gmouh, et al. (2001) que analizaron el comportamiento mecánico de un compuesto de yeso aligerado con perlita.

- Yong, et al. (2010) que investigaron las propiedades de un tablero de yeso aligerado con vermiculita.
- Vimmrová, et al. (2011) que estudiaron el comportamiento térmico de los compuestos de yeso aligerados con perlita y observaron que el uso de este agregado permite reducir la densidad un 42%, disminuyendo también la resistencia mecánica un 64% a flexión y un 83% a compresión.
- Naturales orgánicos, como el corcho, las cáscaras de cereal o las virutas de madera, que en general son residuos agroalimentarios o vegetales. Existen varios estudios sobre la incorporación de estos áridos ligeros en compuestos de yeso, entre los que cabe destacar los llevado a cabo por:
 - Hernández Olivares, et al (1999) que diseñaron una placa de escayola con granulado de desechos de corcho aligerada hasta en un 43%, acompañado de una pérdida de resistencia del 57% a flexión y del 76% a compresión.
 - Leiva Aguilera y Del Río Merino (2014) que analizaron las propiedades de los compuestos de yeso con diferentes porcentajes de cáscara de arroz consiguiendo reducir la densidad entorno a un 4%, acompañado de una pérdida de resistencia del 37% a flexión y del 60% a compresión.
 - Zhou, et al (2013) que estudiaron los compuestos aligerados con serrín y reforzados con látex.
- Artificiales: que son aquellos que están constituidos por subproductos industriales, como son las escorias de la industria siderúrgica y las cenizas volantes procedentes de la combustión del carbón pulverizado en las centrales térmicas, subproductos elaborados, como la escoria expandida, o materiales orgánicos elaborados, como algunos polímeros sintéticos.

En este último grupo existen numerosos estudios principalmente sobre la incorporación de materiales orgánicos elaborados, entre los que cabe destacar los llevados a cabo por:

- Khalil, et al (2013) que estudiaron las propiedades de los compuestos de yeso con humo de sílice y gel de sílice y observaron que con estos aditivos se puede conseguir aligerar estos compuestos.
- González Madariaga (2005) que diseñó una placa laminada de yeso aligerada con residuo de poliestireno expandido (EPS) consiguiendo reducir su densidad en un 56%, acompañado de una pérdida de resistencia mecánica del 94% a flexión y del 83% a compresión.
- Herrero, et al (2013) que analizaron la influencia de la proporción y el tamaño de partícula de las adiciones de residuo de neumático en compuestos de yeso, consiguiendo reducir su densidad en un 37%, acompañado de una pérdida de resistencia mecánica del 86% a flexión y del 96% a compresión.
- Gutiérrez González, et al (2012) que estudiaron la compatibilidad entre yeso y residuo de polvo de poliamida para obtener un material ligero con propiedades térmicas mejoradas, consiguiendo reducir la densidad en un 13%, acompañado de una pérdida de resistencia mecánica del 59% a flexión y del 61% a compresión.
- Gutiérrez González, et al (2012) que incorporaron residuo de poliuretano a compuestos de yeso, consiguiendo aligerarlo un 46%, perdiendo a su vez un 81% de resistencia mecánica a flexión y un 77% de resistencia mecánica a compresión.
- Jiménez Rivero, et al (2014) que analizaron las propiedades de los compuestos de yeso con residuo de caucho procedente de coquillas de aislamiento de tuberías, consiguiendo reducir la densidad en un 24%, acompañado de una pérdida de resistencia mecánica del 54% a flexión y del 67% a compresión.
- García Santos (2009) que estudió los compuestos de yeso aligerados con perlas de EPS, consiguiendo reducir su densidad en un 39%, acompañado de una disminución de la resistencia mecánica del 45% a flexión y del 76% a compresión.

- Karaman, et al (2006) que analizaron las propiedades físicas y mecánicas de compuestos de yeso con residuos de botellas hechas con plástico PET (politereftalato de etileno) y su posible aplicación en construcciones agrícolas y observaron que con este agregado se podía reducir la densidad y mejorar el comportamiento térmico, pero se reducía la resistencia mecánica.
- Vidales Barriguete, et al. (2018) donde se analiza la viabilidad de reutilizar los desechos de cables de plástico como un medio para reducir el impacto ambiental de los edificios, incluyéndolo en matrices de yeso.

2.2 Estudios sobre la incorporación de residuos en compuestos de yeso

Existe mucha información sobre la incorporación de residuos en materiales de construcción en general. De hecho, ya en 1979 Gutt y Nixon publicaron un documento en el que aparecían diferentes soluciones de reciclaje de residuos industriales y urbanos como el fosfoyeso, las cenizas volantes o las escorias de horno alto, en materiales de construcción (Gutt & Nixon, 1979). Sin embargo, por otra parte, en los últimos años ha aumentado la importancia que tiene la gestión de los arcd, además de estudios de investigación específicos como el estudio sobre la reutilización de las escorias procedentes del sector siderúrgico (Geiseler, 1996), existen guías y catálogos que recogen soluciones para la reutilización de los RCD, principalmente de los áridos, como las que se muestran en la tabla 2.01. De hecho, uno de estos catálogos, el “Catálogo de residuos utilizables en la construcción”, ha sido elaborado en España por el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, Cedex (CEDEX, 2012). En este catálogo se expone la posible reutilización de RCD procedentes del hormigón y restos cerámicos para producir áridos reciclados para diferentes aplicaciones. Sin embargo, es importante destacar que ni el “Catálogo de residuos utilizables en la construcción” del CEDEX ni en ninguno de los documentos encontrados, se incluyen estrategias de reutilización de residuos en compuestos de yeso, ni se habla del poliestireno como posible residuo de construcción y demolición.

Autor (año)	Documento	Estrategia de reutilización de RCD
Van Dijk (2001)	Strategy for reuse of construction and demolition waste role of authorities	-Reutilización de los escombros como base para la ejecución de carreteras. -Reutilización de árido reciclado en hormigón.
WRAP (2009)	Construction products, materials and waste	-Reutilización de áridos reciclados para la ejecución de hormigón, materiales bituminosos, pavimentos, terraplenes o sub-bases de carreteras.
Gonçalves Rapazote, et al (2010)	Development of Building Materials through Alkaline Activation of Construction and Demolition Waste	-Reutilización de áridos reciclados procedentes de hormigón, mortero, mampostería, tejas y escombros en general para producir aplicaciones de hormigón como bloques prefabricados.
CEDEX (2012)	Catálogo de residuos utilizables en la construcción	-Reutilización de áridos reciclados procedentes del hormigón, los ladrillos y los escombros para ejecutar terraplenes, sub-bases de carreteras y nuevos hormigones.
Australian Government (2012)	Construction and demolition waste guide recycling and re-use across the supply chain	-Reutilización de escombros de ladrillo y hormigón como bases y sub-bases para la ejecución de carreteras.
Bolden, et al (2013)	Utilization of recycled and waste materials in various construction applications	-Reutilización de áridos reciclados en bases o sub-bases de carreteras y nuevos hormigones. -El uso de residuos procedentes de tejas de asfalto para producir nuevas mezclas asfálticas.

Tabla 2.01 - Selección de guías y manuales que plantean estrategias para el tratamiento de los RCD

A nivel nacional cabe destacar que el Ministerio de Economía, Industria y Competitividad ofrece ayudas para el desarrollo de Proyectos de I+D+i. La presente tesis doctoral ha sido un resultado del Proyecto W2R Waste to Resources, 2017 (BIA2013-43061-R) donde el objetivo principal ha sido conseguir una tasa de residuos cero en las obras de rehabilitación energética de los edificios utilizando los desechos que se generan como materias primas para crear nuevos materiales conglomerados con aplicación en la construcción de edificios.

En cuanto a los estudios que se han llevado a cabo sobre la incorporación de residuos en compuestos de yeso se ha encontrado información para distintos tipos de residuos:

- **Residuos del sector productivo primario:** que proceden de las actividades agrícolas, ganaderas, forestales o mineras, sobre los que destacan los estudios de:
 - Thole y Weiss (1992) que investigaron la viabilidad de fabricar tableros de yeso con bagazo, bambú, tallos del algodón, tallos de arroz y paja.

- Thole (1992) que estudió el refuerzo de tableros de yeso con desechos procedentes del lino.
 - Li, et al (2003) que utilizaron tallos de algodón tratados con una emulsión acrílica de estireno para optimizar el comportamiento de los compuestos de yeso.
 - Kim (2009) que estudió las propiedades de un compuesto de yeso con cáscaras de arroz para su aplicación en tableros prefabricados para tabiques y techos.
 - Wang y Li (2011) que investigaron el refuerzo de los compuestos de yeso con fibra tratada procedente de tallos de maíz.
 - Nazerian y Kamyab (2013) que estudiaron la viabilidad de incorporar bagazo y tallos de trigo en compuestos de yeso.
 - Leiva Aguilera y Del Río Merino (2014) que analizaron las propiedades de los compuestos de yeso con diferentes porcentajes de cáscara de arroz.
- **Residuos del sector productivo secundario:** que proceden de las actividades industriales de transformación, sobre los que destacan los estudios de:
- Kumar (2002) que investigó sobre la posibilidad de diseñar bloques de yeso con cenizas volantes para la construcción de casas de bajo coste.
 - Del Río Merino, et al (2005) que diseñaron un elemento prefabricado aligerado con residuos de corcho para su aplicación en tabiques.
 - Agulló, et al (2006) que estudiaron la incorporación de residuos procedentes de la fabricación de papel en compuestos de yeso.

- Guleria y Dutta (2011) que analizaron el comportamiento mecánico de un compuesto de yeso, cal y cenizas volantes reforzado con virutas de neumático tratadas.
 - Zheng, et al (2012) que estudiaron el comportamiento del residuo de polimetilmetacrilato con superplastificantes incorporados en compuestos de yeso.
 - Lakraffi, et al (2012) que analizaron el efecto que tienen diversos residuos de la industria del cuero en el comportamiento térmico de los compuestos de yeso.
 - Rodríguez, et al (2013) que diseñaron un compuesto de yeso fabricado con escorias de horno alto.
- **Residuos del sector productivo terciario:** que proceden de la actividad doméstica y comercial, sobre los que destacan los estudios de:
- Scholer y Patt (1987) que estudiaron la posible utilización de residuos procedentes del papel para producir tableros de yeso reforzados con fibras.
 - Coutts (1991) que analizó el refuerzo de los compuestos de yeso con residuos procedentes del papel.
 - Follner y Follner (2004) que investigaron la posible recristalización del yeso para crear prefabricados de yeso.
 - Klöck y Aicher (2005) que estudiaron el refuerzo de los tableros de yeso con fibras procedentes de residuos de papel.
 - Fujita, et al (2006) que analizaron las propiedades de paneles de yeso fabricados con residuos procedentes de otros tableros laminados de yeso.

- Karaman, et al (2006) que analizaron las propiedades físicas y mecánicas de compuestos de yeso con residuos de botellas hechas con plástico PET (politereftalato de etileno) y su posible aplicación en construcciones agrícolas.
- González Madariaga y Lloveras Macia (2008) que diseñaron un tablero laminado de yeso aligerado con residuo de poliestireno expandido.
- Parres, et al (2009) que investigaron las propiedades de un compuesto de yeso reforzado con microfibras obtenidas de residuos de neumáticos.
- Gutiérrez-González (2012) que diseñaron un compuesto de yeso aligerado con residuo de espuma de poliuretano.
- Serna, et al (2012) que estudiaron el comportamiento de compuestos de yeso con residuos de neumáticos en distintos porcentajes y tamaños de partícula.
- Gutiérrez-González, et al (2013) que estudiaron la compatibilidad entre el yeso y los residuos de poliamida de la industria del automóvil para producir compuestos de yeso aligerados con propiedades térmicas mejoradas.
- Herrero, et al (2013) que analizaron las propiedades de un compuesto de yeso con residuos de neumático.
- Corinaldesi, et al (2015) que incorporaron residuos de plástico PET para aligerar un compuesto de yeso.

Y por último, merece atención los trabajos que utilizan como cargas distintos **residuos que proceden del sector de la construcción**, sobre los que se han encontrado los siguientes estudios:

- Carvalho, et al (2008) que analizaron las propiedades de un compuesto de yeso reforzado con pulpa de residuo de celulosa procedente de bolsas de cemento.

- Romaniega Piñeiro, del Río Merino y Pérez García (2015) que estudiaron el refuerzo de los compuestos de yeso con fibras de lana de roca procedentes de residuos de construcción y demolición.
- Jiménez Rivero, et al (2014) que estudiaron el efecto que tiene el residuo de caucho, procedente de coquillas para el aislamiento de tuberías, incorporado en un compuesto de yeso.
- San Antonio González, et al (2014) que analizaron la viabilidad de incorporar residuo cerámico y residuo de poliestireno expandido, por separado, en una matriz de yeso.
- San Antonio González, et al (2016) que estudiaron las propiedades de un yeso aligerado con residuo procedente de aislamiento térmico fabricado con poliestireno expandido.
- Morales Conde, et al (2016) que estudiaron la posibilidad de incorporar residuos de madera en compuestos de yeso.

2.3 Estudios sobre el uso de residuos de material cerámico en materiales de construcción

Los materiales cerámicos (ladrillos, tejas, gran formato, etc.) son utilizados en la mayoría de las obras y en consecuencia todos los desperdicios que se generan durante su puesta en obra se convierten directamente en residuo perjudicial para el medio ambiente. Por ello existe un gran interés entre los investigadores del sector para analizar nuevas vías de reciclaje del residuo cerámico como por ejemplo incorporándola en distintos materiales de construcción, ya que de esta manera se utiliza a los edificios como un digestor de los RCD generados. Entre los estudios analizados cabe destacar los siguientes:

- González Cortina, y De Villanueva Domínguez, (2000) realizan distintos tipos de morteros de cal, chamota, arena y agua, variando las dosificaciones, las características de la adición, temperatura de cocción y finura de molido, estudiando su hidráulica y la evolución de las propiedades mecánicas y físicas a lo largo del tiempo. Para ello, además de los ensayos de dureza, resistencia a flexión y compresión, se han desarrollado un ensayo físico de hidráulica que se ha aplicado con notable éxito.

- Demir, y Mehmet, (2003) estudiaron la incorporación del residuo cerámico en la fabricación de ladrillos cerámicos. Analizaron su comportamiento en cuanto a durabilidad y comportamiento mecánico de la fabricación de las nuevas piezas. Los resultados muestran que los elementos estructurales con un 30% de residuo cerámico sobre su peso inicial cocido a 900 °C, ofrece unos resultados adecuados de resistencia mecánica.
- Puertas; Barba; Gazulla; Gómez; Palacio y Martínez-Ramírez, (2006) estudian la composición y activación alcalina de seis residuos cerámicos cocidos con vistas a su viabilidad de sustituir, parcialmente, algunas materias primas, utilizadas en la preparación de un crudo de cemento. Los resultados obtenidos muestran que todos ellos tienen una composición química y mineralógica adecuada para su posible empleo como materia prima alternativa de un crudo de cemento Portland. No son ni tóxicos ni radioactivos y tienen capacidad puzolánica. El estudio de caracterización realizado sobre las pastas activadas ha demostrado que las fases feldespáticas son las más susceptibles de disolución y reacción con las disoluciones alcalinas.
- Puertas; García-Díaz; Palacios; Martínez Ramírez; Barba; Gazulla y Gómez, (2007) estudian la reactividad y la aptitud a la cocción de unos crudos de cemento que incorporan residuos cerámicos, procedentes de baldosas obtenidas con composiciones de arcillas de cocción roja y de cocción blanca o mezclas de ambas, como materias primas alternativas. Los resultados obtenidos han demostrado la validez tecnológica de los nuevos crudos que incorporan esos residuos. La reactividad y la aptitud a la cocción de los nuevos crudos son superiores a las de un crudo convencional, siempre y cuando el tamaño de las partículas de los residuos sea inferior a 90 µm. Los estudios realizados en torno a las emisiones de CO₂ en la cocción de dichos crudos muestran que dichas emisiones se reducen en los crudos con residuos cerámicos entre un 2.3 y un 4%, dependiendo de la naturaleza del residuo.
- Trilles-Lázaro, y Allepuz, (2011) realizaron un proyecto de investigación orientado a potenciar el uso de vidrio reciclado y residuos procedentes del proceso de producción cerámico en la fabricación industrial de baldosas cerámicas. El resultado de este estudio es 'ECO-LOGIK', una baldosa de gres porcelánico fabricada a partir de materias primas con un alto contenido en materiales procedentes del reciclaje –más de un 85% en el soporte de la pieza–, lo que la convierte en un producto de alta calidad, sostenible y respetuoso con el medio ambiente.

- Chiara Bignozzi y Saccani, (2012) tras sustituir parte de arena natural en la fabricación de morteros de cemento por residuos cerámicos y analizar los resultados de ensayos realizados, afirman que el material resultante es una alternativa válida al cemento puzolánico.

2.4 Conclusiones parciales

Existen muchos estudios que analizan la incorporación de aditivos y adiciones no normalizados en compuestos de yeso para mejorar alguna de sus propiedades. En la mayoría de los casos estos estudios se centran principalmente en el análisis del aumento de resistencia, el control del tiempo de fraguado, la mejora del comportamiento térmico y la reducción de densidad.

Fuera de las guías y manuales de reutilización de residuos en materiales de construcción sí se han encontrado muchos estudios de investigación en los que se analiza el reciclaje de residuos como cargas en compuestos de yeso. De estos estudios destaca el uso de residuos agrícolas como los tallos vegetales, residuos industriales como las cenizas volantes y residuos del sector terciario como el papel.

De entre los trabajos encontrados destaca el "Catálogo de residuos utilizables en la construcción", desarrollado por el CEDEX, es un documento muy útil que aporta gran información. Sin embargo, este catálogo no incluye estrategias de reutilización de residuos en compuestos de yeso, ni habla del poliestireno como posible residuo de construcción. De hecho, en general en las guías y manuales en los que se presentan soluciones para el reciclaje de residuos de construcción y demolición en materiales de construcción únicamente se exponen soluciones para los áridos reciclados procedentes del hormigón. También se ha encontrado alguna referencia sobre la reutilización de residuos de construcción y demolición en compuestos de yeso, pero en ningún caso se ha encontrado documentación que hable sobre la incorporación de residuo cerámico.

En general, con respecto al residuo cerámico, se ha encontrado escasa información sobre su incorporación en materiales compuestos. Por tanto y como conclusión del estado de la cuestión sobre la incorporación de residuos en una matriz de yeso se puede afirmar que no existen estudios suficientes y que en ningún caso éstos han considerado la incorporación de residuo cerámico en base de escayola.

CAPÍTULO 3

JUSTIFICACIÓN DE LA TESIS DOCTORAL

3. JUSTIFICACIÓN DE LA TESIS DOCTORAL

Considerando el marco contextual sobre la situación del yeso como material tradicional, expuesto en el capítulo 1, y a la vista de los antecedentes desarrollados en el capítulo 2, se extraen las siguientes consideraciones que justifican el desarrollo de esta tesis doctoral.

- **Necesidad de optimizar el yeso como material de construcción actual**

El sector de la construcción en España es uno de los sectores que menos ha evolucionado en los últimos años. Los materiales tradicionales siguen siendo los más utilizados y en algunos casos su uso conlleva un gran impacto ambiental que no se tiene en consideración.

El yeso, a pesar de ser un material que se ha utilizado desde la antigüedad sigue siendo un material poco evolucionado. El aljez del que se obtiene el yeso se extrae en canteras a cielo abierto. Las canteras suponen un alto impacto ambiental, porque destruyen ecosistemas y alteran tanto el suelo como el agua y el aire de la zona en la que se encuentran, además de afectar al paisaje y limitar los usos del suelo a su alrededor. Por otra parte, la fabricación del yeso conlleva un proceso de calcinación a alta temperatura que emite gases de efecto invernadero. Y, también, un alto porcentaje del aljez es transportado varios kilómetros o incluso exportado a otros países de Europa, con lo que su ciclo de vida conlleva un porcentaje extra de emisiones de CO₂.

Aunque se usen aditivos para mejorar sus propiedades, hoy en día se debería hablar de un yeso adaptado a la sociedad actual en la que la preocupación por el medio ambiente es ya parte de nuestra forma de vida.

- **Necesidad de diseñar nuevos materiales producto de la economía circular**

España se encuentra entre los cinco primeros países de la Unión Europea que más energía consumen y que más dependencia energética tiene con otros países. La explotación insostenible de los recursos naturales es un problema que cada vez preocupa más a la sociedad, no sólo porque se empiezan a observar los primeros síntomas claros de agotamiento en los ecosistemas y las consecuencias de todo tipo que de ello se derivarán para la humanidad. Si no porque viene acompañado de un aumento importante en la generación de residuos.

Por ello y atendiendo a las necesidades que nos demanda el planeta en el que vivimos, tenemos que afrontar y poner en práctica la economía circular, tanto a nivel del consumo de energía, como atendiendo al consumo de los materiales. Con esta filosofía de vida conseguiremos aprovechar más los recursos de los que disponemos, convirtiendo los residuos en recursos para continuar nuestra actividad dentro del sector de la edificación.

- **Necesidad de buscar estrategias para reutilizar el residuo cerámico**

España se encuentra entre los países de la Unión Europea que más residuos generan, especialmente en el sector de la construcción. Por ello, es uno de los sectores de mayor interés para la aplicación de buenas prácticas de gestión de residuos. De hecho, la Directiva 98/2008/CE establece como objetivo para el año 2020, la reutilización, el reciclado y la recuperación de un 70% en peso de los RCD (excluyendo las operaciones de relleno). Estamos todavía lejos de conseguirlo, pues actualmente la tasa de reciclado de RCD en España es inferior al 40% y este valor incluye operaciones de relleno.

Asimismo según la ficha técnica de “Residuos de Construcción y Demolición” publicada por el Ministerio de Medio Ambiente, en España el 54% de los residuos generados en el ámbito de la construcción corresponden a desechos de materiales cerámicos, los cuales se contemplan en la Lista Europea de Residuos (Orden MAM/304/2002) como “Residuos Industriales No Peligrosos (RINP)”.

Una de las buenas prácticas más recomendadas en la gestión de RCD es la reutilización de residuos para fabricar nuevos materiales de construcción. Sin embargo, actualmente en España no existe normativa que considere la reutilización de RCD. Únicamente la Instrucción del Hormigón Estructural EHE-2008, contempla en su Anejo 15 recomendaciones sobre la utilización de áridos reciclados para la fabricación de hormigones, aunque se excluyen aquellos áridos que no procedan del hormigón.

Esta situación está llevando a muchos centros especializados a elaborar manuales o catálogos sobre la reutilización y reciclaje de RCD, aunque esta información sigue siendo insuficiente. A nivel nacional, el catálogo de residuos utilizables en construcción, desarrollado por los técnicos del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas CEDEX incluye estrategias únicamente para los RCD procedentes del hormigón y los residuos cerámicos y en ningún caso presenta estrategias de reutilización para la fabricación de yesos o productos de yeso. A su vez, a nivel internacional cabe destacar la “Construction

and demolition waste guide recycling and re-use across the supply chain” que incide en la reutilización de escombros de ladrillo y hormigón como bases y sub-bases para la ejecución de carreteras y el “Construction & Demolition Waste Manual”, que clasifica los RCD según su viabilidad de reutilización o reciclaje.

La realidad es que a día de hoy el residuo cerámico es muy cuantioso en nuestros vertederos y ningún manual incorpora estrategias de reutilización de los mismos como cargas en materiales compuestos, por lo que se hace imprescindible estudiar la viabilidad de nuevas aplicaciones y con ello fomentar la economía circular en el sector de la construcción.

CAPÍTULO 4

OBJETIVOS DE LA TESIS DOCTORAL

4. OBJETIVOS DE LA TESIS DOCTORAL

El objetivo general de esta tesis es analizar la viabilidad de incorporar en una matriz de escayola residuos cerámicos (chamota) procedentes de la industria y de la construcción y demolición de edificios, así como buscar aplicaciones del material resultante.

Son objetivos particulares:

- OB. 1: Identificar los diferentes tipos de residuos cerámicos que podemos encontrar tanto en el ámbito industrial como en las fases de construcción y demolición de edificios.
- OB. 2: Determinar los porcentajes de sustitución de la materia prima de la escayola por residuo cerámico y obtener las dosificaciones idóneas de relación Agua/Escayola (A/E) atendiendo a la diferente granulometría y los distintos porcentajes de adición de chamota para poder determinar la viabilidad de incorporación de este residuo.
- OB. 3: Estudiar la viabilidad de los compuestos de escayola y los distintos residuos cerámicos en distintos porcentajes y granulometrías, tratando de incluir la máxima cantidad de residuo admitida por los distintos materiales con el fin de reducir el Impacto Ambiental de los RCD.
- OB. 4: Seleccionar el compuesto más adecuado para la búsqueda de una posible aplicación, así como caracterizarlo química y mineralógicamente.
- OB. 5: Analizar la posibilidad de incorporar algún aditivo para mejorar las propiedades del material resultante.
- OB. 6: Analizar a través de ensayos específicos el comportamiento del compuesto como revestimiento de paramentos interiores.

CAPÍTULO 5

METODOLOGÍA

5. METODOLOGÍA

Se diseña un plan experimental en cuatro fases:

- Fase 0: Materiales a utilizar y trabajos previos.
- Fase 1: Escayola con adiciones de residuo cerámico.
- Fase 2: Compuestos seleccionados.
- Fase 3: Viabilidad de la aplicación del compuesto definitivo.

Los ensayos de las distintas fases se han realizado en los siguientes centros de investigación:

- El Laboratorio de Materiales de Construcción de la Escuela Técnica Superior de Edificación de la Universidad Politécnica de Madrid, adscrito al Departamento de “Construcciones Arquitectónicas y su Control”.
- El Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja – CSIC.
- Facultad de Geológicas de la Universidad Complutense de Madrid

Las condiciones ambientales de laboratorio donde se han realizado las probetas y los diferentes ensayos son las siguientes:

Temperatura media (°C)	Humedad relativa del aire media (%)
25,0	42,0

5.1 Fase 0: Materiales a utilizar y trabajos previos

En una fase inicial se identificarán todos los residuos cerámicos con los que se va a llevar a cabo el trabajo experimental, así como se definirá la relación A/E de la Escayola E-35. El presente apartado da respuesta al objetivo 1.

5.1.1 Materiales a utilizar

Los materiales utilizados han sido:

- Escayola E-35.
- Residuo cerámico.
- Agua.
- Plastretard.
- Cal hidráulica.

- Escayola E-35

Iberyola E-35 de la casa comercial PLACO. Esta escayola se utiliza fundamentalmente para la fabricación de los paneles prefabricados de yeso laminado y para el agarre de dichos elementos, así como para trabajos de repaso y acabado de elevada blancura y perfección.

Figura 5.01. Saco de Escayola E-35, Placo.

Es un producto conforme a la norma UNE-EN 13279- 1:2006. “Yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción”, designado como tipo A (Conglomerante a base de yeso para la construcción) y está en posesión de la marca N de Aenor, según se establece en el reglamento particular RP 35.02.

Está clasificada como Euroclase A1 (no contribución al fuego), al tener menos de un 1% en peso o volumen de materia orgánica, según la directiva 86/106/CEE relativa a productos de construcción.

Según datos obtenidos en la fábrica de San Martín de donde procede, tiene una conductividad térmica (λ) de 0,34 W/mK (valor medio de enlucido/guarnecido de yeso), un índice de pureza mayor del 90%, una granulometría comprendida entre

0 y 0,2 mm., resistencia mecánica a flexión mayor a 3,5 N/mm² y relación agua/yeso comprendida entre 0,7-0,8, según su uso.

El material ha sido proporcionado en sacos de 25 kg., y han sido almacenados sobre superficies planas, manteniéndolo a cubierto y resguardado de la luz solar y de la humedad.

- Residuo cerámico (Chamota)

El residuo utilizado es una cerámica triturada, también denominado chamota, de diversas procedencias y naturaleza:

- Chamota tipo A: ladrillo cerámico, cuya composición es material estrictamente cerámico, sin ningún tipo de adición. Su procedencia es la fábrica “Cerámicas la Paloma” (Toledo).
- Chamota tipo B: baldosas cerámicas, cuyo material resultante es cerámica y arena. Su procedencia es la fábrica “Cerámicas la Paloma” (Toledo).
- Chamota tipo C: residuo de ladrillo hueco simple/doble. Su procedencia es de obra nueva.
- Chamota tipo D: residuo de ladrillo perforado. Su procedencia es de obra nueva.
- Chamota tipo E: residuo de tabique de rasilla con revestimiento de yeso. Su procedencia es de obra de rehabilitación, por lo que tiene un porcentaje de otros materiales como yeso y pintura.
- Chamota tipo F: residuo de teja plana. Su procedencia es de obra de rehabilitación.

- Agua

El agua es una sustancia cuya molécula está formada por dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno (H₂O). Dicha sustancia es la más empleada para la elaboración de materiales conglomerantes ya que gracias a su presencia endurecen y dan lugar a nuevos materiales.

- Plast Retard

Plast Retard actúa como retardante en las mezclas agua-yeso, ralentizando el crecimiento de los cristales de hidrato. Su actividad está caracterizada por la

correlación entre la dosis de uso y el grado de retardamiento, proporcionando excelentes resultados aún a dosis bajas (0,01% sobre el peso yeso).

Además es un producto biodegradable, compatible con otros aditivos y no alimenta a la aparición de moho, asegurando un regular endurecimiento, una mezcla homogénea, un aumento en la dureza superficial así como minimiza los riesgos de fisuración.

- Cal hidráulica

La Cal Hidráulica es una cal en polvo y parcialmente apagada que puede fraguar en sitios húmedos y debajo del agua. Tiene una baja resistencia mecánica, ya que su valor depende de la proporción de arcilla que contengan, teniendo en cuenta que por encima del 21,8% se obtiene ya un Cemento de fraguado lento.

5.1.2 Caracterización de la Escayola E-35.

Para la caracterización de la escayola se realizó el ensayo del método de amasado a saturación.

5.1.2.1 Método de amasado a saturación.

Para determinar la relación Agua / Escayola (A/E) se ha realizado el ensayo del Método de amasado a saturación según la Norma UNE EN 13279-2008.

Consiste en verter 100 gramos de agua en un recipiente cilíndrico de vidrio de unos 66 mm de diámetro interior y 66 mm de altura, con marcas verticales a los 16 mm y a los 32 mm de distancia desde la base, y se determinan los gramos de yeso que son necesarios hasta la saturación.

Durante los primeros 60 segundos se espolvorea la escayola uniformemente sobre la superficie del agua hasta alcanzar la primera marca a los 30 segundos y la segunda marca a los 60 segundos. Se continua hasta los 90 – 100 segundos, momento en que la pasta de yeso debe alcanzar unos 2 mm. por debajo de la superficie del agua. En los 20 a 40 segundos posteriores se ha de espolvorear yeso hasta que la capa de agua desaparezca.

Antes de pesar, se elimina el exceso de yeso de los bordes del recipiente de vidrio. Se anota la masa m_1 .

Figura 5.02. Peso de 100 g. de agua en báscula.

Figura 5.03. Espolvoreo de escayola en el agua.

Figura 5.04. Estado final del ensayo con el agua cubierto de escayola.

Se repite el ensayo una vez más y se calcula el valor medio de la cantidad de yeso espolvoreada.

La relación agua / escayola viene dada por la expresión:

$$R = \frac{100}{m_1 - m_0}$$

Siendo:

m_0 la masa del vaso + la masa del agua, en gramos.

m_1 la masa del vaso + la masa del agua + la masa del yeso, en gramos.

5.1.3 Caracterización y tratamiento previo del residuo cerámico

El residuo se recibe en sacos con diferentes tamaños de los restos del material. Para proceder a clasificar el producto, en primer lugar se seca en estufa. Se extendió todo el residuo sobre bandejas y se sometió todo el material durante 24 horas a una temperatura de 150°C.

Figura 5.05. Residuo cerámico sobre bandejas para introducir en estufa.

Se anotan los pesos iniciales de cada bandeja antes de introducirlas en la estufa y se comprueba que al pasar 24 el material había obtenido totalmente su peso seco.

Figura 5.06. Chamota en estufa.

Posteriormente se tamizó todo el material con los tamices de 2 mm – 1mm – 0,5 mm – 0,25 mm – <0,25 mm (fondo). El residuo cerámico que no atravesaba dichas dimensiones se introduce nuevamente en la trituradora de mandíbulas para no desaprovechar nada de material.

Figura 5.07. Machacadora de mandíbulas.

Figura 5.08. Tamizadora mecánica.

Figura 5.09. Chamota tamizada.

5.1.4 Selección de los porcentajes de adición y granulometría de la chamota

Para la realización de todos los ensayos, se han establecido los siguientes porcentajes de material para definir muestras con árido grueso y fino respectivamente:

- Árido Grueso: formado por chamota con diámetro de grano de 2,0 mm y 1,0 mm En cada mezcla se aportaba la adición en los siguientes porcentajes:
 - Árido de 2,0 mm supone el 60% de la adición total.
 - Árido de 1,0 mm supone el 40% de la adición total.

- Árido Fino: formado por chamota con diámetro de grano de 1,0 mm 0,5 mm, 0,25 mm y <0,25 mm En cada mezcla se aportaba la adición en los siguientes porcentajes:
 - Árido de 1,0 mm supone el 25% de la adición total.
 - Árido de 0,5 mm supone el 25% de la adición total.
 - Árido de 0,25 mm supone el 25% de la adición total.
 - Árido de <0,25 mm supone el 25% de la adición total.

5.2 Fase 1: Escayola con adiciones de residuo cerámico

En esta fase se va a indicar la denominación de cada muestra a analizar a través de varios ensayos. Al final de todo el análisis se definirá cuál es el residuo cerámico que presenta mejor comportamiento. El presente apartado da respuesta al objetivo 2 y 3.

5.2.1 Denominación de las muestras a ensayar

La nomenclatura que se ha utilizado para identificar a las distintas mezclas ensayadas viene definida por:

- E: Escayola E-35.
- % de adición de residuo cerámico sobre el peso de la escayola definido en el apartado 5.1.4.
- Letra G o F: referido a si es árido grueso o árido fino definido en el apartado 5.1.4.
- Letra A, B, C, D, E, F o G identificando los tipos de residuos cerámicos (chamotas) definidos en el apartado 5.1.1.

Se muestra el resumen de todas las muestras a ensayar en la Tabla 5.01.

RECICLAJE DE RCD DE TIPO CERÁMICO PARA NUEVOS MATERIALES DE
CONSTRUCCIÓN SOSTENIBLE

Nomenclatura	Material de la matriz	Cantidad de Aditivo (%)	Tipo de árido	Tipo de Chamota
E	Escayola E-35	-	-	-
E + 25% G_A		25%	Árido Grueso	A (LADRILLO DE FÁBRICA)
E + 50% G_A		50%		
E + 75% G_A		75%		
E + 25% F_A		25%	Árido Fino	
E + 50% F_A		50%		
E + 75% F_A		75%		
E + 25% G_B		25%	Árido Grueso	B (ARCILLA + ARENA, FABRICACIÓN DE BALDOSAS)
E + 50% G_B		50%		
E + 75% G_B		75%		
E + 25% F_B		25%	Árido Fino	
E + 50% F_B		50%		
E + 75% F_B		75%		
E + 25% G_C		25%	Árido Grueso	C (LHD Y LHS PROCEDENTE DE OBRA NUEVA)
E + 50% G_C		50%		
E + 75% G_C		75%		
E + 25% F_C		25%	Árido Fino	
E + 50% F_C		50%		
E + 75% F_C		75%		
E + 25% G_D		25%	Árido Grueso	D (LADRILLO TOSCO PROCEDENTE DE OBRA NUEVA)
E + 50% G_D		50%		
E + 75% G_D		75%		
E + 25% F_D		25%	Árido Fino	
E + 50% F_D		50%		
E + 75% F_D		75%		
E + 25% G_E		25%	Árido Grueso	E (TABIQUE CON REVESTIMIENTO PROCEDENTE DE OBRA DE DEMOLICIÓN)
E + 50% G_E		50%		
E + 75% G_E		75%		
E + 25% F_E		25%	Árido Fino	
E + 50% F_E		50%		
E + 75% F_E	75%			
E + 25% G_F	25%	Árido Grueso	F (TEJA PLANA PROCEDENTE DE OBRA DE DEMOLICIÓN)	
E + 50% G_F	50%			
E + 75% G_F	75%			
E + 25% F_F	25%	Árido Fino		
E + 50% F_F	50%			
E + 75% F_F	75%			

Tabla 5.01. Definición de los tipos de probetas a elaborar en la Fase 1.

5.2.2 Confección de probetas

Las probetas se han elaborado según la Norma UNE-EN 13279-2. Para el estudio de las resistencias mecánicas del nuevo material se elaboran probetas prismáticas de 40 x 40 x 160 mm, confeccionadas en moldes triples de acero templado rectificado según norma UNE-EN 196-1 y que cuentan con certificado de calibración y verificación.

Figura 5.10. Molde para confección de probetas.

Figura 5.11. Amasadora mecánica.

La mezcla de escayola, adición y agua se realiza según indica la norma:

1. Preparación de la cantidad adecuada de escayola, chamota (porcentaje en peso de la escayola) y agua (según relación agua/escayola).
2. Incorporación del residuo cerámico a la escayola, homogeneizando la mezcla durante aproximadamente 45 segundos.
3. Vertido de la mezcla escayola-chamota sobre el agua. Se remueve manualmente con una paleta durante 1 minuto.
4. La pasta formada se introduce en la mezcladora amasadora durante 1 minuto a baja velocidad $(140 \pm 5) \text{ min}^{-1}$ en rotación y $(62 \pm 5) \text{ min}^{-1}$ en movimiento planetario.
5. La pasta se vierte en los moldes (previamente engrasados) intentando evitar que se produzcan burbujas de aire.
6. Una vez lleno el molde, éste se sacude 10 veces sobre la mesa para minimizar la presencia de coqueas en el elemento.
7. Se engrasa la superficie del molde, eliminando la pasta sobrante.
8. Se desmoldan las probetas una vez han adquirido un cierto grado de resistencia.

Una vez confeccionadas, las probetas debidamente identificadas, se mantienen durante 6 días en atmósfera de laboratorio. Después, se introducen durante 24

horas en estufa a una temperatura de 40 ± 2 °C. En este tiempo adquieren masa constante. Posteriormente, ya transcurridos los 7 días, se enfrían en desecador hasta alcanzar la temperatura del laboratorio y se someten a ensayo. Todas las probetas se pesan al desmoldar y a los 7 días tras sacarlas de la estufa (peso desecado).

La norma de referencia para todo el proceso descrito es la UNE-EN 13279-2 “Yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción, parte 2: métodos de ensayo.”

5.2.3 Ensayos realizados

En total se realizan ocho ensayos: dos de ellos en las masas de los conglomerantes resultantes, y seis en el estado endurecido de las mismas.

5.2.3.1 Mesa de sacudidas

Se utiliza el método de la mesa de sacudidas, recogido en la Norma UNE-EN 13279-2 para determinar la relación A/E de los yesos premezclados.

El proceso se realiza como sigue:

1. Se pesan $1,5 \text{ dm}^3$ de escayola, y la cantidad de agua determinada por ensayos previos.
2. Se añade la escayola al agua y se remueve manualmente con la paleta durante 1 minuto. La pasta formada se mezcla durante 1 minuto con la amasadora mecánica a baja velocidad $(140 \pm 5) \text{ min}^{-1}$ en rotación y $(62 \pm 5) \text{ min}^{-1}$ en movimiento planetario.
3. Se coloca el molde troncocónico en el centro de la placa de cristal de la mesa de sacudidas y se sujeta firmemente con la mano. Se rellena el molde con la pasta en exceso y posteriormente se enrasa.
4. Tras 10 – 15 segundos se levanta el cono verticalmente y se aplican 15 golpes verticales mediante la mesa de sacudidas, a una velocidad constante de una revolución por segundo.
5. Se mide el diámetro de la galleta resultante en dos direcciones perpendiculares. La medida debe ser de $(165 \pm 5) \text{ mm}$.

6. Cuando el diámetro difiera del especificado, se repite el ensayo desde el principio utilizando cantidades mayores o menores de agua.

Figura 5.12. Ensayo de la mesa de sacudidas.

5.2.3.2 Tiempo de fraguado. Método del cuchillo

Para determinar el tiempo de fraguado en conglomerantes a base de yeso se utiliza el Método del Cuchillo, recogido en la Norma UNE-EN 13279-2.

El presente ensayo se precisa la fabricación de las distintas galletas de yeso, cuyas pastas deben ser mezcladas y preparadas con la cantidad de agua determinada según el método de amasada a saturación (descrito en apartado 5.1.2.1) o el método de la mesa de sacudidas (descrito en el apartado 5.2.3.1).

A continuación, las pastas de yeso se vierten sobre placas de vidrio, agitando constantemente, para formar galletas de unos 100 – 120 mm de diámetro y de unos 5 mm de espesor.

Se debe anotar el tiempo en el que se pone en contacto el yeso o el conglomerante de yeso con el agua (t_0). Posteriormente se deben hacer cortes a la galleta con un cuchillo a intervalos no superiores a $1/20$ del tiempo esperado de principio de fraguado. En esta ocasión cada minuto se hacía un corte con el cuchillo. Cuando los labios de la hendidura dejan de acercarse, se determinará el tiempo t_1 .

Finalmente el principio de fraguado (T_i) viene dado por la fórmula siguiente:

$$T_i = t_1 - t_0$$

Figura 5.13. Ensayo del método del cuchillo.

5.2.3.3 Densidad

La densidad o densidad absoluta es la magnitud que expresa la relación entre la masa de un cuerpo y el volumen que ocupa. Usualmente se simboliza mediante la letra rho “ ρ ” del alfabeto griego. Su unidad en el Sistema Internacional es kilogramo por metro cúbico (kg/m^3), aunque frecuentemente también es expresada en g/cm^3 . La expresión matemática que la define es la siguiente:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Donde :

ρ es la densidad

m es la masa

V es el volumen de la sustancia.

5.2.3.4 Dureza superficial Shore C

El presente ensayo se recoge en la Norma UNE-EN 102-039-85 “Yesos y escayolas de construcción, Determinación de la Dureza Shore C, y de la dureza Brinell”, aplicable a todos los yesos y escayolas en pasta pura. La norma especifica que, de tratarse de un yeso o escayola con agregados ligeros, como es este caso, el método habrá de adaptarse coherentemente a las especificaciones del ensayo.

Figura 5.14. Durómetro Shore C.

Figura 5.15. Medición de la dureza Shore C en una de las probetas.

Este método se utiliza para medidas en laboratorio y en obra. Los resultados han sido obtenidos con un Durómetro Shore C, tras la elaboración de las probetas de 40x40x160 mm anteriormente descritas en el apartado 5.2.2.

Los valores indican la dureza en unidades Shore C en una escala que va de 0-100. La fuerza que se aplica para una dureza de 100 unidades Shore C es de 44,5 N.

La dureza superficial es inversamente proporcional a la penetración. Influyen en los resultados la huella del punzón, la fuerza aplicada y la duración de la aplicación. En caso de grandes diferencias con respecto al valor medio, se repite la medida asegurándose de que las burbujas de aire no perturben la medida.

5.2.3.5 Comportamiento mecánico a flexión

La resistencia a flexión se obtiene mediante la determinación de la carga necesaria para romper una probeta prismática de (40 x 40 x 160) mm apoyada sobre rodillos cuyos centros estén separados 100mm. Se basa en la Norma UNE-EN 13279-2.

Figura 5.16. Dispositivo de flexión de la prensa motorizada Autotest, Modelo 200/10-SW.

La probeta debe colocarse sobre los rodillos del dispositivo de flexión y, mediante un rodillo central, debe aplicarse una carga hasta que se rompa la probeta. Se anota la carga máxima, en Newton, que soporta la probeta.

La resistencia a flexión (σ_f) viene expresada como el cociente entre el momento flector (M_f) y el módulo resistente (W) del material.

$$\sigma_f = \frac{\text{Momento Flector}}{\text{Módulo Resistente}} = \frac{M_f}{W}$$

Para este caso concreto, el momento flector que corresponde a una pieza simplemente apoyada sometida a una carga puntual en su punto medio, es:

$$M_f = \frac{P \times l}{4}$$

Y el módulo resistente de una sección como la de la probeta utilizada, es:

$$W = \frac{a \times b^2}{6}$$

Luego, sustituyendo:

$$\sigma_f = \frac{\frac{P \times l}{4}}{\frac{a \times b^2}{6}} = \frac{3 \times P \times l}{2 \times a \times b^2}$$

Dado que la luz (l) es constante (100mm) y las dimensiones de la probeta (a) y (b) también son constantes (40mm), la expresión anterior puede simplificarse a:

$$\sigma_f = \frac{3 \times P \times l}{2 \times a \times b^2} = \frac{3 \times P \times 100}{2 \times 40 \times 40^2} = 0,00234 \times P$$

La carga P se mide en N y la resistencia a flexión (σ_f) viene expresada en N/mm².

5.2.3.6 Comportamiento mecánico a compresión

La resistencia a compresión se determina aplicando una carga a los dos trozos rotos de las probetas procedentes del ensayo de resistencia a flexión. Se basa en la Norma UNE-EN 13279-2.

Figura 5.17. Dispositivo de compresión de la prensa motorizada Autotest, Modelo 200/10-SW.

Las partes de las probetas se colocan con sus caras laterales lisas y paralelas hacia arriba y hacia abajo entre los dos platos de acero de la prensa de compresión, de forma que los lados de la probeta que estuvieron en contacto con las caras del molde estén en contacto con los platos de la prensa en una sección de mm². La carga debe aplicarse sobre la probeta hasta su rotura.

Debe calcularse el valor medio de los seis valores obtenidos en cada amasada y expresarse en N/mm².

La carga de resistencia a compresión (σ_c) viene dada por la expresión:

$$\sigma_c = \frac{P}{1.600}$$

Donde:

σ_c es la resistencia a compresión en N/mm².

P es la máxima carga de la rotura en N.

1.600 = 40 mm x 40 mm es el área de la probeta en mm².

5.2.3.7 Absorción de agua por capilaridad

En este ensayo se hace referencia a la Norma Europea EN 459-2:2001 “Determinación de la retención de agua” según el método de ensayo descrito en el apartado 5.6, realizando algunas variaciones.

El procedimiento llevado a cabo es el siguiente: las probetas, previamente desecadas, se colocan en posición vertical en un recipiente con una profundidad de 1 centímetro de agua siempre constante, poniendo el cronómetro en marcha en el momento de la introducción de la probeta. Cada minuto se marca el nivel de ascensión de humedad que ha sufrido la probeta, dando por finalizado el ensayo cuando han transcurrido 10 minutos, siendo este nivel el resultado del ensayo.

Figura 5.18. Absorción de agua por capilaridad en probeta de ensayo.

5.2.3.8 Adherencia

El presente ensayo se define en la Norma UNE-EN 13279-2. Este ensayo se ha realizado una vez finalizados los ensayos anteriormente descritos con las mezclas óptimas resultantes.

La adherencia de un yeso a un determinado soporte se determina mediante la máxima carga que soporta cuando un disco de metal pegado al yeso se arranca de forma perpendicular a su superficie.

Los utensilios y materiales empleados son:

- Discos de metal de 50 mm de diámetro y con un espesor no menor de 10 mm, con un dispositivo central para realizar tracciones.

- Resina epoxy para pegar los discos de metal a la base del material de ensayo.
- Broca para cortar probetas de 50 mm $\pm 0,5$ mm de diámetro del yeso endurecido.
- Aparato de tracción que permita aplicar una carga de tracción sobre los discos de metal, sin que el conjunto se vea sometido a una carga de flexión. El manómetro de lectura de ensayo a tracción debe tener una precisión en la medición del $\pm 5\%$ de la carga máxima registrada.

El soporte empleado son ladrillos cerámicos hueco sencillo que, previamente, han sido sumergidos en agua durante una hora y, posteriormente, dejado escurrir durante cinco minutos.

Figura 5.19. Preparación del ensayo de adherencia.

Cuando el yeso haya fraguado, las probetas deben mantenerse durante siete días en la atmósfera de ensayo. Mediante la broca se separan las áreas circulares a ensayar del conjunto de la masa. El corte debe hacerse a una profundidad de 5 mm aproximadamente.

Figura 5.20. Taladro circular mediante broca.

Sobre estas probetas, mediante el adhesivo resina epoxi, se pega el disco de metal centrado sobre la probeta asegurándose de que el adhesivo no ocupe el hueco existente entre las probetas aisladas y el resto de la masa conectándolas.

Figura 5.21. Pegado de disco de metal mediante resina epoxi al material de ensayo.

Tras dejar secar durante 24 horas la resina epoxi, se aplica la carga de forma perpendicular a la superficie de ensayo mediante el aparato correspondiente. La carga debe aplicarse a una velocidad constante comprendida entre 0,003 N/mm² y 0,1 N/mm² por segundo.

Figura 5.22. Aplicación de fuerza perpendicular a la superficie de ensayo.

La resistencia de adherencia individual se calcula mediante la fórmula:

$$R_u = \frac{F_u}{A}$$

Donde:

R_u es la fuerza de adherencia de N/mm².

F_u es la carga de rotura en N.

A es el área de ensayo en la probeta cilíndrica en mm².

La adherencia se calcula como el valor medio de todos los calores individuales; se expresa con una precisión de 0.01 N/mm².

En algunos casos, la rotura puede no producirse en la interfase yeso-soporte, sino dentro de la propia masa de yeso, en el soporte o en el pegamento (resina epoxi) en el disco de metal. En estos casos, el valor de la resistencia de adherencia será superior al valor determinado. Estos valores, por tanto, no deben ser tenidos en cuenta en el cálculo de la medida. En cualquier caso, debe indicarse el tipo de rotura en cada caso según lo indicado en las siguientes figuras:

Leyenda

- 1 Placa de ensayo
- 2 Capa de adhesivo
- 3 Capa de yeso
- 4 Soporte

(La rotura se manifiesta en la interfase capa de yeso - soporte; el valor de la resistencia de adherencia coincide con los resultados indicados por el dispositivo de ensayo)

Figura 5.23. Rotura tipo A. Rotura por adhesión.

(La rotura se manifiesta dentro de la masa del yeso; el valor de la resistencia de adherencia es superior a los valores indicados por el dispositivo de ensayo)

Figura 5.24. Rotura tipo B. Rotura por cohesión.

(La rotura se manifiesta en el soporte; el valor de la resistencia de adherencia es superior a los valores indicados por el dispositivo de ensayo)

Figura 5.25. Rotura tipo C. Rotura por cohesión.

(La rotura se manifiesta en la capa de adhesivo debido a un mal pegado de éste. En este caso debe repetirse el ensayo)

Figura 5.26. Rotura tipo D.

5.2.4 Elección del residuo cerámico que presenta mejor comportamiento

Una vez elaborados todos los ensayos anteriormente descritos, con cada tipo de chamota y con los porcentajes de adición, se procederá a seleccionar qué residuo ofrece mejor comportamiento y en qué porcentaje atendiendo a las exigencias de la normativa, así como se realizará una encuesta entre profesionales del sector. Posteriormente se analizará más en profundidad la composición química y mineralógica del residuo, así como se determinarán qué áreas de mejora con el fin de perfeccionar el nuevo material reciclado.

5.3 Fase 2: Compuestos seleccionados

A lo largo de esta segunda fase se va a llevar a cabo:

- La caracterización química y mineralógica del residuo cerámico seleccionado.
- Las mejoras a aplicar en dichos compuestos.
- La caracterización de los nuevos materiales.
- Elección de los mejores compuestos.

De este modo se da respuesta a los objetivos 4 y 5.

5.3.1 Caracterización química y mineralógica del residuo cerámico seleccionado

Con el fin de analizar más en profundidad el residuo cerámico seleccionado, se analizará en primer lugar su composición química y mineralógica a través de los ensayos que se detallan a continuación:

5.3.1.1 Caracterización química: Espectrometría de Fluorescencia de Rayos X (FRX)

Para determinar la composición química del residuo cerámico se utiliza la Espectrometría de Fluorescencia de Rayos X (FRX), la cual consiste en el choque de un haz de rayos X de gran energía contra la sustancia a analizar, provocando la expulsión de electrones internos en los átomos que han absorbido la radiación. Al caer electrones más externos en los huecos creados se produce radiación X de

fluorescencia, de una longitud de onda mayor que la incidente, característica de los átomos que la producen (Figura 5.27).

Figura 5.27. Fundamento de la fluorescencia de rayos X

Identificando dicha longitud de onda o energía de cada una de las radiaciones características y cuantificando sus intensidades, se determina los elementos presentes en la muestra, así como sus respectivas concentraciones.

El equipo a utilizar es un espectrómetro PHILIPS PW 1404/00/01 que trabaja con ángulos de 2θ desde 0° a $147,6^\circ$. La intensidad de corriente y voltaje aplicados al tubo generador de rayos X fue de 80 mA y 100 kV, respectivamente y un tubo anticátodo de rodio de 4 kW de potencia.

Figura 5.28. Equipo de Fluorescencia de Rayos X PHILIPS PW 1404/00/01

5.3.1.2 Caracterización mineralógica: Difracción de Rayos X (XDR)

Conocida la composición química del residuo cerámico, se procederá a estudiar la composición mineralógica mediante Difracción de Rayos X (XDR). Esta técnica nos permite estudiar bajo la forma de qué fases cristalinas se encuentran dichos elementos.

El método de Difracción de Rayos X se basa en que los átomos, moléculas o iones de un cristal se disponen de forma regular en el espacio de manera que la distancia entre ellos es del mismo orden de magnitud que la longitud de onda de los rayos X por lo que los cristales pueden producir fenómenos de difracción. Cuando un haz monocromático de rayos X incide sobre un cristal con un ángulo de incidencia θ , para que la radiación reflejada esté en concordancia de fase y por lo tanto, de lugar a la difracción, es necesario que la diferencia de recorrido de los rayos sea múltiplo de la longitud de onda.

Figura 5.29. Fundamento de la Difraccion de Rayos X

Se producirá difracción en aquellos rayos que cumplan la Ley de Bragg:

$$2d \times \sin \theta = n \lambda$$

Donde:

d es la distancia interplanar

n es el número entero que representa el orden de difracción

λ es la longitud de onda de la fuente de rayos X.

El difractómetro empleado fue un Philips modelo PW1710 que consta de un generador de alta tensión de 4KV, tubo de rayos X con ánodo de Cu que normalmente trabaja a 40 KV y 50 mA, rendija automática de divergencia y

monocromador de grafito y portamuestras automático. El registro se realizó en el rango de 2θ entre 5° y 60° .

El análisis de los difractogramas de RX se realiza a través del programa informático EVA, el cual contiene una base de datos con las fichas de JCPDS de los diferentes compuestos y elementos, lo cual facilita la identificación de las estructuras y características de red.

Figura 5.30. Equipo de Difracción de Rayos X Philips modelo PW1710

5.3.1.3 Caracterización mineralógica: Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier FTIR

Con el fin de completar el estudio mineralógico, se lleva a cabo la técnica de Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR). Es una técnica sencilla, rápida y de alta sensibilidad.

La espectroscopia infrarroja (IR) estudia la interacción entre la materia y la radiación infrarroja, cuyas longitudes de onda oscilan entre $0,7$ y $1000\ \mu\text{m}$. La espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier se basa en el hecho de que las moléculas tienen frecuencias a las cuales rotan y vibran, es decir, los movimientos de rotación y vibración moleculares tienen niveles de energía discretos. Para identificar las especies químicas de una muestra, determinamos la frecuencia (número de ondas, n) a la que los diferentes grupos funcionales de la muestra presentan bandas de absorción en el espectro. Podemos conocer además la concentración de las especies en la muestra atendiendo a la intensidad de las bandas.

El espectrofotometro utilizado fue un Nicolet 6700 de Thermo Scientific (Figura 5.31). En todas las determinaciones se empleó el método del comprimido de KBr. Para ello, se mezcló un 1 mg de muestra solida con 300 mg de KBr en un mortero de ágata y posteriormente se compacto mediante una prensa hidráulica a vacio en un troquel especial hasta obtener un disco transparente que se coloca en la trayectoria del haz (Figura 5.31). Los espectros se obtuvieron a partir de 64 barridos en el rango de 4000 a 400 cm^{-1} .

Figura 5.31. Espectrómetro NICOLET 6700 y prensa empleada para la preparación de las pastillas de KBr

5.3.2 Mejoras a aplicar a los distintos compuestos

Tras los resultados que se obtengan en el apartado 5.2 definida como la Fase 1 de ensayos, se podrá identificar qué áreas de mejoras pueden tener los compuestos seleccionados. Para ello se definirán nuevos compuestos con otras adiciones y/o aditivos que puedan perfeccionar el comportamiento de dichos materiales reciclados de cara a ser empleados como revestimiento de paramentos interiores en edificación.

5.3.3 Caracterización de los nuevos materiales

Una vez definidos los nuevos compuestos con las particularidades nuevas que nos puedan ofrecer mejores resultados, se procederá a desarrollar exactamente los mismos ensayos que los definidos en el apartado 5.2.3 con el fin de poder comparar si se mejoran los resultados.

Además se completarán dichos análisis con los siguientes ensayos:

- Determinación del principio de fraguado con el cono de Vicat
- Módulo de elasticidad a compresión. El módulo de Young

5.3.3.1 Determinación del principio de fraguado con el cono de Vicat

Se analizará el tiempo de inicio de fraguado con más detalle a través del ensayo definido con la Aguja de Vicat según el método descrito en la norma UNE-EN 13729-2:2006, y en consecuencia se definirán convenientemente las dosificaciones de las relaciones Agua/Escayola.

Inicialmente debe amasarse la mezcla atendiendo a la relación Agua/Escayola previamente definida. Se anotará el momento en que se empieza a echar el yeso en el agua t_0 y seguidamente debe colocarse el molde de caucho su parte más ancha en contacto con la placa de vidrio y verter en su interior el material amasado. Se eliminará el material sobrante, dejando enrasado la muestra en el cono.

A continuación se debe abrir la barra guía utilizando el mecanismo de disparo. No deberá transcurrir más de una vigésima parte del principio de fraguado entre penetraciones sucesivas del cono. Se debe limpiar y secar el cono en cada penetración y deberá haber como mínimo distancias de 12 mm. entre cada marca de penetración. Se anotará el momento en que el cono penetra hasta una profundidad de 22 ± 2 mm sobre la placa de vidrio, teniendo así t_1 .

El tiempo de inicio de fraguado viene dado por la expresión:

$$T_i = t_1 - t_0$$

Donde:

t_1 es el tiempo, en minutos, en que la profundidad de penetración del cono dentro de la pasta de yeso llega a los 22 ± 2 mm por encima de la placa de vidrio.

t_0 es el tiempo, en minutos, en que el yeso se pone en contacto con el agua.

Figura 5.32. Método del cono de Vicat

5.3.3.2 Módulo de elasticidad a compresión. El módulo de Young

El módulo de Young o módulo de elasticidad longitudinal es un parámetro que caracteriza el comportamiento de un material elástico, según la dirección en la que se aplica una fuerza.

Se determinará el módulo de Young estático con el fin de conocer la flexibilidad y elasticidad de los materiales. Es importante que presenten un buen comportamiento ante esta propiedad si van a ser empleados como revestimiento de paramentos interiores de las viviendas, ya que tendrán que adaptarse y absorber todo el movimiento que el edificio les trasmita.

Para un material elástico lineal e isótropo, el módulo de Young tiene el mismo valor para la tracción que para la compresión.

Para un material elástico lineal el módulo de elasticidad longitudinal es una constante (para valores de tensión dentro del rango de reversibilidad completa de deformaciones). En este caso, su valor se define como el cociente entre la tensión y la deformación que aparecen en una barra recta estirada fabricada con el material del que se quiere estimar el módulo de elasticidad:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{F/S}{\Delta L/L}$$

Donde:

E es el módulo de elasticidad longitudinal.

σ es la presión ejercida sobre el área de sección transversal del objeto.

ε es la deformación unitaria en cualquier punto de la barra.

En materiales como los yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción, no existe ninguna norma que regule ensayos normalizados para el establecimiento del módulo de elasticidad.

La norma UNE-EN 13279-2 establece cómo determinar la resistencia a flexión y la resistencia compresión de yesos y sus composiciones, con lo que para la obtención del módulo de Young se han realizado ensayos de resistencia a compresión, midiendo la deformación producida en las probetas bajo la carga aplicada.

La norma UNE 22-950-90 titulada “Propiedades mecánicas de las rocas. Ensayos para la determinación de la resistencia. Parte 3: Determinación del módulo de la elasticidad”, establece que mediante ensayo de compresión uniaxial, utilizando

una máquina adecuada para aplicar y medir la carga axial sobre las probetas realizando ciclos de carga y descarga, al menos dos ciclos.

La norma UNE 83316 referente a Ensayos de Hormigón, determina del módulo de elasticidad en compresión, establece como método centrar la probeta en la máquina de ensayo, con el instrumento de medida colocado en posición axial, aplicar la tensión inicial e incrementar uniformemente la tensión hasta que la tensión alcance un 30% de la resistencia a compresión del material.

Figura 5.33. Dispositivo de compresión de la prensa motorizada Ibertest Modelo IB-3540-004M-ST ensayando a compresión.

Siendo el módulo de elasticidad en compresión, el resultado de la siguiente expresión:

$$\frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_f - \sigma_0}{\varepsilon_f - \varepsilon_0}$$

Donde:

σ_f es la tensión en el escalón correspondiente a un tercio de la tensión de rotura a compresión que soporta en (MPa).

σ_0 es la tensión inicial (0,5 N/mm²).

ε_f es la deformación media, bajo el nivel de carga máxima.

ε_0 es la deformación media, bajo el nivel de esfuerzo base de carga.

5.4 Fase 3: Viabilidad de la aplicación del compuesto definitivo

Una vez analizados los resultados obtenidos, se elegirá definitivamente el compuesto reciclado que mejores prestaciones presenta para poder ser empleado como revestimiento de paramentos interiores. En el presente apartado se da respuesta al objetivo 6.

5.4.1 Caracterización del compuesto seleccionado

Con el fin de completar el estudio sobre el nuevo compuesto reciclado en base de escayola con cargas de residuo cerámico procedente de obra nueva, se realizan los siguientes ensayos de caracterización para la aplicación de revestimientos:

- Difracción por Rayos X
- Microscopía electrónica de barrido (SEM)
- Adherencia sobre varios soportes
- Ensayo de impacto por caída de bola de acero
- Comportamiento a ciclos de agua y estufa.
- Capacidad de absorción de la humedad.
- Determinación de la resistencia a la heladicidad.

A continuación se recapitulan los requerimientos mínimos para los yesos de construcción para aplicación como revestimientos que se han comentado en el apartado 1.1.3., atendiendo a las normas UNE-EN 13279-1 (AENOR, 2009) y UNE- EN 13279-2 (AENOR, 2014):

- Densidad: para yesos de construcción (B2) $<800 \text{ kg/dm}^3$.
- Tiempo de fraguado mínimo: 20 min (aplicación manual).
- Tiempo de fraguado mínimo: 50 min (aplicación mecánica).
- Resistencia a flexión: en general $\geq 1 \text{ N/mm}^2$.
- Dureza superficial: ≥ 65 unidades Shore C.

5.4.1.1 Difracción por Rayos X

Se realizará un análisis mineralógico a través de Difracción de Rayos X (DRX), (ensayo detallado en el apartado 5.3.1.2). En esta ocasión se va a realizar de todo el compuesto, es decir, sobre el material de yeso reciclado son adiciones de residuo cerámico resultante tras todo el trabajo de investigación.

5.4.1.2 Microscopía electrónica de barrido (SEM)

La Microscopía electrónica de barrido (SEM) permite obtener imágenes microscópicas de todo tipo de materiales. Nos proporciona caracterizaciones texturales, morfológicas y químicas de un gran número de fases. Las imágenes se pueden obtener con electrones secundarios y retrodispersados, estas últimas nos dan información de variaciones composicionales de la muestra, mientras que las primeras permiten observar la textura y características morfológicas de las fases analizadas. La escala de trabajo comprende aumentos que van desde pocas decenas hasta 300.000 en condiciones ideales. Con el detector de rayos X (EDX) se pueden realizar microanálisis puntuales, zonales y mapeados de elementos mayoritarios en muestras en polvo, lámina delgada, probeta pulida, rotura natural, etc.

El microscopio utilizado es electrónico de barrido JEOL JSM-820 con microanálisis (Figura 5.34). El software que emplea el equipo para la adquisición, tratamiento y evaluación de los análisis es el EDX Oxford ISIS-Link.

En el análisis realizado se han obtenido microanálisis puntuales en muestras en rotura natural. las cuales fueron pegadas con pegamento de Loctite a unos porta muestras y recubiertas con una fina capa de oro con el fin de asegurar la conductividad de los electrones a través del material.

Los electrones al interaccionar con la muestra proporcionan dos tipos de imágenes, que proporcionan distinta información:

- Imagen de electrones secundarios (SE): Información superficial y morfológica de la muestra.
- Imagen de electrones retrodispersados (BSE): Información textural basada en la composición de la muestra.

Además esta técnica nos proporciona información de la composición química de una zona en concreto de la muestra, ya que al bombardear el área con electrones se generan rayos X característicos de los elementos existentes en la zona excitada que informan de la composición química de ese punto de la muestra.

Figura 5.34. Microscopio electrónico de barrido JEOL JSM-820

Se analizarán con el microscopio electrónico de barrido (SEM) las muestras del compuesto definitivo definido en el apartado 5.4.3. Para ello se obtiene un fragmento representativo de la probeta, sin que se deteriore el estado del compuesto, y se coloca sobre un portamuestras al que previamente se le ha impregnado de pegamento Loctite para que su adherencia entre éste y el compuesto sea máxima. Una vez preparadas las muestras, se introducen en la estufa a 40° C para eliminar la humedad. A continuación se procede a metalizar con oro el conjunto para hacerlo conductor.

5.4.1.3 Adherencia sobre varios soportes

Se repetirá el ensayo de adherencia definido en el apartado 5.2.3.7. sobre diferentes soportes de origen cerámico y de hormigón.

Actualmente en las obras de edificación, el revestimiento de paramentos interiores que van revestidos con guarnecido y enlucido de yeso son las tabiquerías de gran formato o de ladrillo hueco doble las cuales son de origen cerámico, o en los techos sobre el material de forjado, cuyas bovedillas tradicionalmente pueden ser cerámicas o de hormigón.

Figura 5.35. Ensayo de adherencia sobre bovedilla de hormigón y soporte cerámico.

5.4.1.4 Ensayo de impacto por caída de bola de acero

Dado que todos los revestimientos de paramentos verticales están expuestos a posibles golpes e impactos, se realiza un ensayo no normalizado que ha sido previamente utilizado por Leiva Aguilera et al. (2017) y del Río Merino et al. (1998) para analizar el comportamiento del compuesto seleccionado ante un impacto de una bola de acero.

El ensayo consiste en ejecutar unos revestimientos de 10 mm de espesor sobre soportes porcelánicos y sobre soportes de hormigón. Una vez fraguados, a los 7 días, se deja caer una bola de 439,40 gramos de peso y 47,50 mm. de diámetro desde una altura de 33,50 centímetros (ver Figura 5.36). De este modo conociendo el diámetro de la bola original (D) y el diámetro de la marca que deja la bola al caer sobre el soporte (d), se puede obtener la profundidad de la huella dejada (h).

Figura 5.36. Ensayo de impacto por caída de bola de acero

5.4.1.5 Comportamiento a ciclos de agua – estufa.

A continuación se determina el procedimiento seguido para este ensayo no normalizado por del Río Merino et al. (1998) y Leiva Aguilera et al. (2017):

- Se introducen las probetas en una cubeta con agua de manera que quedan perfectamente sumergidas (ver Figura 5.37).
- Transcurridos dos días se sacan y se pesan. Posteriormente se dejan en estufa durante dos días para que se sequen (ver Figura 5.38).
- Se ensayan a flexión y a compresión.

Figura 5.37. Ciclo de las probetas sumergidas en agua.

Figura 5.38. Probetas secas en estufa.

El ensayo permite determinar la capacidad de absorción del agua, la capacidad para secarse y para perder o no sección y el comportamiento mecánico de las probetas secas después de someterlas a uno o dos ciclos de agua-estufa.

5.4.1.6 Capacidad de absorción de la humedad.

Para determinar el comportamiento de los compuestos ante la humedad se realizan ensayos no normalizados que establecen de forma comparativa el comportamiento ante la humedad y el agua del compuesto. Se sigue el mismo procedimiento que del Río Merino (1999) utilizó en su tesis doctoral.

- Se introducen las probetas en cámara húmeda (temperatura 21°C y humedad relativa del 72%), hasta cinco días, tomando nota cada día de los incrementos de peso que se producen. A continuación se dejan secar a temperatura ambiente durante dos días.
- Pasados los siete días se ensayan las probetas a flexión y compresión.

5.4.1.7 Determinación de la resistencia a la heladicidad.

Para determinar el comportamiento de los compuestos frente a la heladicidad se ha adaptado el ensayo de la norma UNE-EN 1271 que hace referencia a piedra natural, ya que no existe una norma explícita de ensayos para yesos o escayolas.

El ensayo se realiza sobre probetas prismáticas de 160 mm x 40mm x 40 mm que se someten a ciclos de hielo/deshielo hasta 5 días. El procedimiento de cada ciclo del ensayo es el siguiente:

- Periodo de congelación: Se colocan las probetas horizontales en la cámara de heladidad procurando que no haya contacto entre ellas ni con las paredes de la cámara, donde permanecen 12 horas entre -8°C y -12°C (Figura 5.39)
- Periodo de descongelación: se sumergen las probetas en agua a temperatura entre 10°C y 30°C durante 12 horas.
- Periodo de ambiente: se sacan las probetas del agua y se dejan secar al aire 12 horas.

Figura 5.39. Periodo de congelación de probetas.

Una vez finalizados los ciclos se examinan las probetas y se someten a ensayo de flexotracción y compresión para obtener la pérdida de dicha resistencia después de los ciclos.

CAPÍTULO 6

RESULTADOS

6. RESULTADOS

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos para los objetivos propuestos en esta Tesis, así como el análisis y discusión de los mismos.

6.1 Fase 1: Escayola con adiciones de residuo cerámico

A continuación se presentan los valores obtenidos en los distintos ensayos realizados para caracterizar físicamente los compuestos elaborados en base de escayola con diferentes adiciones de residuos cerámicos (Objetivo 2 y 3).

6.1.1 Relación A/E de referencia

En primer lugar se caracteriza la Escayola E-35 a utilizar durante todo el trabajo de investigación mediante el ensayo del método de amasado a saturación. El ensayo se realiza dos veces con el fin de confirmar los valores que se obtengan de la Relación Agua / Escayola (A/E). Los resultados obtenidos son:

– Primer ensayo realizado:

m_0 : Vaso + agua = 208,50 g.

m_1 : Vaso + agua + yeso = 352,30 g.

$$A/E = \frac{100 \text{ g}}{352,30 \text{ g} - 208,50 \text{ g}} = 0,70$$

– Segundo ensayo realizado:

m_0 : Vaso + agua = 209,50 g.

m_1 : Vaso + agua + yeso = 353,40 g.

$$A/E = \frac{100 \text{ g}}{353,40 \text{ g} - 209,50 \text{ g}} = 0,70$$

La media obtenida de la relación **A/E es 0,70**, siendo un valor comprendido entre los determinados por el fabricante (0,70 - 0,80).

6.1.2 Resultados de los ensayos realizados en la Fase 1

En esta fase se van a elaborar las probetas con los diferentes residuos cerámicos a analizar en los porcentajes indicados en el apartado 5.2.1. Dichas probetas serán empleadas para realizar los ensayos de caracterización indicados en el apartado 5.2.3, siendo en el presente apartado donde se mostrarán los resultados obtenidos.

6.1.2.1 Determinación de la relación agua / escayola: Ensayo de Mesa de sacudida

Los valores medios que se obtienen en el ensayo de consistencia de las pastas mediante la Mesa de Sacudidas son los que se reflejan en la Tabla 6.01.

La escayola E-35 sin ningún tipo de aditivo (REF) presenta una relación A/E de 0,70.

RELACIÓN A/E							
		Chamota A	Chamota B	Chamota C	Chamota D	Chamota E	Chamota F
	% ADICIÓN	ARCILLA LIMPIA DE FABRICA	ARCILLA + ARENA LIMPIA DE FABRICA	LHS/LHD	LADRILLO PERFORADO	TABIQUE DE RASILLA DEMOLICIÓN	TEJA PLANA
ÁRIDO GRUESO	25%	0,70	0,70	0,77	0,60	0,90	0,67
	50%	0,90	0,90	0,80	0,70	1,40	0,80
	75%	1,00	1,00	0,95	0,80	1,70	0,90
ÁRIDO FINO	25%	0,87	1,10	0,70	0,70	1,80	1,00
	50%	1,00	1,20	0,82	0,82	2,80	1,15
	75%	1,20	1,35	0,90	0,90	3,70	1,20

Tabla 6.01. Relación A/E de las series realizadas de escayola E-35 con cargas de residuo cerámico.

Todas las probetas cumplen con la normativa ya que mantienen un diámetro de escurrimiento de 165 ± 5 mm. Como se puede observar, a mayor porcentaje de residuo añadido en las muestras, mayor relación A/E, destacando que el Ladrillo Perforado es el que menos cantidad de agua ha necesitado para los distintos porcentajes, en torno a un 10% menos respecto a los valores de referencia. Por el contrario, el residuo procedente de obra de demolición (Chamota E) requiere mayor cantidad de agua debido a que el residuo en realidad está formado por 60%

de material cerámico y un 40% correspondiente al revestimiento de yeso/enfoscado y pintura. Por este motivo se van a ver afectados el resto de ensayos.

6.1.2.2 Determinación del tiempo de inicio de fraguado: Método del cuchillo.

Los tiempos medios que se obtienen en el ensayo del Método del Cuchillo con el fin de determinar el tiempo de inicio de fraguado se reflejan en la Tabla 6.02.

La escayola E-35 sin ningún tipo de aditivo (REF) presenta un tiempo de fraguado de 12 minutos.

TIEMPO DE INICIO DE FRAGUADO (min)							
		Chamota A	Chamota B	Chamota C	Chamota D	Chamota E	Chamota F
	% ADICIÓN	ARCILLA LIMPIA DE FABRICA	ARCILLA + ARENA LIMPIA DE FABRICA	LHS/LHD	LADRILLO PERFORADO	TABIQUE DE RASILLA DEMOLICIÓN	TEJA PLANA
<i>Árido Grueso</i>	25%	7,00	7,00	9,00	6,00	5,00	7,00
	50%	7,00	7,00	8,00	6,00	4,00	7,00
	75%	6,00	6,00	8,00	5,00	3,50	5,00
<i>Árido Fino</i>	25%	5,00	5,00	8,00	5,00	4,00	4,00
	50%	5,00	5,00	7,00	5,00	4,00	3,50
	75%	5,00	5,00	7,00	4,00	4,00	3,50

Tabla 6.02. Tiempo de inicio de fraguado de las series realizadas de escayola E-35 con cargas de residuo cerámico.

Analizando los datos se observa que todas las muestras al incorporar residuo cerámico en su composición, disminuyen su tiempo de inicio de fraguado en torno al 40%. Estos resultados eran previsibles ya que el material cerámico se caracteriza por ser muy absorbente.

Destaca negativamente el compuesto que incorpora residuo de tabique de rasilla con revestimiento procedente de obra de demolición.

Por último, en términos generales, los compuestos que incorporan granulometría fina tienen un tiempo de inicio de fraguado menor que los compuestos con granulometría gruesa.

6.1.2.3 Determinación de la Densidad Seca

A continuación se muestran las densidades medias obtenidas de cada compuesto desecado, reflejando los datos en la Tabla 6.03.

La escayola E-35 sin ningún tipo de aditivo (REF) presenta una densidad seca de 1,09 g/cm².

DENSIDAD SECA (g/cm²)							
		Chamota A	Chamota B	Chamota C	Chamota D	Chamota E	Chamota F
	% ADICIÓN	ARCILLA LIMPIA DE FABRICA	ARCILLA + ARENA LIMPIA DE FABRICA	LHS/LHD	LADRILLO PERFORADO	TABIQUE DE RASILLA DEMOLICIÓN	TEJA PLANA
ÁRIDO GRUESO	25%	1,29	1,28	1,16	1,26	1,02	1,24
	50%	1,22	1,24	1,24	1,26	-	1,23
	75%	1,19	1,22	1,22	1,28	-	1,24
ÁRIDO FINO	25%	1,14	1,07	1,15	1,18	0,62	1,10
	50%	1,16	1,10	1,18	1,20	-	1,11
	75%	1,16	1,11	1,21	1,22	-	1,12

Tabla 6.03. Densidad seca de las series realizadas de escayola E-35 con cargas de residuo cerámico.

Las densidades de los compuestos analizados aumentan hasta un 20 % de manera justificada ya que al incorporar residuo cerámico en la base de escayola se está añadiendo un material con mayor masa y en consecuencia queda reflejado en sus densidades.

En esta ocasión destaca los compuestos que incorporan Chamota tipo E debido a que al contener menos cantidad de cerámica en su composición, favorece a que el material resultante sea más ligero.

Cabe destacar que con la chamota tipo E, sólo se hizo un 25 % de sustitución de materia prima por residuo debido a que en los primeros ensayos encontramos valores por debajo de la media del resto de materiales ensayados, por lo que desde un principio se fue desechando las opciones que no se acercaban a nuestro objetivo principal de la presente investigación.

6.1.2.4 Determinación de la Dureza superficial

Los valores medios que se obtienen de la Dureza Superficial de los distintos compuestos se muestran en la Tabla 6.04.

La escayola E-35 sin ningún tipo de aditivo (REF) presenta una dureza superficial de 88,00 Ud. Shore C.

DUREZA SUPERFICIAL (UD. SHORE C)							
		Chamota A	Chamota B	Chamota C	Chamota D	Chamota E	Chamota F
	% ADICIÓN	ARCILLA LIMPIA DE FABRICA	ARCILLA + ARENA LIMPIA DE FABRICA	LHS/LHD	LADRILLO PERFORADO	TABIQUE DE RASILLA DEMOLICIÓN	TEJA PLANA
ÁRIDO GRUESO	25%	87,33	88,25	85,13	94,55	81,80	91,80
	50%	81,68	83,32	84,65	92,00	-	88,07
	75%	81,03	81,63	87,70	93,53	-	88,82
ÁRIDO FINO	25%	82,13	70,37	88,10	89,63	73,80	81,02
	50%	73,27	69,10	87,42	88,42	-	75,87
	75%	69,78	66,13	86,72	87,72	-	75,37

Tabla 6.04. Dureza Superficial Shore C de las series realizadas de escayola E-35 con cargas de residuo cerámico.

Analizando los resultados se observa que todos ellos superan el mínimo establecido por normativa para revestimientos de yeso (> 65 Ud. Shore C).

Cabe destacar que las muestras que incorporan residuo procedente de fábrica, es decir, cerámica sin impurezas (Chamota A y B), así como los compuestos que incorporan adiciones de residuo procedente de tabiquería de rasilla con revestimiento incluido (Chamota E), obtienen peores valores que los de referencia.

Sin embargo los compuestos que incorporan residuo procedente de obra nueva (Chamora C, D y F) mejoran considerablemente la dureza superficial de los materiales resultantes, destacando especialmente los que contienen árido grueso. Se obtienen los mejores resultados con el residuo de ladrillo perforado aumentando dicha dureza hasta en un 7% cuando sustituyen un 25% de materia prima por residuo cerámico porcelánico ya sea con granulometría gruesa o fina.

6.1.2.5 Comportamiento mecánico a flexión y compresión

Los resultados medios que se han obtenido del comportamiento mecánico a flexión se muestran en la Tabla 6.05.

La escayola E-35 sin ningún tipo de aditivo (REF) presenta una resistencia a flexión de 5,97 MPa.

RESISTENCIA A FLEXIÓN (MPa)

		Chamota A	Chamota B	Chamota C	Chamota D	Chamota E	Chamota F
	% ADICIÓN	ARCILLA LIMPIA DE FABRICA	ARCILLA + ARENA LIMPIA DE FABRICA	LHS/LHD	LADRILLO PERFORADO	TABIQUE DE RASILLA DEMOLICIÓN	TEJA PLANA
ÁRIDO GRUESO	25%	5,44	5,37	5,00	7,71	4,36	6,27
	50%	3,69	3,73	5,16	5,17	-	4,99
	75%	2,81	3,29	4,59	5,43	-	4,94
ÁRIDO FINO	25%	4,38	2,94	5,86	6,21	1,22	3,84
	50%	3,29	2,61	5,65	4,98	-	3,38
	75%	2,80	2,16	4,59	4,77	-	3,23

Tabla 6.05. Resistencia a Flexión de las series realizadas de escayola E-35 con cargas de residuo cerámico.

Las resistencias obtenidas con las chamotas tipo A, B, C y E son inferiores a valores de referencia. Esta disminución es directamente proporcional si aumentamos el porcentaje de residuo, ya sea con granulometría gruesa o fina.

Destacan positivamente los materiales que contienen Chamota procedente de ladrillo perforado y teja plana (Chamota D y F), especialmente cuando se encuentra con porcentajes de sustitución del 25% de árido grueso los cuales llegan a mejorar la resistencia a flexión hasta un 29%.

Por otro lado se encuentran los resultados medios que se han obtenido del comportamiento mecánico a compresión que se detallan en la Tabla 6.06.

La escayola E-35 sin ningún tipo de aditivo (REF) presenta una resistencia a compresión de 16,35 MPa.

RESISTENCIA A COMPRESIÓN (MPa)							
		Chamota A	Chamota B	Chamota C	Chamota D	Chamota E	Chamota F
	% ADICIÓN	ARCILLA LIMPIA DE FABRICA	ARCILLA + ARENA LIMPIA DE FABRICA	LHS/LHD	LADRILLO PERFORADO	TABIQUE DE RASILLA DEMOLICIÓN	TEJA PLANA
ÁRIDO GRUESO	25%	14,07	13,45	12,01	21,56	9,87	17,07
	50%	8,46	8,10	10,29	13,79	-	13,01
	75%	5,05	6,21	10,20	15,71	-	11,81
ÁRIDO FINO	25%	10,18	6,22	13,93	18,19	2,11	9,27
	50%	7,34	4,99	12,91	14,22	-	7,07
	75%	5,40	3,17	11,51	12,79	-	6,16

Tabla 6.06. Resistencia a Compresión de las series realizadas de escayola E-35 con cargas de residuo cerámico.

Las resistencias a compresión obtenidas son similares a los datos anteriormente analizados ya que las resistencias mecánicas van ligadas.

En general cabe destacar que ninguno de los valores están por debajo de los mínimos establecidos por normativa. Entre los compuestos analizados destaca el ladrillo perforado que aumenta la resistencia hasta en un 31%, seguido de los resultados obtenidos con residuo de teja plana, con adiciones del 25% de residuo que también se obtienen resultados ligeramente superiores a los valores de referencia.

6.1.2.6 Absorción de agua por capilaridad

A continuación se presentan los valores medios obtenidos en los ensayos de absorción de agua por capilaridad en la Tabla 6.07.

La escayola E-35 sin ningún tipo de aditivo (REF) presenta una absorción de agua por capilaridad de 5,97 mm.

ABSORCIÓN DE AGUA POR CAPILARIDAD (mm)							
	% ADICIÓN	Chamota A ARCILLA LIMPIA DE FABRICA	Chamota B ARCILLA + ARENA LIMPIA DE FABRICA	Chamota C LHS/LHD	Chamota D LADRILLO PERFORAD O	Chamota E TABIQUE DE RASILLA DEMOLICIÓN	Chamota F TEJA PLANA
ÁRIDO GRUESO	25%	4,77	5,50	6,05	4,43	4,30	4,57
	50%	4,80	5,43	5,77	4,43	-	4,53
	75%	5,90	5,57	5,43	4,53	-	4,30
ÁRIDO FINO	25%	5,00	5,87	5,53	4,10	4,70	5,23
	50%	5,63	5,87	5,43	4,93	-	5,60
	75%	5,20	5,90	5,50	4,90	-	5,13

Tabla 6.07. Absorción de agua por capilaridad de las series realizadas de escayola E-35 con cargas de residuo cerámico.

Como se puede observar, en general todos los compuestos mejoran o están muy próximos a los valores de referencia. Esto es debido, como ya se ha comentado anteriormente, a que el material cerámico se caracteriza por ser muy absorbente, por ello mejora esta cualidad en los materiales resultantes. Estos datos son favorables de cara a emplear dichos materiales como revestimiento de paramentos interiores.

Cabe destacar que los mejores resultados se obtienen con el residuo procedente de ladrillo perforado, mejorando la absorción de agua por capilaridad hasta un 17% respecto a los valores de referencia.

6.1.2.7 Adherencia

A continuación se presenta en la Tabla 6.08 los resultados medios de adherencia de las distintas muestras sobre soporte cerámico.

La escayola E-35 sin ningún tipo de aditivo (REF) presenta una adherencia de 0,16 N/mm².

ADHERENCIA(N/mm²)							
		Chamota A	Chamota B	Chamota C	Chamota D	Chamota E	Chamota F
	% ADICIÓN	ARCILLA LIMPIA DE FABRICA	ARCILLA + ARENA LIMPIA DE FABRICA	LHS/LHD	LADRILLO PERFORADO	TABIQUE DE RASILLA DEMOLICIÓN	TEJA PLANA
ÁRIDO GRUESO	25%	0,15	0,15	0,17	0,19	0,10	0,16
	50%	0,13	0,14	0,18	0,20	-	0,17
	75%	0,12	0,14	0,20	0,23	-	0,19
ÁRIDO FINO	25%	0,11	0,11	0,18	0,20	0,11	0,16
	50%	0,12	0,12	0,19	0,23	-	0,18
	75%	0,15	0,15	0,21	0,25	-	0,21

Tabla 6.08. Adherencia de las series realizadas de escayola E-35 con cargas de residuo cerámico.

Analizando los resultados se observa que únicamente se mejoran los valores de adherencia cuando se incorpora chamota tipo C y D, destacando favorablemente el ladrillo perforado, el cual aumenta dicha cualidad hasta en un 56%.

Con vista a ser empleado como revestimiento de paramentos interiores cerámicos, este valor es muy favorable para nuestro trabajo de investigación.

6.1.3 Elección del residuo cerámico que presenta mejor comportamiento

Dado que el objetivo de la presente tesis doctoral se centra en hallar un material en base de escayola con el fin de que pueda ser empleado como revestimiento de paramentos interiores en el sector de la edificación, se analizan detalladamente los resultados obtenidos anteriormente centrándonos en los valores mínimos que exige la normativa para un material de revestimiento (ver apartado 1.4).

Se han considerado los datos de la tesis doctoral de San Antonio González, A. (2017) donde se realizó una encuesta para ponderar las variables básicas de los compuestos de yeso (densidad, dureza superficial, resistencia mecánica a flexión y resistencia mecánica a compresión) para la aplicación de los revestimientos de yeso sobre soporte rígido. Los resultados muestran que la dureza superficial era

la variable más valorada por los expertos para esta aplicación, siendo la resistencia mecánica la que menos importancia tendría.

Teniendo en cuenta la normativa y opiniones de expertos, se procede a analizar todos resultados obtenidos en la Fase 1 de ensayos, vemos como la Chamota D, residuo cerámico procedente del ladrillo perforado, presenta los mejores valores en cuanto a dureza superficial, adherencia, absorción de agua por capilaridad y resistencia (ver Tabla 6.09).

CHAMOTA D: RESIDUO CERÁMICO PROCEDENTE DEL LADRILLO PERFORADO DE OBRA NUEVA

	A/E	Tiempo de fraguado (min)	Densidad (g/cm ²)	Dureza (Ud. Shore C)	R. Flexión (Mpa)	R. Compresión (Mpa)	Capilaridad (mm)	Adherencia (N/mm ²)
REF	0,70	12,00	1,09	88,00	5,97	16,35	5,97	0,16
25 - G	0,60	6,00	1,26	94,55	7,71	21,56	4,43	0,19
50 - G	0,70	6,00	1,26	92,00	5,17	13,79	4,43	0,20
75 - G	0,80	5,00	1,28	93,53	5,43	15,71	4,53	0,23
25 - F	0,70	5,00	1,18	89,63	6,21	18,19	4,10	0,20
50 - F	0,82	5,00	1,20	88,42	4,98	14,22	4,93	0,23
75 - F	0,90	4,00	1,22	87,72	4,77	12,79	4,90	0,25

Tabla 6.09. Resultados de la Escayola E-35 con adiciones de Residuo Cerámico procedente del Ladrillo Perforado de obra nueva.

A continuación se muestran los resultados en porcentaje (%) respecto a los valores de referencia de los distintos compuestos elaborados con el residuo cerámico procedente de ladrillo perforado. En el eje X se han definido las distintas propiedades analizadas durante la Fase 1 de caracterización de materiales, mientras que en el eje Y se muestran los valores en porcentaje respecto a los valores de referencia, los cuales se han tomado como el 0,00%. Una vez definidos los ejes, se ha representado cada muestra a través de una serie.

Figura 6.2. Resultados en porcentaje respecto a los valores de referencia de la Escayola E-35 con adiciones de Residuo Cerámico procedente del Ladrillo Perforado de obra nueva.

Analizando los resultados se observa como en general los compuestos con árido fino presentan mayor relación A/E que los compuestos de árido grueso. Los tiempos de fraguado disminuyen dentro del mismo rango en todos los casos, así como la densidad aumenta ligeramente debido a las diferentes cargas de residuo cerámico. La dureza superficial en todos los casos tiende a subir, teniendo en cuenta que los valores de referencia ya ofrecían unos valores bastante elevados, así como las resistencias mecánicas presentan mejores resultados los compuestos de árido fino que los de árido grueso. Por lo general todas las muestras ensayadas disminuyen considerablemente la absorción de agua por capilaridad, así como mejoran la adherencia sobre un soporte cerámico.

6.2 Fase 2: Compuestos seleccionados

Una vez elegido el residuo cerámico procedente del ladrillo perforado de obra nueva con el que continuar el trabajo de investigación, se procede a iniciar la Fase 2 de ensayos caracterizando química y mineralógicamente dicho residuo. Posteriormente se definirá cuáles son las áreas de mejora del material resultante con el fin de que sea válido para ser aplicado como revestimiento y se efectuarán todos los ensayos necesarios con el fin de confirmar que optimizamos la mezcla (Objetivo 4 y 5).

6.2.1 Caracterización química y mineralógica del residuo cerámico seleccionado

En primer lugar se caracteriza químicamente la Chamota D a través de la Espectrometría de Fluorescencia de Rayos X (FRX). En la Tabla 6.10 se muestra la composición química en porcentajes sobre el total de la cantidad de muestra de los distintos óxidos que componen el residuo cerámico.

Se observa que el residuo está compuesto principalmente por óxidos de Silicio y Aluminio en más del 75% de su composición, propio de un material cerámico.

OXIDOS	%
SiO ₂	57,21
Al ₂ O ₃	18,60
CaO	5,38
Fe ₂ O ₃	4,97
CO ₂	3,60
K ₂ O	3,45
MgO	3,31
SO ₃	1,32
Na ₂ O	1,09
TiO ₂	0,77
P ₂ O ₅	0,16
MO	0,07
SrO	0,03
CuO	0,02
ZnO	0,02
TOTAL	100,00

Tabla 6.10. Porcentajes de los distintos óxidos que se componen el residuo cerámico procedente de ladrillo perforado.

Pese a que ya se conoce la existencia de aluminosilicatos en el residuo cerámico, es muy importante identificar la forma mineral en que se encuentran los elementos químicos que compone este material. Con tal fin, se emplea la técnica de difracción de rayos X (DRX). (Ver Figura 6.3)

Figura 6.3. Difractograma del residuo cerámico procedente de ladrillo perforado.

Los resultados obtenidos por DRX han confirmado el elevado contenido de fase amorfa de este residuo cerámico por el halo existente a partir de $2\theta = 20^\circ$. Las principales fases cristalinas identificadas en la muestra de residuo Chamota D son: (Q) Cuarzo (SiO_2), (M) Muscovita ($\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$), Hematite (Fe_2O_3), Calcita (CaCO_3), (G) Yeso ($\text{Ca}(\text{SO}_4)(\text{H}_2\text{O})_2$) y un Silicoaluminato Sódico Hidratado ($\text{Na}_2\text{Al}_2\text{Si}_x\text{O}_z \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Esta composición es similar a la descrita por otros autores en residuos de naturaleza cerámica (Reig et al., 2013; Ruiz-Santa et al., 2013).

Una vez conocidas las fases mineralógicas que constituyen cada uno de los aluminosilicatos empleados, se procedió a la caracterización de los mismos desde

un punto de vista microestructural por medio de espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR). Esta técnica no sólo posibilita el estudio de los tipos de enlaces que componen este material, sino que además, permite apreciar, con gran nitidez, los cambios estructurales que ocurren como consecuencia de los tratamientos térmicos a los que se sometan. Para ello, se calcinó el residuo cerámico (Cc) a 1000°C con el fin de confirmar el estudio del material (ver Figura 6.4)

Figura 6.4. Espectroscopia infrarroja FTIR del residuo cerámico procedente de ladrillo perforado en condiciones normales (C) y calcinado a 1000°C (Cc).

En los espectros de IR de estos residuos cerámicos se puede apreciar como ambas muestras, una en condiciones normales (C) y otra calcinada a 1000°C (Cc), en torno a 1120 cm⁻¹ y 1000 cm⁻¹, aparece un conjunto de bandas cuyo rango de frecuencias es característico de la vibración de los enlaces T-O y T- O-T (T = Si, Al). Más concretamente, la bandandida a mayor frecuencia (~ 1100 cm⁻¹) se asocia con la vibración de tensión de los enlaces T-O presenta en cada una de las fases silicoaluminosas que componen estos materiales. Además la banda a 780cm⁻¹ se corresponde con las vibraciones ν_1 (Si-O-Si) del Cuarzo presente en el residuo y la banda en el torno a 584.5 cm⁻¹, tiene su origen en la vibración de los enlaces Al-O de los aluminosilicatos. La presencia de sulfatos también se

confirma por las vibraciones en la región de $1120-1160\text{ cm}^{-1}$. Los resultados obtenidos por FTIR confirman los descritos por DRX.

6.2.2 Mejoras a aplicar

Dado que la escayola con adiciones de residuo cerámico se quiere emplear como revestimiento continuo de paramentos interiores, se debe alcanzar los requisitos mínimos exigidos por la normativa. Por ello el tiempo de inicio de fraguado para el yeso cuando se aplica manualmente debe ser superior o igual a 20 minutos.

Actualmente, en los compuestos de E-35 con adiciones de residuo cerámico de ladrillo perforado, los valores de tiempo de inicio de fraguado están entre 4 y 6 minutos, por lo que se decide incorporar en dichos compuestos unos aditivos a modo de retardadores de fraguado.

Se van a llevar a cabo dos vías de trabajo con el fin de tratar de encontrar solución a este inconveniente:

- A) Por un lado, se va utilizar un retardador de fraguado especial para el yeso denominado PLAST RETARD© (PL), el cual se caracteriza porque alarga el inicio del endurecimiento, obtiene buenos resultados con dosificaciones bajas (la ficha técnica del producto recomienda entre 0 y 0,08 % sobre el peso del yeso), es un producto biodegradable, es compatible con otros aditivos, no afecta a la resistencia del material y no alimenta la aparición de moho.
- B) Por otro lado, se va a emplear la Cal Hidráulica (CAL) como retardador natural de fraguado.

6.2.3 Caracterización de los nuevos materiales

En este apartado se van a analizar y caracterizar los compuestos elaborados con Escayola E-35, incluyendo los distintos porcentajes de adición de residuo cerámico procedente de ladrillo perforado (Chamota D) y por un lado se incorporará el aditivo Plast Retard © (PLR) como retardador de fraguado; y por otro lado se incluirá adiciones de Cal Hidráulica (CAL) como aditivo natural.

Se repetirán todos los ensayos elaborados en la Fase 1 y con el fin de analizar más en profundidad el inicio de fraguado se analizará también el Principio de

fraguado con el Cono de Vicat. Además, dado que el material va a ser empleado como revestimiento, analizaremos su módulo de elasticidad a través del Módulo de Young.

La nomenclatura para las nuevas muestras a ensayar se definen en la Tabla 6.11.

Códigos	Material de la matriz	Cantidad de Aditivo (%)	Tipo de árido	Tipo de Chamota	Tipo de Aditivo
E	Escayola E-35	-	-	-	-
E + 25G_PL		25%	Árido Grueso	D	Plast Retard©
E + 50G_PL		50%			
E + 75G_PL		75%			
E + 25F_PL		25%	Árido Fino		
E + 50F_PL		50%			
E + 75F_PL		75%			
E + 25G_CAL		25%	Árido Grueso		Cal Hidráulica
E + 50G_CAL		50%			
E + 75G_CAL		75%			
E + 25F_CAL		25%	Árido Fino		
E + 50F_CAL		50%			
E + 75F_CAL		75%			

Tabla 6.11. Definición de los tipos de probetas a elaborar con escayola E-35 en la Fase 2.

6.2.3.1 Resultados de los compuestos de Escayola E-35 con Chamota tipo D y adiciones de Plastificante Plast Retard©

- Determinación de la relación agua / escayola: Ensayo de Mesa de sacudida

En primer lugar hubo que hacer varios tanteos con el fin de determinar cuál era el porcentaje óptimo de aditivo para que las mezclas cumplieran los valores establecidos por normativa para el ensayo de la Mesa de Sacudidas. Finalmente se determina que con un 0,01% de aditivo sobre la masa de yeso, es suficiente para mantener un diámetro de escurrimiento comprendido entre los 165 ± 5 mm y obtener un inicio de fraguado superior a 20 minutos.

Los valores medios que se obtienen en el ensayo de consistencia de las pastas mediante la Mesa de Sacudidas son los que se reflejan en la Figura 6.5.

Figura 6.5. Relación A/E de las series realizadas de escayola E-35 con cargas de Chamota D y un 0,01% de Aditivo PL.

Analizando los resultados se observa que incluyendo en la composición de la mezcla un 0,01% del aditivo PL en ningún caso superamos la relación A/E de los valores de referencia, consiguiendo disminuir dichos valores cuando las sustituciones de materia prima por residuo cerámico son del 25 y 50 % sobre el peso de escayola.

En todo caso, cuando alcanzamos la sustitución máxima del 75%, mantenemos la relación A/E de 0,70 igual que el valor de referencia.

- Determinación del tiempo de inicio de fraguado: Cono de Vicat

En esta ocasión, con el fin de estudiar más a fondo del tiempo de inicio de fraguado ya que en la Fase 1 de ensayos vimos que era un punto de mejora dentro de nuestro trabajo investigador, se empleó el Cono de Vicat para determinar los

tiempos de inicio de fraguado con mayor exactitud. A continuación se muestran los valores medios obtenidos de cada muestra en la Figura 6.6.

Figura 6.6. Tiempo de inicio de fraguado de las series realizadas de escayola E-35 con cargas de Chamota D y un 0,01% de Aditivo PL.

Una vez analizado los resultados se puede observar que se añadiendo una cantidad insignificante del aditivo Plast Retard® han mejorado considerablemente los valores de referencia, estando todas las muestras por encima de los valores mínimos establecidos por normativa para que el revestimiento sea aplicado de forma manual (>20 minutos).

Analizando los casos más desfavorables, que son los que contienen un 75% de residuo cerámico en su composición tanto en árido grueso como con árido fino, vemos como se alcanzan hasta 27 y 25 minutos para el inicio de fraguado respectivamente.

– Determinación de la Densidad Seca

A continuación se muestran en la Figura 6.7. las densidades secas de las nuevas probetas elaboradas.

Figura 6.7. Densidad Seca de las series realizadas de escayola E-35 con cargas de Chamota D y un 0,01% de Aditivo PL.

Analizando los resultados se observa que la densidad aumenta hasta un 17% dichos valores, resultados que se repiten igual que en la Fase 1 de ensayos, motivado por la aparición de un material con mayor masa como es el residuo cerámico ya que en un 75% su composición son óxidos de silicio y de aluminio.

– Determinación de la Dureza superficial

A continuación se muestra en la Figura 6.8. los resultados medios obtenidos en cuanto a la Dureza Superficial se refiere.

Figura 6.8. Dureza Superficial de las series realizadas de escayola E-35 con cargas de Chamota D y un 0,01% de Aditivo PL.

Se puede observar que esta propiedad la mejoran considerablemente todas las muestras, destacando aquellas que contienen el residuo en granulometría fina, alcanzando hasta un 8% de mayor dureza respecto al valor de referencia.

– Comportamiento mecánico a flexión y compresión

A continuación se muestran las resistencias medias obtenidas tanto a flexión como a compresión de las distintas muestras, representándolas en la Figura 6.9.

Figura 6.9. Resistencia a Flexión y Compresión de las series realizadas de escayola E-35 con cargas de Chamota D y un 0,01% de Aditivo PL.

Analizando conjuntamente ambas resistencias de los distintos compuestos se observa como a la flexión todos mejoran ligeramente los valores de referencia (en torno a un 18%).

Respecto a la resistencia a compresión se observa como presenta mejor comportamiento las muestras que incorporan granulometría fina, llegando a incrementar dichos valores hasta un 29%. Aunque hay que destacar que los compuestos elaborados con la granulometría gruesa presentan resultados muy próximos a los valores de referencia.

– Absorción de agua por capilaridad

Los resultados medios obtenidos de la absorción de agua por capilaridad se presentan en la Figura 6.10.

Figura 6.10. Absorción de agua por capilaridad de las series realizadas de escayola E-35 con cargas de Chamota D y un 0,01% de Aditivo PL.

Como era de esperar, igual que en la fase 1 de ensayos del plan experimental, se observa como todas las muestras mejoran hasta un 27% respecto a los valores de referencia, mejora motivada por la presencia de material cerámico en su composición.

– Módulo de Young a Compresión

A continuación se pueden observar en la figura 6.11. los resultados medios obtenidos en cuanto al Módulo de Elasticidad de las muestras ensayadas.

Figura 6.11. Adherencia sobre bovedilla de hormigón de las series realizadas de escayola E-35 con cargas de Chamota D y un 0,01% de Aditivo PL.

Analizando los resultados se confirma que con las distintas adiciones de residuo cerámico en la matriz de escayola se mejora hasta un 58% el módulo de elasticidad, propiedad importante de cara a que dichos materiales puedan ser empleados como revestimientos de paramentos interiores.

6.2.3.2 Resultados: Escayola E-35 con Chamota tipo D y adiciones de Cal Hidráulica

- Determinación de la relación agua / escayola: Ensayo de Mesa de sacudida

En primer lugar hubo que hacer varios tanteos con el fin de determinar cuál era el porcentaje óptimo de cal para que las mezclas cumplieran los valores establecidos por normativa para el ensayo de la Mesa de Sacudidas. Finalmente se determina que con un 60% de cal sobre la masa de yeso se consigue mantener un diámetro de expansión exigido por normativa, comprendido entre los 165 ± 5 mm y obtener un inicio de fraguado superior a los valores obtenidos en la Fase 1.

Los valores que se obtienen en el ensayo de consistencia de las pastas mediante la Mesa de Sacudidas son los que se reflejan en la Figura 6.12.

Figura 6.12. Relación A/E de las series realizadas de escayola E-35 con cargas de Chamota D y un 60% de cal.

Analizando los datos se observa que todas las muestras superan los valores de referencia, incrementando directamente proporcional al porcentaje de residuo añadido sin hacer distinción entre árido grueso o fino. Este aumento de agua en la fabricación de las muestras nos harán disminuir resistencias.

- Determinación del tiempo de inicio de fraguado: Cono de Vicat

Los resultados medios obtenidos en los tiempos de inicio de fraguado a través del ensayo del Cono de Vicat se muestran en la Figura 6.13.

Figura 6.13. Tiempo de inicio de fraguado de las series realizadas de escayola E-35 con cargas de Chamota D y un 60% de cal.

Analizando los datos se observa que incluyendo un 60% de cal como aditivo retardador de fraguado, no se consiguen mejores resultados que los valores de referencia, aunque sí se duplican los valores obtenidos en la Fase 1 de ensayos. Al incluir en cantidades tan abultadas cal hidráulica, aunque en la presente línea de trabajo su función era como aditivo retardador de fraguado, en realidad lo que estamos incrementando es un material que habitualmente se utiliza como material conglomerado.

– Determinación de la Densidad Seca

Los resultados de la densidad seca de las probetas elaboradas en esta fase de ensayos se muestran en la Figura 6.14.

Figura 6.14. Densidad Seca de las series realizadas de escayola E-35 con cargas de Chamota D y un 60% de cal.

En esta ocasión los resultados obtenidos aumentan en un 25% aproximadamente la densidad de los compuestos resultantes, justificado por la presencia de material cerámico con su composición y de cal hidráulica.

– Determinación de la Dureza superficial

A continuación se muestran en la Figura 6.15. los valores de dureza superficial obtenidos.

Figura 6.15. Dureza Superficial de las series realizadas de escayola E-35 con cargas de Chamota D y un 60% de cal.

Como se puede observar, una vez más se mejoran los valores de referencia con la presencia de residuo cerámico en la composición de las muestras en un 5% aproximadamente, siendo en esta ocasión los compuestos que contienen árido grueso los que presentan mejor comportamiento.

– Comportamiento mecánico a flexión y compresión

A continuación se muestran las resistencias medias obtenidas tanto a flexión como a compresión de las distintas muestras, representándolas en la Figura 6.16.

Figura 6.16. Resistencia a Flexión y Compresión de las series realizadas de escayola E-35 con cargas de Chamota D y un 60% de cal.

De los resultados obtenidos en las resistencias a flexión, se observa como los valores descienden ligeramente respecto a los valores de referencia a medida que aumenta el porcentaje de residuo añadido, manteniéndose siempre por encima de la resistencia mínima establecida por la normativa para materiales de revestimiento en base yeso ($>2\text{N/mm}^2$).

En cuanto a los valores de resistencia a compresión, se observa como los compuestos que incorporan granulometría gruesa presenta valores por debajo de los valores de referencia en un 20% aproximadamente. Por el contrario, las muestras que incorporan granulometría fina mejoran hasta un 28% aproximadamente dichas resistencias, motivado seguramente por la presencia de menos poros al tener los granos más pequeños.

– Absorción de agua por capilaridad

Los valores medios obtenidos de la absorción de agua por capilaridad se presentan en la Figura 6.17.

Figura 6.17. Absorción de agua por capilaridad de las series realizadas de escayola E-35 con cargas de Chamota D y un 60% de cal.

Una vez más se comprueba que con la presencia de residuo cerámico en la composición de las muestras se consigue mejorar los valores de absorción, proporcionando así al material resultante un valor positivo de cara a ser aplicado como revestimiento.

– Módulo de Young a Compresión

Los valores del módulo de elasticidad se muestran en la Figura 6.18.

Figura 6.18. Adherencia sobre bovedilla de hormigón de las series realizadas de escayola E-35 con cargas de Chamota D y un 60% de cal.

Analizando los resultados, se confirma que con las distintas adiciones de residuo cerámico en la matriz de escayola se mejora hasta un 58% su módulo de elasticidad, indistintamente si se utiliza un plastificante químico o natural. Como ya se ha comentado anteriormente, esta propiedad es importante de cara a que dichos materiales puedan ser utilizados como revestimientos de paramentos interiores y adaptarse así al movimiento de sus soportes.

6.2.4 Elección de los compuestos que presentan mejor comportamiento

Teniendo presente el fin principal de este estudio de investigación, así como las exigencias mínimas para un revestimiento en base de yeso, se decide desechar todas las muestras elaboradas con cal hidráulica como aditivo natural. Para alcanzar unos valores mínimos en el ensayo de la Mesa de Sacudidas se tuvo que alcanzar un 60% de cal en la composición final de las muestras. Continuando la investigación con ese dato de partida se ha ido observando como el tiempo de inicio de fraguado empeoraba considerablemente con las adiciones de residuos cerámicos y cal, así como ofrecía menores resistencias mecánicas. Dado que la base de nuestra investigación es encontrar un revestimiento en base de yeso, y

hemos alcanzado un 60% de cal, perderíamos la esencia del trabajo si optáramos por esta vía de trabajo.

Por consiguiente, y motivado por los buenos resultados obtenidos, finalmente se acepta como material seleccionado los compuestos elaborados en base de E-35 con residuo cerámico procedente de ladrillo perforado y una adición del 0,01% del aditivo retardante de fraguado Past Retard©. En el análisis detallado que se ha realizado en el apartado 6.2.3. en todo momento siempre destacaba por mejorar los valores de referencia, incluida la dureza superficial, absorción de agua por capilaridad, resistencias mecánicas y módulo de Young.

A continuación se muestran los resultados en porcentaje (%) respecto a los valores de referencia de los compuestos E+75G_PL y E+75F_PL. En el eje X se han definido las distintas propiedades analizadas durante la Fase 2 de caracterización de materiales, mientras que en el eje Y se muestran los valores en % respecto a los valores de referencia, los cuales se han tomado como el 0,00%. Una vez definidos los ejes, se ha representado cada muestra a través de distintas serie (ver Figura 6.19).

Figura 6.19. Resultado en % sobre los valores de referencia de las series realizadas de escayola E-35 con cargas de Chamota D y un 0,01% de Aditivo PL.

Analizando los resultados se observa que los compuestos que llevan cargas del 25 y 50% requieren menos cantidad de agua para sus dosificaciones cumpliendo la Mesa de Sacudidas, así como los compuestos que incorporan un 75% alcanzan los valores de la referencia, sin superarlo en ninguno de los casos. Los resultados de las densidades se repiten debido a las condiciones del material cerámico. Los tiempos de fraguado aumentan considerablemente a los valores de referencia estando siempre por encima de los 20 minutos exigidos por normativa y la dureza superficial mejora igualmente en todos los compuestos en torno a un 10%. En cuanto a las resistencias mecánicas se observa que mejoran en todos los casos las resistencias a flexión, y en cuanto a las compresiones, los compuestos de mayor porcentaje de árido grueso disminuyen un poco sus resistencias debido a la mayor presencia de poros y coqueras, pero el resto de compuestos ofrecen mayores resistencias, destacando considerablemente los de árido fino. En cuanto

a la elasticidad se presentan los mismos valores todas las muestras, consiguiendo mejorarlas en un 57% aproximadamente y se mantienen los buenos resultados de la absorción de agua por capilaridad disminuyendo un 30% aproximadamente respecto a los valores de referencia.

Con el fin de simplificar a un único material, se va a seleccionar los compuestos que incorporan un 75% de sustitución de materia prima por residuo cerámico, tanto con granulometría gruesa como fina. El motivo por el cual se escoge el mayor porcentaje es por dar salida a la mayor cantidad de residuo cerámico ya que los resultados nos lo permiten, estando siempre por encima de los valores de referencia. A continuación se muestra en la Figura 6.20 los resultados en porcentaje respecto a los valores de referencia de las muestras “E+75G_PL” y “E+75F_PL”.

Figura 6.20. Resultado en % sobre los valores de referencia de las series realizadas de escayola E-35 con cargas de 75% de Chamota D y un 0,01% de Aditivo PL.

Analizando los resultados se observa que en general ambos materiales ofrecen unos valores óptimos para ser empleados como revestimiento de paramentos

interiores, mejorando los valores que ofrece la escayola sin ningún tipo de aditivo. Por destacar uno de ellos, sería el que contiene un 75% de árido fino, el cual ofrece mejores resultados de dureza superficial, resistencia a compresión y absorción de agua por capilaridad. Por hacer mención al tiempo de fraguado (ya que ha sido un valor objeto de estudio con detalle), en esta ocasión, el árido grueso presenta mejores resultados (recordamos que el inicio de fraguado estaba en los 27 minutos), pero el árido fino ofrece 25 minutos, valores suficientes para su aplicación final.

6.3 Fase 3: Comportamiento del compuesto como revestimiento de paramentos interiores

En esta Fase 3 del plan experimental se va analizar en profundidad el compuesto seleccionado, el conformado por Escayola E-35 con 75% de árido grueso y 75% de árido fino de residuo procedente de ladrillo perforado, incorporando en su composición un 0,01% de aditivo retardador de fraguado Plast Retard© (“E+75G_PL” y “E+75F_PL”) (Objetivo 6).

Para ello se han caracterizado químicamente los compuestos a través de Difracción de Rayos X, se ha analizado estructuralmente a través de la microscopía electrónica de barrido. Además se ha analizado más en profundidad la viabilidad de utilizar dichos materiales como revestimiento a través de los siguientes ensayos específicos: análisis de la adherencia sobre diferentes soportes, la dureza superficial mediante el ensayo de impacto por caída de bola de acero, el comportamiento a ciclos de agua y estufa, la capacidad de absorción de la humedad, así como la determinación de la resistencia a la heladicidad.

6.4.1 Caracterización del compuesto seleccionado

6.4.1.1 Difracción por Rayos X

En primer lugar se caracterizó mineralógicamente el compuesto E+75G_PL. Se pueden observar los resultados en la Figura 6.21 y en la Tabla 6.12.

Figura 6.21. Difractograma del compuesto E+75G_PL

E+75G_PL	% FASES CRISTALINAS
CUARZO (Q)	8
FELDESPATO K	8
PLAGIOCLASA	10
FILOSILICATOS	12
CALCITA (C)	2
YESO (G)	54
BASSANITA	3
ANHIDRITA	3
TOTAL:	100

Tabla 6.12. Porcentajes de fases cristalinas en el compuesto E+75G_PL

Analizando los resultados se encuentra la presencia de yeso como era de esperar debido a la base de la matriz, silicatos y cuarzo propios de los materiales cerámicos.

En segundo lugar se caracterizó químicamente el compuesto E+75F_PL. Se pueden observar los resultados en la Figura 6.22 y en la Tabla 6.13.

Figura 6.22. Difractograma del compuesto E+75G_PL

E35 F	% FASES CRISTALINAS
CUARZO (Q)	14
FELDESPATO K	9
PLAGIOCLASA	9
FILOSILICATOS	10
CALCITA (C)	5
YESO (G)	46
BASSANITA	2
ANHIDRITA	5
TOTAL:	100

Tabla 6.13. Porcentajes de fases cristalinas en el compuesto E+75G_PL

Del mismo modo se encuentra la presencia de yeso, silicatos y cuarzo propios de los materiales cerámicos. En definitiva, ambos compuestos ofrecen la mineralogía esperada, sin detectar la presencia de ningún compuesto anómalo.

6.4.1.2 Microscopía electrónica de barrido (SEM)

Se hace un estudio de la macroestructura interna de los compuestos seleccionados E+75G_PL y E+75F_PL a través de microscopía electrónica de barrido para la Fase 3 del trabajo experimental. Para ello se analiza cada serie de imagen SEM con electrones secundarios (SE) y electrones retrodispersados (BSE) que aportan información morfológica en el primer caso y composicional en el segundo.

- Resultados obtenidos con la muestra que contiene 75% de árido grueso (E+75G_PL):

En la Figura 6.23 se observa la muestra analizada del compuesto elaborado con árido grueso.

Figura 6.23. Muestra del compuesto E+75% G_PL

En la Figura 6.24 a la izquierda se muestra la muestra en SE y a la derecha en BSE. En ambos casos se observa como la mezcla no ofrece ninguna discontinuidad ya que se ha integrado perfectamente la escayola con el residuo cerámico.

Figura 6.24. Imagen SEM en SE (izq.) y BSE (drch.) respectivamente del compuesto E+75% G_PL a 50x.

Ampliando el zoom de la muestra a 250x (ver Figura 6.25) es posible identificar los cristales propios del yeso, así como la presencia de pequeñas porosidades. En la imagen de la derecha (BSE) se puede distinguir diferentes tonalidades las cuales corresponden a cada tipo de material: yeso y arcilla.

Figura 6.25. Imagen SEM en SE (izq.) y BSE (drch.) respectivamente del compuesto E+75% G_PL a 250x.

Continuando con la ampliación del zoom hasta 1000x (ver Figura 6.26) es donde se puede apreciar perfectamente cómo los fragmentos de yeso tapizan el árido del residuo cerámico. Con el fin de confirmar los materiales, se extraen los siguientes espectros:

- Spectrum 1 (ver Figura 6.27) el cual corresponde a un grano del material cerámico donde aparecen principalmente sus componentes de Silicio (Si), Aluminio (Al) e hierro (Fe).
- Spectrum 2 (ver Figura 6.28) el cual coincide con la estructura cristalina propia de la hidratación del yeso, predominando el Calcio (Ca) y el Azufre (S).

Figura 6.26. Imagen SE (izq.) y BSE (drch.) respectivamente del compuesto E+75% G_PL a 1000x.

Figura 6.27. Spectrum 1: Composición química del material cerámico presente en la muestra del compuesto E+75% G_PL.

Figura 6.28. Spectrum 2: Composición química de la escayola presente en la muestra del compuesto E+75% G_PL.

Por último se muestra una imagen con un zoom 2000x (ver Figura 6.29) donde se puede apreciar la perfecta unión entre ambos materiales.

Figura 6.29. Imagen SEM en SE del compuesto E+75% G_PL a 2000x.

- Resultados obtenidos con la muestra elaborada con 75% de árido fino (E+75F_PL):

En la Figura 6.30 se observa la muestra analizada del compuesto elaborado con árido fino.

Figura 6.30. Muestra del compuesto E+75% F_PL

En la Figura 6.31 a la izquierda se muestra la muestra en SE y a la derecha en BSE. Al igual que en el apartado anterior, en ambos casos se observa como la mezcla no ofrece ninguna discontinuidad ya que se ha integrado perfectamente la escayola con el residuo cerámico.

Figura 6.31. Imagen SEM en SE (izq.) y BSE (drch.) respectivamente del compuesto E+75F_PL a 50x.

Ampliando el zoom a 250x (ver Figura 6.32) se identifican ya los cristales propios del yeso. En la imagen de la derecha (BSE) se puede distinguir diferentes tonalidades las cuales corresponden al yeso y a la arcilla. Con el fin de identificarlos se han obtenido los siguientes espectros:

- Spectrum 2 (ver Figura 6.33) el cual coincide con la estructura cristalina propia de la hidratación del yeso, predominando el Calcio (Ca) y el Azufre (S).
- Spectrum 3 (ver Figura 6.34) el cual corresponde a un grano del material cerámico donde aparecen principalmente sus componentes de Silicio (Si), Aluminio (Al) e hierro (Fe).

Figura 6.32. Imagen SEM en SE (izq.) y BSE (drch.) respectivamente del compuesto E+75F_PL a 250x.

Figura 6.33. Spectrum 2: Composición química de la escayola presente en la muestra del compuesto E+75F_PL.

Figura 6.34. Spectrum 3: Composición química del material cerámico presente en la muestra del compuesto E+75F_PL.

Continuando con la ampliación del zoom hasta 1000x (ver Figura 6.35) es donde se puede apreciar perfectamente cómo los fragmentos de yeso se integran con el árido del residuo cerámico.

Figura 6.35. Imagen SEM en SE (izq.) y BSE (drch.) respectivamente del compuesto E+75F_PL a 1000x.

Por último se muestra una imagen con un zoom 2000x (ver Figura 6.36) donde se puede apreciar la perfecta unión entre ambos materiales.

Figura 6.36. Imagen SEM en SE del compuesto E+75F_PL a 2000x.

Como conclusión del análisis SEM se puede destacar que la escayola con el residuo cerámico son materiales que se combinan perfectamente, apareciendo mayor porosidad en los compuestos que incluyen árido grueso en su composición. Este hecho lo que repercute es en las resistencias mecánicas, efecto que hemos podido comprobar ya que los compuestos con árido grueso ofrecen ligeramente menores resistencias que los compuestos con árido fino.

6.4.1.3 Adherencia sobre varios soportes

En primer lugar se realiza el ensayo de adherencia sobre una rasilla cerámica (ver Figuras 6.37). Los resultados se muestran en la Tabla 6.14.

Figura 6.37. Ensayo de adherencia sobre soporte cerámico E+75G_PL y E+75F_PL

MUESTRA	TIPO DE ROTURA	R_u (N/mm ²)	Δ ADHERENCIA (%)
REF	TIPO A	0,37	0
E35+75G_PL	TIPO B	0,45	21,62%
E35+75F_PL	TIPO B	0,51	37,84%

Tabla 6.14. Resultados del ensayo de adherencia sobre soporte cerámico.

Analizando los resultados obtenidos se observa como los compuestos que incorporan residuo cerámico como aditivo con granulometría gruesa y fina mejoran en un 21% y 37% respectivamente los valores de referencia.

Por otro lado se realiza el mismo ensayo de adherencia sobre una bovedilla de hormigón (ver Figuras 6.38). Los resultados se muestran en la Tabla 6.15.

Figura 6.38. Ensayo de adherencia sobre soporte de hormigón E+75G_PL y E+75F_PL

Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 6.15:

MUESTRA	TIPO DE ROTURA	R_u (N/mm ²)	Δ ADHERENCIA (%)
REF	TIPO A	0,53	0
E35+75G_PL	TIPO B	0,59	11,32%
E35+75F_PL	TIPO B	0,61	15,09%

Tabla 6.15. Resultados del ensayo de adherencia sobre soporte de bovedilla de hormigón.

Los resultados obtenidos se muestran como los compuestos que incorporan residuo cerámico como aditivo con granulometría gruesa y fina mejoran en un 11% y 15% respectivamente los valores de referencia.

Todas las roturas de los compuestos que contienen RC cerámico son de tipo B, es decir, por cohesión en el yeso. Por lo tanto, los valores de resistencia de adherencia son superiores a los indicados por el dispositivo.

La resistencia a la adherencia sobre soporte de bovedilla de hormigón es mayor que en el soporte cerámico debido a que la superficie porosa de la bovedilla hace que los compuestos se adhieran mejor.

6.4.1.4 Ensayo de impacto por caída de bola de acero

Se ejecutan varios revestimientos sobre soportes cerámicos y bovedillas de hormigón con un espesor de 10 milímetros aproximadamente con Escayola E-35 sin ningún tipo de adición (REF), y de los compuestos E+75G_PL y E+75F_PL (ver Figura 6.39).

Con el fin de estudiar más en profundidad la dureza superficial se llevó a cabo el ensayo de impacto por caída de una bola de acero sobre cada una de las muestras.

Figura 6.39. Ensayo de impacto por caída de bola de acero en REF, E+75G_PL y E+75F_PL

Los resultados obtenidos se muestran en la figura 6.40, donde a simple vista se puede apreciar como el diámetro de profundidad de la huella dejada por la bola de acero es mayor en la muestra de referencia que en las muestras que incorporan residuo cerámico en su composición.

Figura 6.40. Ensayo de impacto por caída de bola de acero en REF, E+75G_PL y E+75F_PL

Los datos que se obtienen se muestran en la Tabla 6.16

TIPO DE SOPORTE	MUESTRAS	DUREZA SHORE C	DIÁMETRO DE HUELLA (mm)	PROFUNDIDAD DE HUELLA (mm)
CERÁMICO	REF	93,00	10,38	0,65
	E+75G_PL	96	6,75	0,24
	E+75F_PL	99	5,81	0,18
HORMIGÓN	REF	85	11,69	0,73
	E+75G_PL	88	8,38	0,37
	E+75F_PL	91	7,24	0,28

Tabla 6.16. Resultados de impacto por caída de bola de acero en REF, E+75G_PL y E+75F_PL

Dado que la bola de acero rebota al impactar sobre la superficie de los revestimientos, la fuerza de impacto es mayor que la de cálculo. El diámetro de la huella de los compuestos que incorporan residuo cerámico es menor en todos los casos que los valores de referencia. Los resultados obtenidos sobre soporte

cerámico y de hormigón son similares, destacando positivamente las muestras que incorporan árido fino, ya que es más fácil de esparcirlo sobre el soporte a revestir y presenta menores poros durante su amasado.

Posteriormente a este ensayo no normalizado, se realiza un enlucido con yeso fino sobre las muestras que incorporan residuo en su composición. Se observa que en cualquiera de los soportes el enlucido se trabaja y se adhiere fácilmente debido a la pequeña rugosidad de las muestras, cubriendo las tonalidades grisáceas y salmón que presenta las mezclas con árido cerámico. Por último se aplica una capa de pintura sin ningún problema (ver Figura 6.41 y 6.42).

Figura 6.41. Revestimiento E+75G_PL con posterior enlucido y mano de pintura

Figura 6.42. Revestimiento E+75F_PL con posterior enlucido y mano de pintura

De este modo se demuestra la viabilidad de utilizar el material reciclado objeto de estudio como guarnecido de yeso para revestimiento continuo de paramentos interiores, admitiendo sobre dicho material el enlucido y pintura propios de un acabado interior dentro del sector de la edificación.

6.4.1.5 Comportamiento a ciclos de agua y estufa.

Los resultados obtenidos tras un ciclo de agua y estufa son los que se presentan en la Tabla 6.17.

MUESTRAS	DUREZA SUPERFICIAL (UD. SHORE C)	R. FLEXIÓN (MPa)	R. COMPRESIÓN (MPa)
REF	82,67	5,42	12,71
E+75G_PL	91,00	5,27	13,10
E+75F_PL	94,33	5,75	16,89

Tabla 6.17. Resultados obtenidos tras un ciclo de agua-estufa.

A continuación se comparan dichos resultados con los obtenidos en la Fase 2 de ensayos, es decir, con las mismas muestras ensayadas en condiciones normales sin ningún tipo de tratamiento especial tras su fraguado. En la Tabla 6.18 se identifican dichas muestras bajo la denominación de “INICIAL”.

MUESTRAS	DUREZA SUPERFICIAL (Ud. Shore C)		R. FLEXIÓN (MPa)		R. COMPRESIÓN (MPa)	
	INICIAL	TRAS CICLO DE AGUA-ESTUFA	INICIAL	TRAS CICLO DE AGUA-ESTUFA	INICIAL	TRAS CICLO DE AGUA-ESTUFA
REF	88,00	82,67	5,97	5,42	16,35	12,71
E+75G_PL	90,57	91,00	6,05	5,27	15,04	13,10
E+75F_PL	94,90	94,33	5,95	5,75	19,19	16,89

Tabla 6.18. Resultados iniciales y los obtenidos tras un ciclo de agua-estufa.

A continuación se representa cada tipo de ensayo en un gráfico (Figuras 6.43 y 6.45). La Figura 6.43 muestra las diferencias que existen en los resultados de Dureza Superficial.

Figura 6.43. Comparación de la Dureza Superficial entre los resultados iniciales y los obtenidos tras un ciclo de agua-estufa.

Analizando los datos se observa como en el caso de las probetas de referencia afecta más significativamente el ciclo de agua – estufa disminuyendo en un 6% su dureza superficial, mientras que en los compuestos que incorporan residuo cerámico los valores se mantienen prácticamente igual, por lo que mejora considerablemente el comportamiento del material reciclado.

Del mismo modo en la Figura 6.44 se muestra la comparativa de las resistencias a Flexión. En esta ocasión se observa como las resistencias disminuyen aproximadamente un 9%, mostrando mejores resultados la muestra elaborada con árido fino. En todos los casos los valores son superiores a los establecidos por normativa ($>2\text{MPa}$).

Figura 6.44. Comparación de la Resistencia a Flexión entre los resultados iniciales y los obtenidos tras un ciclo de agua-estufa.

En la Figura 6.45 se muestran los resultados de las Resistencias a Compresión y se observa como existe un descenso de resultados proporcional en todos los casos. Los valores de referencia disminuyen en un 22% aproximadamente, mientras que las muestras que incorporan residuo cerámico únicamente reducen su comportamiento mecánico en un 12%.

Figura 6.45. Comparación de la Resistencia a Compresión entre los resultados iniciales y los obtenidos tras un ciclo de agua-estufa.

6.4.1.6 Capacidad de absorción de la humedad.

La humedad continua rebaja la resistencia debido a cambios cristalinos y estructurales (del Río Merino, 1999).

Después de realizar las probetas según normativa, se introducen en la cámara húmeda junto con las probetas de referencia y se anotan los pesos de las mismas cada día. De esta forma se pretende comprobar si el compuesto con los residuos tiene mayor capacidad de absorción a la humedad que la escayola sin aditivos.

Los resultados obtenidos son los de la Tabla 6.19 donde se muestra el incremento de peso de los diferentes compuestos y de la probeta de referencia.

MUESTRAS	P ₀ (g)	P ₁ (g)	P ₂ (g)	P ₃ (g)	P ₄ (g)	P ₅ (g)	ΔP ₅₋₀ (g)
REF	273,03	275,47	276,77	277,20	278,07	273,23	0,20
E+75G_PL	352,33	355,03	355,30	256,90	357,90	352,70	0,37
E+75F_PL	363,77	366,07	367,00	302,50	371,47	364,67	0,90

Tabla 6.19. Pesos diarios de las probetas introducidas en la cámara húmeda.

Una vez que las probetas han perdido el agua adquirida durante el ensayo, se obtiene su dureza superficial y se realizan los ensayos de flexotracción y compresión. Los datos se presentan en la Tabla 6.20.

MUESTRAS	DUREZA SUPERFICIAL (UD. SHORE C)	R. FLEXIÓN (MPa)	R. COMPRESIÓN (MPa)
REF	84,00	5,27	13,52
E+75G_PL	83,00	4,56	12,50
E+75F_PL	93,33	6,06	17,31

Tabla 6.20. Resultados obtenidos tras cinco días en cámara húmeda

Igual que en el apartado anterior, se comparan los resultados obtenidos con el de las probetas fraguadas en condiciones normales identificadas bajo la denominación de “INICIO” (ver Tabla 6.21).

MUESTRAS	DUREZA SUPERFICIAL (UD. SHORE C)		R. FLEXIÓN (MPa)		R. COMPRESIÓN (MPa)	
	INICIAL	TRAS CICLOS DE CÁMARA HÚMEDA	INICIAL	TRAS CICLOS DE CÁMARA HÚMEDA	INICIAL	TRAS CICLOS DE CÁMARA HÚMEDA
REF	88,00	84,00	5,97	5,27	16,35	13,52
E+75G_PL	90,57	83,00	6,05	4,56	15,04	12,50
E+75F_PL	94,90	93,33	5,95	6,06	19,19	17,31

Tabla 6.21. Resultados iniciales y los obtenidos tras cinco días en cámara húmeda.

Comparando en una gráfica los valores de la Dureza Superficial (ver Figura 6.46) se observa como todos los casos tras los ciclos de cámara húmeda disminuyen sus valores de referencia, mostrando los mejores resultados con el compuesto que incorpora el 75% de árido fino de residuo cerámico, el cual disminuye únicamente un 1,5%.

Figura 6.46. Comparación de la Dureza Superficial entre los resultados iniciales y los obtenidos tras cinco días en cámara húmeda.

En la Figura 6.47 se muestran los resultados de la Resistencia a Flexión de las probetas de Referencia y los compuestos E+75G_PL y E+75F_PL.

En esta ocasión disminuyen los valores ligeramente, presentando valores muy próximos a las probetas iniciales que no han sido sometidas a ningún tratamiento posterior a su fraguado. Destaca positivamente la muestra que incorpora el árido fino ya que mantiene su valor de resistencia mecánica prácticamente igual que la probeta inicial.

Figura 6.47. Comparación de la Resistencia a Flexión ente los resultados iniciales y los obtenidos tras cinco días en cámara húmeda.

Por último en la Figura 6.48 se muestra la comparativa de las Resistencias a Compresión, donde vemos que disminuye en todos los casos sobre un 10%, mostrando valores por encima de los límites establecidos por normativa.

Figura 6.48. Comparación de la Resistencia a Compresión entre los resultados iniciales y los obtenidos tras cinco días en cámara húmeda.

6.4.1.7 Determinación de la resistencia a la heladicidad.

Los resultados de la Tabla 6.22 son los pesos obtenidos cada día después de cada ciclo de hielo-deshielo. En primer lugar aparece el peso inicial de las probetas antes de iniciar los cinco ciclos.

Analizando los resultados se observa que las probetas que están elaboradas sólo con escayola E-35 adquieren un mayor peso de agua que las probetas que incorporan residuo cerámico en su interior. Esto implica que los compuestos que incorporan residuo cerámico en su interior presentan un mejor comportamiento ante la absorción y evaporación de agua tras los distintos ciclos de hielo y deshielo.

	P ₀ (g)	P ₁ (g)	P ₂ (g)	P ₃ (g)	P ₄ (g)	P ₅ (g)	ΔP ₅₋₀ (g)
REF	277,57	379,57	378,33	364,93	285,27	286,17	8,60
E+75G_PL	363,77	447,47	446,17	437,00	365,80	365,63	1,86
E+75F_PL	361,87	446,80	446,33	435,37	365,63	365,63	3,77

Tabla 6.22. Pesos diarios de las probetas sometidas a ciclos de hielo – deshielo.

Una vez que las probetas han perdido el agua adquirida durante el ensayo, se obtiene su dureza superficial y se realizan los ensayos de flexotracción y compresión. Los datos se presentan en la Tabla 6.23.

MUESTRAS	DUREZA SUPERFICIAL (UD. SHORE C)	R. FLEXIÓN (MPA)	R. COMPRESIÓN (MPA)
REF	74,00	2,51	6,77
E+75G_PL	85,33	3,33	6,75
E+75F_PL	92,67	3,46	9,84

Tabla 6.23. Resultados obtenidos tras cinco días de hielo – deshielo.

A continuación se presentan los datos obtenidos anteriores junto a los resultados de las probetas elaboradas en la Fase 2 de ensayos identificadas como probetas “INICIALES” (ver Tabla 6.24).

MUESTRAS	DUREZA SUPERFICIAL (UD. SHORE C)		R. FLEXIÓN (MPa)		R. COMPRESIÓN (MPa)	
	INICIAL	TRAS CICLO DE HIELO - DESHIELO	INICIAL	TRAS CICLO DE HIELO - DESHIELO	INICIAL	TRAS CICLO DE HIELO - DESHIELO
REF	88,00	74,00	5,97	2,51	16,35	6,77
E+75G_PL	90,57	85,33	6,05	3,33	15,04	6,75
E+75F_PL	94,90	92,67	5,95	3,46	19,19	9,84

Tabla 6.24. Resultados iniciales y los obtenidos tras cinco días de hielo – deshielo.

Representando gráficamente los resultados de la Dureza Superficial en las distintas muestras en la Figura 6.49, se observa como las probetas sin ningún tipo de adición disminuye más su dureza superficial tras los ciclos de hielo y deshielo que las probetas que sustituyen un 75% de materia prima por residuo cerámico en su composición. Los compuestos que incorpora un 75 % de árido grueso y fino disminuye su dureza superficial únicamente un 5 y un 2% respectivamente.

Figura 6.49. Comparación de la Dureza Superficial entre los resultados iniciales y los obtenidos tras cinco días de hielo – deshielo.

Del mismo modo en la Figura 6.50 se muestran los resultados de la Resistencia a Flexión donde se observa que las probetas de referencia disminuyen hasta un

57% sus valores de resistencia. En cambio los compuestos que incorporan residuo cerámico en su composición disminuyen únicamente hasta un 40%.

A pesar de que este ensayo es bastante agresivo para las muestras de yeso, conseguimos en todos los casos valores de resistencias mecánicas por encima de los límites establecidos por la Norma ($>2\text{MPa}$).

Figura 6.50. Comparación de la Resistencia a Flexión entre los resultados iniciales y los obtenidos tras cinco días de hielo – deshielo.

Del mismo modo se comparan las Resistencias obtenidas a Compresión. En las probetas de referencia se disminuye su valor hasta un 58% mientras que las probetas que contienen un 75% de residuo cerámico disminuyen en torno a un 52% aproximadamente.

Figura 6.51. Comparación de la Resistencia a Compresión entre los resultados iniciales y los obtenidos tras cinco días de hielo – deshielo.

Como conclusión final del presente apartado cabe destacar que los compuestos que sustituyen un 75% de materia prima (Escayola E-35) por residuo cerámico, tras los diferentes tratamientos “especiales” a los que se les ha sometido, responden positivamente, mostrando siempre resultados superiores a las muestras elaboradas con escayola sin ningún tipo de adición.

CAPÍTULO 7
CONCLUSIONES

7. CONCLUSIONES

En este capítulo se presentan las conclusiones de acuerdo al análisis previo de la bibliografía, así como de los objetivos establecidos inicialmente.

CONCLUSIONES GENERALES

- El consumo de energía sigue aumentando en el mundo entero junto con la emisión de gases contaminantes y España se encuentra entre los países de la Unión Europea que más energía consumen, sobre todo en el sector de la construcción. El mayor causante de este impacto ambiental son los materiales tradicionales que siguen empleándose en este sector, por ello la construcción debe evolucionar y para ello se deben empezar a crear materiales eco-eficientes que minimicen la explotación de recursos naturales, que ayuden a reducir la cantidad de energía tanto en su fabricación como en su uso final y que generen menor cantidad de residuos o ayuden a reducirlos.
- Por otra parte, España se encuentra entre los países de la Unión Europea que más residuos genera con más de 100 millones de toneladas anuales, destacando el sector de la construcción como el sector que más residuos genera. En este sentido, la Directiva 98/2008/CE establece como objetivo para el año 2020, la reutilización, el reciclado y la recuperación de un 70% en peso de los RCD.
- Por otra parte, el consumo mundial de yeso no ha dejado de crecer en los últimos años, siendo España el mayor productor de toda la Unión Europea. La obtención de este material de construcción genera un gran impacto ambiental derivado de la explotación de las canteras y del consumo energético para el proceso de calcinación a alta temperatura del aljez. El yeso sigue teniendo gran interés como material de construcción debido a múltiples aplicaciones en las obras de edificación.
- El principal problema al que se enfrenta la sociedad es el consumo lineal tanto de la energía como del uso de materiales, es decir, que los genera, los utiliza y los elimina. Esta situación es la que se pretende resolver incorporando criterios de economía circular de la que anteriormente se ha hablado. Lo ideal es que una vez que se haya terminado con la vida útil del

material, que se pueda transformar de algún modo para volver a inicial una cadena de producción y que no exista la opción de acopiarlo en un vertedero.

- Actualmente los áridos de hormigón son los RCD que más se están reutilizando. Sin embargo, existen muchos otros RCD que pueden ofrecer un valor añadido si se usan como agregados a los materiales convencionales, como es el caso del residuo cerámico, el cual es de los más abundantes a día de hoy suponiendo hasta un 54% del total de los RCD generados. Este material destaca por sus propiedades arcillosas, las cuales contribuyen a mejorar la dureza superficial de los revestimientos, así como la absorción de agua por capilaridad. La realidad es que a pesar de que puede ser recuperado para su reciclaje o su reutilización, la opción más rentable para la gestión de estos residuos sigue siendo su traslado a vertedero. A pesar de que ya existe normativa sobre la reutilización de RCD en hormigones, no existe normativa que regule el empleo de RCD en compuestos de yeso.
- Existen muchos estudios que analizan la incorporación de aditivos y adiciones no normalizados en compuestos de yeso para mejorar alguna de sus propiedades. En la mayoría de los casos estos estudios se centran principalmente en el análisis del aumento de resistencia, el control del tiempo de fraguado, la mejora del comportamiento térmico y la reducción de densidad.
- Fuera de las guías y manuales de reutilización de residuos en materiales de construcción sí se han encontrado muchos estudios de investigación en los que se analiza el reciclaje de residuos como cargas en compuestos de yeso. De estos estudios destaca el uso de residuos agrícolas como los tallos vegetales, residuos industriales como las cenizas volantes y residuos del sector terciario como el papel.
- De entre los trabajos encontrados destaca el “Catálogo de residuos utilizables en la construcción”, desarrollado por el CEDEX, es un documento muy útil que aporta gran información. Sin embargo, este catálogo no incluye estrategias de reutilización de residuos en compuestos de yeso, ni habla del poliestireno como posible residuo de construcción. De hecho, en general en las guías y manuales en los que se presentan soluciones para el reciclaje de residuos de construcción y demolición en

materiales de construcción únicamente se exponen soluciones para los áridos reciclados procedentes del hormigón. También se ha encontrado alguna referencia sobre la reutilización de residuos de construcción y demolición en compuestos de yeso, pero en ningún caso se ha encontrado documentación que hable sobre la incorporación de residuo cerámico.

- En general, con respecto al residuo cerámico, se ha encontrado escasa información sobre su incorporación en materiales compuestos. Por tanto y como conclusión del estado de la cuestión sobre la incorporación de residuos en una matriz de yeso se puede afirmar que no existen estudios suficientes y que en ningún caso éstos han considerado la incorporación de residuo cerámico en base de escayola.

CONCLUSIONES OB. 1 “Identificar los diferentes tipos de residuos cerámicos que podemos encontrar tanto en el ámbito industrial como en las fases de construcción y demolición de edificios”.

- Los residuos procedentes de fábrica no contienen ninguna impureza en su composición, es arcilla más pura, pero son unos residuos escasos dado que en las propias fábricas lo reutilizan para colocarlo en el fondo del horno donde cuecen nuevas piezas cerámicas y así evitar que las llamas incidan directamente sobre los productos definitivos.
- Los residuos procedentes de obra nueva son los más numerosos y de fácil obtención ya que actualmente se ha reactivado la actividad en el sector. Dado que no hay una normativa vigente que regularice la reutilización de los mismos en materiales de base yeso, es importante definir una estrategia para responder a los criterios de la economía circular de dichos materiales.
- Los residuos procedentes de obras de rehabilitación contienen un elevado porcentaje de impurezas, lo que conlleva que la presencia de arcilla sea menor en dichos productos.

CONCLUSIONES OB. 2 “Determinar los porcentajes de sustitución de la materia prima de la escayola por residuo cerámico y obtener las dosificaciones idóneas de relación Agua/Escayola (A/E) atendiendo a la diferente granulometría y los distintos porcentajes de adición de chamota para poder determinar la viabilidad de incorporación de este residuo”.

- Respecto al agua de amasado:
 - La escayola aditivada con los residuos cerámicos procedentes de fábrica requieren mayor cantidad de agua para su correcto amasado ya que contienen mayor cantidad de cerámica sin impurezas, lo que lo convierte en un material muy absorbente.
 - Los residuos procedentes de obra nueva, al incorporar más impurezas, mantienen unas relaciones A/E más similares a los valores de referencia, es decir, muestran un comportamiento más parecido a la escayola sin ningún tipo de adición.
 - Los residuos procedentes de obra de demolición, al incorporar más cantidad de yeso y mortero junto al residuo cerámico, requieren mayor cantidad de agua, incluso más que los residuos procedentes de fábrica.
- Respecto a la granulometría:
 - Los compuestos con adiciones de granulometrías gruesas presentan en general mejores resultados frente a la dureza superficial, absorción de agua por capilaridad y resistencias mecánicas que los compuestos elaborados con granulometrías finas.
- Respecto a los porcentajes de adición:
 - A mayor cantidad de residuo, la mezcla requiere mayores cantidades de agua para ofrecer una trabajabilidad del material resultante.

CONCLUSIONES OB. 3 “Estudiar la viabilidad de los compuestos de escayola y los distintos residuos cerámicos en distintos porcentajes y granulometrías, tratando de incluir la máxima cantidad de residuo admitida por los distintos materiales con el fin de reducir el Impacto Ambiental de los RCD”.

A pesar de buscar que los compuestos contengan la mayor cantidad de RC para reducir el Impacto Ambiental:

- Los compuestos elaborados con escayola y residuo procedente de tabiquería de rehabilitación de edificios sólo ha admitido una sustitución del 25% de materia prima por RC, ofreciendo un material resultante que no cumple con las exigencias mínimas establecidas por normativa, por lo que es inviable su aplicación para revestimientos interiores continuos de yeso.
- Los compuestos elaborados con escayola y el resto de residuos cerámicos analizados se ha conseguido sustituir hasta un 75% de materia prima por RC contribuyendo con ello a reducir el impacto ambiental del material.
- Respecto a la cantidad de residuo cerámico añadida en cada muestra, cabe destacar que los compuestos elaborados con granulometría fina son más fáciles de trabajar que los elaborados con granulometría gruesa.

CONCLUSIONES OB. 4 “Seleccionar el compuesto más adecuado para la búsqueda de una posible aplicación, así como caracterizarlo química y mineralógicamente”.

- Los compuestos que presentan mejores resultados son los que contienen RC de obra nueva. El residuo del Ladrillo Tosco es el seleccionado ya que es el que mejores resultados presenta, mejorando su comportamiento frente a la dureza superficial, absorción de agua por capilaridad y adherencia. Cabe destacar que estas cualidades son las más valoradas por los expertos de cara a los materiales empleados como revestimientos de paramentos interiores.

CONCLUSIONES OB. 5 “Analizar la posibilidad de incorporar algún aditivo para mejorar las propiedades del material resultante”.

- Incluyendo en los compuestos reciclados un 0,01% sobre la masa de yeso del retardador de fraguado PLAST RETARD© se consigue mejorar el tiempo de inicio de fraguado hasta un 20% respecto a la referencia.
- El empleo de la cal hidráulica como retardador de fraguado natural requiere un 60% de cal en la composición del producto para cumplir la mesa de sacudidas, pero no se alcanza el tiempo mínimo de inicio de fraguado, por lo que se desecha dicha vía de trabajo.

CONCLUSIONES OB. 6 “Analizar a través de ensayos específicos el comportamiento del compuesto como revestimiento de paramentos interiores”.

- Los compuestos que contienen un 75% de árido grueso y fino (E+75G_PL y E+75F_PL) destacan por mejorar los valores de referencia, teniendo un tiempo de fraguado >25 minutos, la dureza superficial aumenta en un 5%, la absorción de agua por capilaridad mejora en un 24% y la resistencia a flexión se mantenía similar a los valores de referencia. Por el contrario, los compuestos que incorporan árido fino aumentan su resistencia a compresión en un 17% y el Módulo de Young mejora en un 50%.

Por todo ello se alcanza el objetivo general de la presente tesis doctoral y se consigue diseñar un nuevo material en base de escayola para revestimientos interiores continuos, con criterios de economía circular, reduciendo la materia prima del yeso por residuos cerámicos.

CAPÍTULO 8

FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

8. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

El trabajo de investigación realizado abre las siguientes líneas para futuros proyectos de investigación relacionados con esta área:

- Estudio del comportamiento y la compatibilidad de los residuos cerámicos con yesos tipo B y tipo C, ampliando los estudios de la presente tesis.
- Análisis de los compuestos formados por escayola y residuos cerámicos con tratamiento previo como limpieza, lavado, etc.
- Estudio del comportamiento térmico, acústico y frente al fuego de los compuestos seleccionados en la presente tesis.
- Estudio estadístico de los resultados obtenidos.
- Análisis de la viabilidad del material resultado para la fabricación de placas prefabricadas para la tabiquería de yeso laminado, falsos techos y/o bloques como elemento separador de estancias.
- Análisis del ciclo de vida y huella de carbono del compuesto obtenido en la presente tesis.
- Analisis de posible hidraulicidad del yeso analizado.
- Análisis de la pigmentación del yeso elaborado con adiciones de residuo cerámico en granulometría fina.

9. BIBLIOGRAFÍA

La bibliografía se clasifica en dos apartados: La bibliografía referenciada en la Tesis Doctoral y la bibliografía generada a lo largo del desarrollo del trabajo de investigación.

9.1 Bibliografía referenciada

- AENOR, 2009. UNE-EN 15283-2+A1:2009 Placas de yeso laminado reforzadas con fibras. Definiciones, requisitos y métodos de ensayo. Parte 2. Madrid: s.n.
- AENOR, 2010. UNE-EN 13501-1:2007+A1:2010 Clasificación en función del comportamiento frente al fuego de los productos de construcción y elementos para la edificación. Parte 1: Clasificación a partir de datos obtenidos en ensayos de reacción al fuego. Madrid: s.n.
- AENOR, 2010. UNE-EN 13501-2:2009+A1:2010 Clasificación en función del comportamiento frente al fuego de los productos de construcción y elementos para la edificación. Parte 2. Madrid: s.n.
- AENOR, 2012. UNE-EN ISO 6946:2012 Componentes y elementos para la edificación. Resistencia térmica y transmitancia térmica. Método de cálculo. Madrid: s.n.
- AENOR, 1995. UNE-EN ISO 10211-1:1995 Puentes térmicos en edificación. Madrid: s.n.
- AENOR, 1995. UNE-EN ISO 140-3:1995 Acústica. Medición del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte 3. Madrid: s.n.
- AENOR, 2000. UNE-EN 12114:2000 Prestaciones térmicas de los edificios. Permeabilidad al aire de componentes y elementos de los edificios. Método de ensayo de laboratorio. Madrid: s.n.
- AENOR, 2000. UNE-EN 12524:2000 Materiales y productos para la edificación. Propiedades higrotérmicas. Valores de diseño tabulados. Madrid: s.n.
- AENOR, 2002. UNE-EN 12664:2002 Materiales de construcción. Determinación de la resistencia térmica por el método de la placa caliente guardada y el método del medidor del flujo de calor. Productos secos y húmedos de baja y media resistencia térmica. Madrid: s.n.
- AENOR, 2002. UNE-EN 12667:2002 Materiales de construcción. Determinación de la resistencia térmica por el método de la placa caliente guardada y el método del medidor de flujo de calor. Productos de alta y media resistencia térmica. Madrid: s.n.
- AENOR, 2002. UNE-EN ISO 12572:2002 Hygrothermal performance of building materials and products - Determination of water vapour transmission properties. Madrid: s.n.
- AENOR, 2004. UNE-EN ISO 354:2004 Acústica. Medición de la absorción acústica en una cámara reverberante. Madrid: s.n.
- AENOR, 2007. UNE-EN 14246:2007 Placas de escayola para techos suspendidos. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo. Madrid: s.n.
- AENOR, 2008. UNE-EN 13964:2006/A1:2008 Techos suspendidos. Requisitos y métodos de ensayo. Madrid: s.n.
- AENOR, 2009. RP 35.01 Yesos para la construcción (B1) YG, YG/L, YPM. Madrid: s.n.

- AENOR, 2009. RP 35.02 Conglomerantes a base de yeso para la construcción (A) E30, E30/L, E35, E35/L e YP. Madrid: s.n.
- AENOR, 2009. RP 35.03 Yesos de construcción aligerados (B4) YA, YPM/A. Madrid: s.n.
- AENOR, 2009. UNE-EN 13279-1:2009 Yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción. Parte 1: Definiciones y especificaciones. Madrid: s.n.
- AENOR, 2009. UNE-EN 15318 Diseño e instalación de paneles de yeso. Madrid: s.n.
- AENOR, 2010. Aditivos para hormigones, morteros y pastas. Parte 2: Aditivos para hormigones. Definiciones, requisitos, conformidad, marcado y etiquetado. Madrid: s.n.
- AENOR, 2010. UNE-EN 520:2005+A1:2010 Placas de yeso laminado. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo. Madrid: s.n.
- AENOR, 2011. UNE-EN 1998-1:2011 Eurocódigo 8: Proyecto de estructuras sismorresistentes. Parte 1: Reglas generales. Madrid: s.n.
- AENOR, 2012. UNE-EN 12859:2012 Paneles de yeso. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo. Madrid: s.n.
- AENOR, 2013. UNE-EN ISO 717-1:2013 Acústica. Evaluación del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte 1. Madrid: s.n.
- AENOR, 2014. UNE-EN 13279-2:2014 Yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción. Parte 2: Métodos de ensayo. Madrid: AENOR.
- Agulló, L., Aguado, A. & García, T., 2006. Study of the use of paper manufacturing waste in plaster composite mixtures. Building and environment, 41(6), pp. 821-827.
- AIPEX, 2014. Asociación Ibérica
- Alcaide Tur, Á., 2012. Residuos sólidos urbanos, una consecuencia de la vida. Castellón: Universitat Jaume I.
- Álvarez, C., 2010. La bandeja blanca de poliestireno. [En línea] Disponible en: <http://blogs.elpais.com/eco-lab/2010/10/la-bandeja-blanca-de-poliestireno.html> [Último acceso: 11 febrero 2014].
- Ambientum, 2014. Impacto ambiental de los plásticos. [En línea] Disponible en: http://www.ambientum.com/revista/2001_24/2001_24_SUELOS/MPCTPLST1.htm [Último acceso: 12 febrero 2014].
- ANAIP, 2014. Asociación Española de Industriales de Plásticos. [En línea] Disponible en: <http://www.anaip.es/> [Último acceso: 10 febrero 2016].
- Anink, D., Boonstra, C. & Mak, J., 1996. Handbook of Sustainable Building. An Environmental Preference Method for Selection of Materials for Use in Construction and Refurbishment. Londres: s.n.
- Arikan, M. & Sobolev, K., 2002. The optimization of a gypsum-based composite material. Cement and concrete research, 32(11), pp. 1725-1728.
- Asaad, J. & Tawfik, S., 2011. Polymeric composites based on polystyrene and cement dust wastes. Materials & Design, 32(10), pp. 5113-5119.
- Australian Government, 2012. Construction and demolition waste guide recycling and re-use across the supply chain. Australia: s.n.

- Australian Government. Construction and demolition waste guide recycling and re-use across the supply chain. Australia, 2012.
- Begum, R. A., Siwar, C., Pereira, J. & Jaafar, A., 2007. Implementation of waste management and minimisation in the construction industry of Malaysia. *Resources, Conservation and Recycling*, 51(1), pp. 190-202.
- Bolden, J., Abu-Lebdeh, T. & Fini, E., 2013. Utilization of recycled and waste materials in various construction applications. *American Journal of Environmental Sciences*, 9(1), pp. 14-24.
- Borreguero, A. M. et al., 2010. Improvement of the thermal behaviour of gypsum blocks by the incorporation of microcapsules containing PCMS obtained by suspension polymerization with and optimal core/coating mass ratio. *Applied Thermal Engineering*, 30(10), pp. 1164-1169.
- Bosco Hernandez-Zaragoza, J. y otros, 2013. Cellular Concrete Bricks with Recycled Expanded Polystyrene Aggregate. *Advances in Materials Science & Engineering*, p. 160162 (5 pp.). Carvalho, M. A. et al., 2008. Microstructure and Mechanical Properties of Gypsum Composites Reinforced with Recycled Cellulose Pulp. *Materials Research*, 11(4), pp. 391-397.
- Cámaras Oficiales de Comercio, I. y. N., 2006. Cámara Santiago Compostela. Disponible en: <http://www.camaracompostela.com/index.asp?ind=4A0&p=36>
- CEDEX, 2012. Catálogo de Residuos utilizables en la construcción. [En línea] Disponible en: <http://www.cedexmateriales.vsf.es/view/catalogo.aspx> [Último acceso: 10 marzo 2014].
- CNE, 2013. Comisión Nacional de Energía. [En línea] Disponible en: <http://www.cne.es/>.
- CEDEX, 2012. Catálogo de Residuos utilizables en la construcción. [En línea] Disponible en: <http://www.cedexmateriales.vsf.es/view/catalogo.aspx> [Último acceso: 10 marzo 2016].
- CEDEX, 2014. Informe de Residuos de Construcción y demolición. http://www.cedexmateriales.es/upload/docs/es_RESIDUOSDECONSTRUCCIONYDEMOLICIONNOV2014.pdf
- Cherki, A. A.-b. y otros, 2014. Experimental thermal properties characterization of insulating cork-gypsum composite. *Construction and Building Materials*, Volumen 54, pp. 202-209.
- Chiara Bignozzi, M. Y Saccani, A. "Ceramic waste as aggregate and supplementary cementing material: A combined action to contrast alkali silica reaction (ASR)". *Cement & Concrete Composites*, 34, ISSN, (2011). p. 1141-1148.
- Comisión Nacional de Energía, 1997. Ley 54/1997, de 27 de noviembre, del sector eléctrico. Madrid: s.n. Consejería de Medio Ambiente y Ordenación, 2006. Estrategia de residuos de la Comunidad de Madrid (2006-2016). Madrid: s.n.
- Corinaldesi, V., Donnini, J. & Nardinocchi, A., 2015. Lightweight plasters containing plastic waste for sustainable and energy-efficient building. *Construction and Building Materials*, Volumen 94, pp. 337-345.
- Coutts, R., 1991. Wastepaper fibers in plaster products. *Materials Science Letters*, 10(2), pp. 77-78.
- Cowan, H., 1977. History of masonry and concrete domes in building construction. *Building and Environment*, Volumen 12, pp. 1-24.

- Danosa, 2014. Danolosa-Aislamiento térmico. [En línea] Disponible en: www.danosa.es [Último acceso: 27 febrero 2014].
- Del Río Merino, M. & Comino, P., 2001. Influencia del grado de dispersabilidad de la fibra de vidrio E en el comportamiento mecánico y la trabajabilidad de la escayola. *Materiales de construcción*, 51(261), pp. 33-44.
- Del Río Merino, M. & Hernández Olivares, F., 2004. Lightened plaster: alternative solutions to cellular solids addition. *Materiales de Construcción*, 54(275).
- Del Río Merino, M. et al. Eco plaster mortars with addition of waste for high hardness coatings. *Construction and Building Materials*. 158 (2018) 649–656
- Del Río Merino, M., 1999. Elaboración y aplicaciones constructivas de paneles prefabricados de escayola aligerada y reforzada con fibras de vidrio E y otros aditivos (tesis doctoral). Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- Del Río Merino, M., Domínguez, J. D. & Hernández Olivares, F., 1998. Escayola aligerada con sólidos celulares. *Informes de la construcción*, 50(458), pp. nov-dic.
- Del Río Merino, M., Santa Cruz Astorqui, J. & Hernández Olivares, F., 2005. New prefabricated elements of lightened plaster used for partitions and extrados. *Construction and Building Materials*, 19(6), pp. 487-492.
- Demir, I. & Baspinar, M. S., 2008. Effect of silica fume and expanded perlite addition on the technical properties of the fly ash-lime-gypsum mixture. *Construction and Building Materials*,
- DEMIR, I.; MEHMET, O. "Reuse of waste bricks in the production line". *Building and Environment*, 38, (2003). p. 1451 – 1455.
- Demirboga, R. & Kan, A., 2012. Thermal conductivity and shrinkage properties of modified waste polystyrene aggregate concretes. *Construction and Building Materials*, Volumen 35, pp. 730-734.
- Demirel, B., 2013. Optimization of the composite brick composed of expanded polystyrene and pumice blocks. *Construction and Building Materials*, Volumen 40, pp. 306-313.
- Department of the environment, 2012. Construction and demolition waste guide recycling and re- use across the supply chain. Australia: Edge Environment Pty Ltd for the department.
- Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 noviembre 2008, sobre los residuos.
- ECODES, 2013. CeroCO2. [En línea] Disponible en: www.ceroco2.org [Último acceso: 12 diciembre 2015].
- Egenhofer, C., Jansen, J., Bakker, S. & Jussila Hammes, J., 2006. Revisiting EU Policy Options for Tackling Climate Change: A Social Cost-Benefit Analysis of GHG Emissions Reduction Strategies, Bruselas: Centre for European Policy Studies.
- El Consejo de las Comunidades Europeas, 1991. Directiva 91/689/CEE del Consejo, de 12 de diciembre de 1991, relativa a residuos peligrosos. S.I.:s.n.
- El Parlamento Europeo, 2008. Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 19 de noviembre de 2008 sobre los residuos. S.I.:s.n.

- El-Bashir, S., 2007. Thermal and mechanical properties of plywood sheets based on polystyrene/silica nanocomposites and palm tree fibers. *Polymer Bulletin*, 70(7), pp. 2035-2048.
- España. Orden MAM/304/2002, por la que se publican las operaciones de valorización y eliminación de residuos y la lista europea de residuos. *Boletín Oficial del Estado*, 19 de febrero de 2002, núm. 43, p. 6494.
- ETSIM-UPM, 2012. Cambio climático. Emisiones en el mundo. Disponible en: <http://www.minas.upm.es/investigacion/co2/cambioClimatico.EWorld.htm>
- European Commission, 2014. Eurostat. Disponible en: [http://ec.europa.eu/eurostat/statisticsexplained/index.php/File:Waste_generation_by_economic_activities_and_households,_EU-28,_2014_\(%25\)_YB16.png](http://ec.europa.eu/eurostat/statisticsexplained/index.php/File:Waste_generation_by_economic_activities_and_households,_EU-28,_2014_(%25)_YB16.png) [Último acceso: 23 octubre 2016].
- Eurostat, 2017. Disponible en: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Waste_statistics/es. Última visita: 24/09/2018.
- Eve, S. y otros, 2006. Investigation of the setting of polyamide fibre/latex-filled plaster composites.
- Experimental research on producing thermal insulating bonding mortar by spent polystyrene foam. *Applied Mechanics and Materials*, Volumen 174-177, pp. 1253-6.
- Fischer, C. & Werge, M., 2009. EU as a Recycling Society. Copenhagen: ETC/SCP.
- Follner, S. & Follner, H., 2004. A potential process for production of gypsum board via recrystallization of dihydrate gypsum. *ZKG International*, 57(6), pp. 78-83.
- Fujita, T., Komatsu, N. & Kawai, S., 2006. Manufacture and properties of gypsum-bonded particleboard IV. Properties of gypsum-bonded particleboard made with raw material from waste gypsum boards. *Mokuzai Gakkaishi*, 52(6), pp. 368-375.
- García Santos, A., 2009. Escayola reforzada con fibras de polipropileno y aligerada. *Materiales de Construcción*, 59(293), pp. 105-124.
- Geiseler, J., 1996. Use of steelworks slag in Europe. *Waste Management*, 16(1-3), p. 59-63.
- Gencel, O. y otros, 2016. A novel lightweight gypsum composite with diatomite and polypropylene fibers. *Construction and Building Materials*, Volumen 113, pp. 732-740.
- GERD, 2013. Informe sobre gestión y control de la producción de los RCD en España periodo 2008 – 2011, Madrid: Ferco.
- Gmouh, A., Samdi, A., Moussa, R. & Gomina, M., 2001. Lightened plaster-based composite materials: Elaboration and mechanical properties. *Silicates industriels*, Volumen 5-6, pp. 61-66.
- Gobierno de España, 2001. Real Decreto 1481/2001, de 27 de diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero. Madrid: s.n.
- Gobierno de España, 2002. Orden MAM/304/2002, de 8 de febrero por la que se publican las operaciones de valorización y eliminación de residuos y la lista europea de residuos. Madrid: s.n.
- Gobierno de España, 2010. Libro de la Energía en España 2010. 2ª edición ed. Madrid: s.n.
- Gobierno de España, 2014. Estadística Minera de España. [En línea]

- Gomis Yagües, V., s.f. El yeso como materia prima. [En línea] Disponible en: <http://iq.ua.es/Yeso/> [Último acceso: 17 febrero 2014].
- Gonçalves Rapazote, J., Laginhas, C. & Teixeira-Pinto, A., 2010. Development of Building Materials through Alkaline Activation of Construction and Demolition Waste (CDW) Resistance to Acid Attack. *Advances in Science and Technology*, Volume 69, pp. 156-163.
- González Cortina, M.; Villanueva Domínguez, L. "Recuperación de morteros romanos de cal y chamota en aplicaciones actuales". Tesis Doctoral en la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de la Universidad Politécnica de Madrid, Departamento de Construcción y Tecnología Arquitectónicas, 2000.
- González Madariaga, F. J. & Lloveras Macia, J., 2008. EPS (expanded polystyrene) recycled bends mixed with plaster or stucco, some applications in building industry. *Informes de la Construcción*, 60(509), pp. 35-43.
- González Madariaga, F. J., 2005. Caracterización de mezclas de residuos de poliestireno expandido (EPS) conglomerados con yeso o escayola, su uso en la construcción (tesis doctoral). Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya.
- González Madariaga, F. J., 2005. Caracterización de mezclas de residuos de poliestireno expandido (EPS) conglomerados con yeso o escayola, su uso en la construcción (tesis doctoral). Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya.
- Gruzen Samton LLP with City Green Inc., 2003. *Construction & Demolition Waste Manual*. New York: s.n.
- Guangcai, X., 2013. Extruded polystyrene compound insulation fireproof plate. s.l. Patente nº E04B1/80; E04B1/94.
- Guleria, S. & Dutta, R., 2011. Unconfined Compressive Strength of Fly Ash-Lime-Gypsum Composite Mixed with Treated Tire Chips. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23(8), pp. 1255-1263.
- Gutierrez-Gonzalez, S. et al., 2013. Rheological behaviour of gypsum plaster pastes with polyamide powder wastes. *Construction and Building Materials*, Volume 38, pp. 407-412.
- Gutiérrez-González, S. y otros, 2012. Compatibility between gypsum and polyamide powder waste to produce lightweight plaster with enhanced thermal properties. *Construction and Building Materials*, Volumen 34, pp. 179-185.
- Gutiérrez-González, S. y otros, 2012. Lightweight plaster materials with enhanced thermal properties made with polyurethane foam wastes. *Construction and Building Materials*, 28(1), pp. 653-658.
- Gutt, W. & Nixon, P., 1979. Use of waste materials in the construction industry. *Materials and structures*, 12(4), pp. 255-306.
- Halada, K., 2003. Progress of ecomaterials toward a sustainable society. *Current Opinion in Solid*
- HERNÁNDEZ-OLIVARES F., OTEIZA I., DE VILLANUEVA L. "Experimental analysis of toughness and modulus of rupture increase of sisal short fiber reinforced hemihydrated gypsum". *Composite Structures*, Vol. 22. Núm. 3. (1992). p. 123-137.

- Hernández-Olivares, F., Bollati, M., Del Río Merino, M. & Parga-Landa, B., 1999. Development of cork-gypsum composites for building applications. *Construction and Building Materials*, 13(4), pp. 179-186.
- Herrero, S., Mayor, P. & Hernández Olivares, F., 2013. Influence of proportion and particle size gradation of rubber from end-of-life tires on mechanical, thermal and acoustic properties of plaster-rubber mortars. *Materials & Design*, Volumen 47, pp. 633-642.
- Huang, B., Xhang, Y. & Li, D. X., 2013. Study on the Influences of Foaming Gypsum's Performance. *Materials Science Forum*, Volumen 743, pp. 222-227.
- Huang, K., Liang, H. & Hung, M., 2010. Improvement in fire prevention performance of cork-gypsum decorative materials by applying porous waste. *International Journal of Physical Sciences*, Volume 5, pp. 2038-2044.
- Hummel, H. et al., 2007. Examination of the exposure- and odour-reducing characteristics of gypsum-based building materials containing zeolite. *Bauphysik*, 29(6), pp. 430-435.
- IDAE, 2011. Análisis del consumo energético del sector residencial en España. Informe final. [En línea] Disponible en: www.idae.es [Último acceso: 9 enero 2014].
- IDAE, 2011. Instituto para la Diversificación y el ahorro de la Energía. [En línea] Disponible en: <http://www.idae.es/index.php/idpag.481/relcategoria.1368/reلمenu.363/mod.pags/mem.d etall e> [Último acceso: 15 octubre 2013].
- IDAE, 2011. Plan de Ahorro y Eficiencia Energética 2011-2020. [En línea] [Último acceso: 11 diciembre 2013].
- Impact resistance tests. Impact bodies and general test procedures. Switzerland: s.n.
- Impernor, S., 2015. Datos de aislamiento suministrado y facturado en diferentes obras. Madrid: s.n.
- Informe Coyuntura Económica de la Confederación Española de Asociaciones de Fabricantes de Productos de Construcción CEPCO. http://www.cepco.es/Uploads/docs/Informe_Coyuntura_CEPCO_Noviembre_2017.pdf
- IngenieriaPlastica.com, s.f. La Historia del Plástico. [En línea] Disponible en: http://www.ingenieriaplastica.com/novedades_ip/instituciones/cipres_historia.html [Último acceso: 11 febrero 2014].
- International Organization for Standardization, 1988. ISO 7892:1988. Vertical building elements.
- Iucolano, F., Caputo, D., Leboffe, F. & Liguori, B., 2015. Mechanical behavior of plaster reinforced with abaca fibers. *Construction and Building Materials*, Volumen 99, pp. 184-191.
- Jefatura del Estado, 2011. Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados. Madrid: s.n.
- Jiang, H. & Luan, C., 2011. Preparation and Absorption/Desorption Performance of Gypsum-based Humidity Controlling Materials. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater*, 26(4).

- Jiménez Rivero, A., de Guzmán Báez, A. & García Navarro, J., 2014. New composite gypsum plaster – ground waste rubber coming from pipe foam insulation. *Construction and Building Materials*, Volumen 55, pp. 146-152.
- Jin Hee, L., Hare Ri, L. & Bang, H. B., 2012. Simple manufacturing method of the extruded polystyrene foam containing graphites. s.l. Patente nº KR20110100631 20111004.
- Journal of the European Ceramic Society*, 26(13), pp. 2541-2546.
- Karaman, S., Sahin, S., Gunal, H. & Orung, I., 2006. Stabilization of waste pet bottles with Gypsum. *Journal of Applied Sciences*, Volumen 6, pp. 1119-1122.
- Khalil, A., Tawfik, A., Hegazy, A. & El-Shahat, M., 2013. Effect of different forms of silica on the physical and mechanical properties of gypsum plastercomposites. *Materiales de construcción*, 63(312), pp. 529-537.
- Kim, C., 2009. Heat insulating panel for building, has bottom panel, which is manufactured according to sheet configuration using waste styrofoam and regeneration polystyrene resin, and top panel manufactured in same form as that of bottom panel. s.l. Patente nº KR2009049678-A.
- Kim, S., 2009. Incombustibility, physico-mechanical properties and TVOC emission behavior of the gypsum–rice husk boards for wall and ceiling materials for construction. *Industrial crops and products*, 29(2), pp. 381-387.
- Klöck, W. & Aicher, S., 2005. Size effect in paper fiber-reinforced gypsum panels under in-plane bending. *Wood and fiber science*, 37(3), pp. 403-412.
- Knauf, 2014. Mortero proyectado para protección pasiva al fuego Vermiplaster. [En línea] Disponible en: www.knauf.es [Último acceso: 2016 11 3].
- Kocemba, A. & Mucha, M., 2016. Water retention and setting in gypsum/polymers composites.
- Koeseoglu, C., 2009. Lightweight brick type construction element producing-composition comprises clay, expanded perlite, shavings or styrofoam powder, and electron sourcing materials having tincal, ulexite and/or albite. s.l. Patente nº WO2009040147-A2.
- Kumar, S., 2002. A perspective study on fly ash-lime-gypsum bricks and hollow blocks for low cost housing development. *Construction and Building Materials*, 16(8), pp. 519-525.
- L. Reig, M.M. Tashima, M.V. Borrachero, J. Monzó, C.R. Cheeseman, J. Payá. Properties and microstructure of alkali-activated red clay brick waste. *Construction and Building Materials* 43 98–106 (2013).
- La Maruxina, 2014. Aliproyes. [En línea] Disponible en: www.lamaruxina.com [Último acceso: 2016 11 3].
- Lakraflı, H., Tahiri, S., Albizane, A. & El Otmani, M., 2012. Effect of wet blue chrome shaving and buffing dust of leather industry on the thermal conductivity of cement and plaster based materials. *Construction and Building Materials*, Volumen 30, pp. 590-596.
- Lanzón, M. & García-Ruiz, P., 2012. Effect of citric acid on setting inhibition and mechanical properties of gypsum building plasters. *Construction and Building Materials*, 28(1), pp. 506-511
- Leiva Aguilera, M. & Del Río Merino, M., 2014. Escayola aditivada con residuos agrícolas: cáscara de arroz y cáscara triturada. En: e. a. C. Linares-Millán, ed. *Construction and Building Research*. Switzerland: Springer, pp. 463-470.

- Leiva Aguilera, M.J. 2017. Escayola aditivada con residuos de cáscara de arroz. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid.
- Li, G. y otros, 2003. Properties study of cotton stalk fiber/gypsum composite. *Cement and Concrete Research*, 33(1), pp. 43-46.
- Lihua, Z. & Zhibin, G., 2013. Curtain wall integrating XPS (extruded polystyrene) heat insulation material and stone. s.l. Patente nº B32B27/12; B32B27/30; E04B2/88; E04B2/92.
- Lima, J. & Faria, P., 2016. Eco-Efficient Earthen Plasters: The Influence of the Addition of Natural Fibres. *Natural fibres: advances in science and technology towards industrial applications: from science to market*, Volumen 12, pp. 315-327.
- Linchang, M. y otros, 2013. Properties and Applications of Cement-Treated Sand-Expanded Polystyrene Bead Lightweight Fill. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25(1), pp. 86-93. Lipeng, C., 2012.
- Lorenzo García, S., 2013. Un futuro en peligro. *Cuadernos de Tomás*, pp. 283-295.
- Madandoust, R., Ranjbar, M. M. & Mousavi, S. Y., 2011. An investigation on the fresh properties of self-compacted lightweight concrete containing expanded polystyrene. *Construction and Building Materials*, 25(9), pp. 3721-3731.
- Magallanes-Rivera, R., Escalante-García, J. & Gorokhovskiy, A., 2009. Hydration reactions and microstructural characteristics of hemihydrate with citric and malic acid. *Construction and Building Materials*, 23(3), pp. 1298-1305.
- Martín Larrañaga, M., 2009. La bioenergía: estrategia para una economía verde. *Revista Ambienta*.
- Mechanics and Materials*, Volumen 127, pp. 272-276.
- Merchant Research & Consulting Ltd, 2016. Gypsum: 2014 Market Review and Forecast. Disponible en: <http://mcgroup.co.uk/researches/gypsum> [Último acceso: 17 diciembre 2016].
- Ministerio de Medio Ambiente. Ficha Técnica de Residuos de Construcción y Demolición. Marzo de 2009. Versión electrónica descargable desde <http://www.larioja.org/upload/documents/534424_Ficha_tecnica_RCDs._Cedex.pdf>. [Última visita: 23 de mayo de 2018].
- Mohandesi, J. A., Sangghaleh, A., Nazari, A. & Pourjavad, N., 2011. Analytical modeling of strength in randomly oriented PP and PPTA short fiber reinforced gypsum composites. *Computational Materials Science*, Volumen 50, pp. 1619-1624.
- Morales Conde, M. J., Rodríguez Liñán, C. & Pedreño Rojas, M. A., 2016. Physical and mechanical properties of wood-gypsum composites from demolition material in rehabilitation works. *Construction and Building Materials*, Volumen 114, pp. 6-14.
- Mundoplast, 2013. España, demanda de plásticos por sector 2012. Disponible en: <http://www.mundoplast.com/noticia/la-produccion-materias-primas-plasticas-cayo-84-espana-2012-/70832> [Último acceso: 11 febrero 2014].
- National Academy of Engineering, 1990. *Energy: Production, Consumption, and Consequences*. Washington, D.C.: National Academy Press.

- Nazerian, M. & Kamyab, M., 2013. Gypsum-bonded particleboard manufactured from agricultural based material. *Forest Science and Practice*, 15(4), pp. 325-331.
- Neila González, F. J. & Bedoya Frutos, C., 1997. Técnicas arquitectónicas y constructivas de acondicionamiento ambiental. Madrid: Munilla-Lería.
- NYC Department of Design & Construction. "Construction & Demolition Waste Manual" New York, 2003.
- OCHOA, J. C.; BONILLA, M.; BORRACHERO, M. V. Y PAYÁ, J.. "Effect of an admixture from Agave americana on the physical and mechanical properties of plaster". *Materiales de Construcción*, Vol. 63, 309. ISSN: 0465-2746 (2013). p. 79-92.
- Oh, J., 2009. Lightweight brick manufacturing method involves pulverizing styrofoam or waste building materials into predetermined size, where bricks are molded into specific size, and moisture contained inside molded bricks are dried. s.l. Patente nº KR2009120634-A.
- Oliver, A., 2012. Thermal characterization of gypsum boards with PCM included: Thermal energy storage in buildings through latent heat. *Energy and Buildings*, Volumen 48, pp. 1-7.
- Onishi, K., Tsukamoto, Y., Saito, R. & Chiyoda, T., 2010. Strength and small-strain modulus of lightweight geomaterials: cement-stabilised sand mixed with compressible expanded polystyrene beads. *Geosynthetics International*, 16(10), pp. 380-388.
- Ortiz Hernández, M. L., 2009. El impacto de los plásticos en el ambiente. *Hypatia*, Volumen 30. Osmani, M., Glass, J. & Price, A. D., 2008. Architects' perspectives on construction waste reduction by design. *Waste Management*, 28(7), pp. 1147-1158.
- Oteiza San José, I., Villanueva Y Domínguez, L. "Estudio del comportamiento de la escayola reforzada con fibras de sisal, para componentes en viviendas de bajo coste". *Informes de la Construcción*, vol. 45, nº 425-426. (1993). Tesis Doctoral.
- Parres, F., Crespo-Amoros, J. & Nadal-Gisbert, A., 2009. Mechanical properties analysis of plaster reinforced with fiber and microfiber obtained from shredded tires. *Construction and Building Materials*, 23(10), p. 3182-3188.
- Passivhaus-ECCN, 2018. Disponible en: <https://passivhaus-paee.com/impacto-de-los-edificios-en-el-medio-ambiente/>. Última visita: 24/09/2018.
- Pichniarczyk, P., Malata, G. & Szelag, H., 2005. The polymer impregnated gypsum mineral wool as a new, alternative material for thermal insulation. *Cement Wapno Beton*.
- Placo, 2014. Yesos de proyectar aligerados. [En línea] Disponible en: www.placo.es
- III Plan Estatal de Residuos 2016 – 2022. Disponible en: https://www.mapama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/planes-y-estrategias/pemaraprobado6noviembrecondae_tcm30-170428.pdf. Última visita: 24/09/2018.
- Plastech, 2011. Plastics demand in Europe by types and by sectors. Disponible en: <http://www.plastech.biz/news/Plastics-demand-in-Europe-by-types-and-by-sectors,n5728> [Último acceso: 11 febrero 2014].
- PlasticsEurope, 2012. World plastics materials production 2012. Disponible en: <http://www.plasticseurope.org/> [Último acceso: 11 febrero 2016].
- PlasticsEurope, 2013. Plastics – the Facts 2013. Disponible en: <http://www.plasticseurope.org/documents/document/20131014095824->

- final_plastics_the_facts_2013_published_october2013.pdf [Último acceso: 11 febrero 2016].
- Puertas, F.; García-Díaz, I.; Palacios, M.; Martínez-Ramírez, S.; Barba, A.; Gazulla, M. F. Y Gómez, M. P. "Empleo de residuos cerámicos como material prima alternativa para la fabricación de clínker de cemento portland". *Cemento Hormigón*, ISSN 0008-8919, Nº. 907, (2007). p. 20-34.
- Puertas, F.; Barba, A.; Gazulla, M. F.; Gómez, M. P.; Palacio, M. Y Martínez-Ramírez, S. "Ceramic wastes as raw materials in portland cement clinker fabrication: Characterization and alkaline activation". *Materiales de Construcción*, ISSN 0465-2746, Vol. 56, 281, (2006). p. 73-84.
- Ramezani, H., Shandab, S. & Nouri, A., 2012. Study on effects of wood fiber content on physical, mechanical and acoustical properties of wood-fiber-filled gypsum composites. *Materials Research*, Volume 15, pp. 236-241.
- REN21, 2016. Renewables 2016. Global Status Report. [En línea] Disponible en: http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2016/06/GSR_2016_Full_Report.pdf [Último acceso: 2 enero 2017].
- Rodríguez Orejón, Agustín, Río Merino, Mercedes Del. "Adición de residuos de yeso laminado tratado, en el yeso de construcción". Trabajo Fin de Máster en la Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica de la Universidad Politécnica de Madrid, Máster Técnicas y Sistemas de Edificación. Septiembre 2010.
- Rodríguez, A., Gutiérrez-González, S., Horgnies, M. & Calderón, V., 2013. Design and properties of plaster mortars manufactured with ladle furnace slag. *Materials & Design*, Volumen 52, pp.987-994.
- Romaniega Piñeiro, S., Del Río Merino, M. & Pérez García, C., 2015. New Plaster Composite with Mineral Wool Fibres from CDW Recycling. *Advances in Materials Science and Engineering*, Volumen 2015.
- Romaniega Piñeiro, Sonia, Río Merino, Mercedes Del. "Refuerzo del yeso mediante fibras procedentes del reciclaje". En: Libro de Actas del II Congreso Nacional de Investigación en Edificación, celebrado en la Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica de la Universidad Politécnica de Madrid los días 15-16-17 de diciembre de 2010. ISBN: 978-84-693-2844-8
- Ru, W. & Meyer, C., 2012. Performance of cement mortar made with recycled high impact polystyrene. *Cement and Concrete Composites*, 34(9), pp. 975-81.
- Rudnick, H., 2010. Impuestos al carbono. Chile: Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Ruiz-Santa Quiteria Gómez, C. Materias primas alternativas para el desarrollo de nuevos cementos. Activación alcalina de vidrios silicoaluminosos. PhD Thesis. Universidad Autónoma de Madrid (2013)
- San Antonio González, A. 2017. Caracterización de compuestos eco-eficientes de yeso aligerado con residuo de poliestireno extruido (XPS). Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid.
- San Antonio González, A. y otros, 2014. Feasibility of Recycling CDW as Raw Material in Gypsum Composites. Atenas, Atiner. Schneider, J., Freyer, D. & Voigt, W., 2007. The effect of retarders on the setting process in industrially relevant hemihydrate gypsum plasters. *ZKG International*, 60(12), pp. 68-76.

- Santos Aguilera, J. H. & D. Matías, J., 2008. Pensamiento ecológico y ambiental. [En línea] Disponible en: <http://revistaambiental.blogspot.co.uk/> [Último acceso: 17 diciembre 2013].
- Scholer, M. & Patt, R., 1987. Production of gypsum-bonded high-strength fiberboards using recycled paper. *Holz als Roh-und Werkstoff*, 45(9), pp. 390-390.
- Serna, Á., del Río Merino, M., Palomo, J. G. & González Cortina, M., 2012. Improvement of gypsum plaster strain capacity by the addition of rubber particles from recycled tyres. *Construction and Building Materials*, Volumen 35, p. 633–641.
- Smithers Apex, 2016. Worldwide Gypsum Market to Reach \$3.8 Billion by 2023. Disponible en: <https://www.smithersapex.com/market-reports/news/worldwide-gypsum-market-to-reach-3-8-billion-by-2023.aspx> [Último acceso: 17 diciembre 2016].
- State and Materials Science, Volumen 7, pp. 209-216.
- Tam, V., 2008. On the effectiveness in implementing a waste-management-plan method in construction. *Waste management*, 28(6), pp. 1072-1080.
- Tang, W., Lo, Y. & Nadeem, A., 2008. Mechanical and drying shrinkage properties of structural- graded polystyrene aggregate concrete. *Cement and Concrete Composites*, 30(5), pp. 403-409.
- Tejero González, A., 2012. Reducción del consumo energético y emisiones anhídrido carbónico en edificios combinando enfriamiento evaporativo, enfriamiento gratuito y recuperación de energía en sistemas todo aire. Valladolid: Universidad de Valladolid.
- Textos científicos.com, 2013. Polímeros sintéticos. [Disponible en: <http://www.textoscientificos.com/polimeros/sinteticos> [Último acceso: 11 febrero 2016].
- Thermochip, 2014. [En línea] Disponible en: www.termochip.com [Último acceso: 27 febrero 2014].
- Tiscareño Vizcarra, A. A., 2005. Propuesta de mejora en la operación del sistema de recolección y procesamiento de residuos de la Ciudad de Puebla (Tesis doctoral). Méjico: Universidad de las Américas Puebla.
- Thole, V., 1992. Bending strength of gypsum-bonded particleboards using flax waste as an additive. *Holz als Roh-und Werkstoff*, 50(7-8), pp. 327-327.
- Thole, V. & Weiss, D., 1992. Suitability of annual plants as additives for gypsum-bounded particleboards. *Holz als Roh-und Werkstoff*, 50(6), pp. 241-252.
- Trilles-Lázaro, V. R. Y Allepuz, S.. "Reutilización de vidrio reciclado y residuos cerámicos en la obtención de gres porcelánico. Eco-logik". *Cerámica y Vidrio*, ISSN , Vol. 50, 2. (2011). p. 17-19.
- U.S. Energy Information Administration, 2011. [En línea] [Último acceso: 4 noviembre 2013].
- UTE, Planta de Navalmorcuero, 2014. [En línea] [Último acceso: mayo 2014].
- Van Dijk, K., Boedianto, P., te Dorsthorst, B. J. & Kowalczyk, T., 2001. Strategy for reuse of construction and demolition waste role of authorities. *Heron*, 46(2), pp. 0046-7316.
- Veisheh, S. & Yousefi, AA, A., 2003. The use of polystyrene in lightweight brick production. *Iranian Polymer Journal*, 12(4), pp. 323-329.
- Vidales Barriguete, et al. (2018). Analysis of the feasibility of the use of CDW as a low-environmental- impact aggregate in conglomerates. "Construction and building materials", v. 178 ; pp. 83-91. ISSN 0950-0618.

- Villanueva Domínguez, L. d. & García Santos, A., 2001. Manual del Yeso. Madrid: CIE Inversiones Editoriales-DOSSAT 2000, 2001. p. 268. Asociación Técnica y Empresarial del Yeso ATEDY. ISBN. 84-95312-46-8.
- Villanueva Domínguez, L. d., 1975. Documentación técnica de las propiedades del yeso en la construcción. Madrid: Ministerio de la Vivienda.
- Villoria Sáez, P., 2014. Sistema de gestión de residuos de construcción y demolición (RCD) en obras de edificación residencial. Buenas prácticas en la ejecución de obra (tesis doctoral). Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- 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*, 30(2), pp. 137-146.
- Villoria Sáez, P., Del Río Merino, M., San-Antonio-González, A. & Porras-Amores, C., 2013. Best practice measures assessment for construction and demolition waste. *Resources, Conservation and Recycling*, Volumen 75, p. 52– 62.
- Vimmrová, A., Keppert, M., Svoboda, L. & Černý, R., 2011. Lightweight gypsum composites: Design strategies for multi-functionality. *Cement and Concrete Composites*, 33(1), pp. 84-89.
- Vimmrová, A., Nazmunnahar, M. & Cerny, R., 2016. Lightweight gypsum-based materials prepared with aluminum powder as foaming agent. *Cement Wapno Beton*, 19(5), pp. 299-307.
- W2R Waste to Resource. Plan estatal I+D+i, BIA2013-43061-R. Investigador principal Del Río Merino, M., De residuos a recursos: Valorización integral de los residuos generados en la rehabilitación energética de edificios (2017).
- Wang, J., Yuan, H., Kang, X. & Lu, W., 2010. Critical success factors for on-site sorting of construction waste: A China study. *Resources, Conservations and Recycling*, 54(11), pp. 931-936.
- Wang, Y. Y. & Li, G. Z., 2011. Surface Modification of Cornstalk Fiber and Properties of Cornstalk Fiber/Gypsum Composites. *Advanced Materials Research*, Volumen 306, pp. 766-79.
- Winterling, H. & Sonntag, N., 2011. Rigid Polystyrene Foam (EPS, XPS). *Kunststoffe International*, 101(10), pp. 18-21.
- Wu, Z., Chen, B. & Liu, N., 2013. Fabrication and compressive properties of expanded polystyrene-foamed concrete: Experimental research and modeling. *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)*, 18(1), pp. 61-9.
- Xiaolong, S., Mingsheng, H. & Xiaojian, F., 2011. Linear analysis and strength prediction of experiment on lightweight heterogeneous soil mixed with expanded polystyrene. *Advanced Materials Research*, Volumen 250-253, pp. 622-5.
- Yadollah, D., Mitchell, W. & Breindel, R. M., 2011. Extruded polystyrene foam containing propylene carbonate, ethylene carbonate or butylene carbonate as a process aids. S.I. Patente nº MX20100013201 20101202.
- Yi, X. & Linhua, J., 2011. Investigating mix proportions of lightweight expanded polystyrene concrete. *Applied Mechanics and Materials*, pp. 950-3.

- Yi, X., Linhua, J., Jinxia, X. & Yang, L., 2012. Mechanical properties of expanded polystyrene lightweight aggregate concrete and brick. *Construction & Building Materials*, 27(1), pp. 32-8.
- Yong, G. X., Tong, J. P., Hai, F. L. & Ji, M., 2010. Preparation and Properties of Expanded Vermiculite/Gypsum Thermal Insulation Boards. *Advanced Materials Research*, Volumen 178, pp. 220-225.
- Zhang, W. H., Li, G. Z. & Liu, M. R., 2011. Properties research of cotton fiber reinforced gypsum based composites. *Advanced Materials Research*, Volumen 194, pp. 1759-1762.
- Zhao, J., 2013. Cement XPS (Extruded Polystyrene)-sandwiched composite insulation board. s.l.
- Zheng, G., Wang, R., Zhao, G. & Yu, X., 2012. Adsorption and dispersion characteristics of superplasticizer with waste plexiglas (WPS) on the surface of gypsum particles. *Applied*
- Zhengxian, Y., Hollar, J. & Xianming, S., 2010. Surface-sulfonated polystyrene microspheres improve crack resistance of carbon microfiber-reinforced Portland cement mortar. *Journal of Materials Science*, 45(13), pp. 3497-505.
- Zhou, S. y otros, 2013. The preparation and performance of gypsum-based composites. *Applied Mechanics and Materials*, Volumen 310, pp. 46-50.

9.2 Bibliografía generada

Artículos internacionales

"Eco plaster mortars with addition of waste for high hardness coatings"

M. del Río Merino, J. Santa Cruz Astorqui, P. Villoria Sáez, R. Santos Jiménez, M. González Cortina.

Revista: Construction and Building Materials 158 (2018) 649–656.

Cuartil Q1. Índice de impacto JCR: 2,421

"Alkali-activated cement mortars containing recycled clay-based construction and demolition waste. Journal Ceramics-Silikaty"

F. Puertas, R. Santos, M.M. Alonso, M. Del Río.

Revista: Ceramics – Silikáty 59 (3) 202-210 (2015). ISSN 0862-5468

Índice de impacto JCR: 0,418

"Feasibility of Recycling CDW as Raw Material in Gypsum Composites"

A. San-Antonio-González, R. Santos Jiménez, M. del Río Merino, M. González Cortina and C. Vinas Arrebola.

Athens Journal of Technology & Engineering (AJTE). ISSN: 2241-8237.

Capítulo de libro

"New applications of ceramic waste generated in building rehabilitation works"

M. del Río Merino, R. Santos Jiménez, P. Villoria Sáez, M. González.

Mongraphic-eBook: The sustainable renovation of buildings and neighbourhoods, Bentham Science Publishers. eISBN: 978-1-66108-064-2, ISBN: 978-1-66108-065-9.

Congresos nacionales e internacionales

Título: REUSE OF CONSTRUCTION AND DEMOLITION RECYCLED AGGREGATES FOR THE PREPARATION OF ALKALI ACTIVATED CEMENT MORTARS. CHARACTERIZATION AND MECHANICAL BEHAVIOR.

Nombre del congreso: III International Congress on Construction and Building Research.

Tipo de participación: Ponencia.

Fecha de realización: 14/12/2015.

Ciudad: Escuela Técnica Superior de Edificación (Universidad Politécnica de Madrid).

Autores: María del Rocío Santos Jimenez; Mercedes del Río Merino.

Publicación: "Book of extended abstracts III International Congress on Construction and Building Research". pp. 153 - 154. ISBN 978-84-933567-6-7.

Título: WASTE 2 RESOURCES: VALORIZATION OF THE WASTE GENERATED IN BUILDING RETROFITTING WORKS. ECO-FRIENDLY GYPSUM MATERIALS.

Nombre del congreso: World Congress and Expo on Recycling.

Tipo de participación: Póster.

Fecha de realización: 20/07/2015.

Ciudad: Barcelona.

Autores: Mercedes del Río Merino; Paola Villoria Saez; Maria del Rocío Santos Jimenez; Alicia de San Antonio Gonzalez; Mariano Gonzalez Cortina; Jaime Santa Cruz Astorqui; Antonio Rodríguez Sanchez; Carmen Matilde Viñas Arrebola.

Título: GYPSUM COMPOSITES WITH CDW AS RAW MATERIAL.

Nombre del congreso: 17th international Conference on Architectural, Civil and Environmental Engineering.

Tipo de participación: Ponencia.

Fecha de realización: 13/07/2015.

Ciudad: Stockholm, Sweden.

Autores: María del Rocío Santos Jimenez; Alicia de San Antonio Gonzalez; Mercedes del Rio Merino; Mariano González Cortina; Carmen Matilde Viñas Arrebola.

Publicación: "International Science Index", pp. 646 - 650. ISBN1307-6892.

Título: PLASTER MATRIX WITH CONSTRUCTION AND DEMOLITION CERAMIC WASTE AS RAW MATERIAL.

Nombre del congreso: II International and IV national Congress on Sustainable Construction and Eco-Efficient Solutions.

Tipo de participación: Ponencia.

Fecha de realización: 25/05/2015.

Ciudad: Escuela Técnica Superior de Arquitectura (Universidad de Sevilla).

Autores: María del Rocío Santos Jimenez; Mercedes del Rio Merino; Mariano González Cortina.

Publicación: "Book of Abstracts II International and IV national Congress on Sustainable Construction and Eco-Efficient Solutions".pp. 1 - 11. ISBN 978-84-617-3963-9.

Título: PROYECTO W2R: VALORIZACIÓN INTEGRAL DE LOS RESIDUOS GENERADOS EN LA REHABILITACIÓN ENERGÉTICA DE EDIFICIOS. ECOMATERIALES DE YESO.

Nombre del congreso: II Jornada sobre Innovación en el Sector del Yeso.

Tipo de participación: Ponencia.

Fecha de realización: 17/04/2015.

Ciudad: Escuela Técnica Superior de Edificación (UPM).

Autores: Mercedes del Rio Merino; Paola Villoria Sáez; Alicia de San Antonio González; María del Rocío Santos Jimenez; Mariano González Cortina; Jaime Santa Cruz Astorqui; Antonio Rodríguez Sanchez; Carmen Matilde Viñas Arrebola.

Publicación: "II Jornada sobre Innovación en el sector del Yeso. Libro de resúmenes".pp. 25 - 29. ISBN 978-84-933567-1-2

Título: VIABILIDAD DE NUEVOS ECO-MATERIALES DE YESO CON CARGAS DE RESIDUO CERÁMICO.

Nombre del congreso: II Jornada sobre Innovación en el Sector del Yeso.

Tipo de participación: Ponencia.

Fecha de realización: 17/04/2015.

Ciudad: Escuela Técnica Superior de Edificación, Universidad Politécnica de Madrid.

Autores: María del Rocío Santos Jimenez; Mercedes del Rio Merino; Mariano González Cortina.

Publicación: "II Jornada sobre Innovación en el sector del Yeso. Libro de resúmenes".pp. 69 - 71. ISBN 978-84-933567-1-2.

Título: FEASIBILITY OF RECYCLING CDR AS RAW MATERIAL IN GYPSUM COMPOSITES.

Nombre del congreso: 4th Annual International Conference on Architecture.

Tipo de participación: Ponencia.

Fecha de realización: 07/07/2014.

Ciudad: Athens Institute for Education and Research (ATINER).

Autores: Alicia de San Antonio González; María del Rocío Santos Jimenez; Mercedes del Rio Merino; Mariano González Cortina; Carmen Matilde Viñas Arrebola.

Publicación: "Architecture Abstracts Fourth Annual International Conference on Architecture 7-10 July 2014,".pp. 90 - 91. ISBN 978-618-5065-56-0.

Título: NUEVOS MATERIALES DE YESO CON ADICIONES PROCEDENTES DE RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN.

Nombre del congreso: I Congreso Internacional sobre Investigación en Construcción y Tecnología Arquitectónicas. Architectural research findings: building construction, management, technology.

Tipo de participación: Ponencia.

Fecha de realización: 11/06/2014.

Ciudad: Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid (UPM).

María del Rocío Santos Jimenez; Alicia de San Antonio González; Mercedes del Rio Merino; Mariano González Cortina; Carmen Matilde Viñas Arrebola.

Publicación: "Libro de Actas Architectural research findings: building construction, management, technology".pp. 104 - 109. ISBN 978-84-617-0504-7.

Título: ANÁLISIS DE LA VIABILIDAD DEL YESO CON ADICIONES DE RESIDUO CERÁMICO PARA APLICACIÓN EN EDIFICACIÓN II.

Nombre del congreso: International Conference on Construction Research. Housing: past, present and future.

Tipo de participación: Ponencia.

Fecha de realización: 21/11/2013.

Ciudad: La Fundación Eduardo Torroja de Madrid.

María del Rocío Santos Jimenez; Mercedes del Rio Merino; Mariano González Cortina.

Publicación: "Resúmenes y Actas International Conference on Research in Construction Housing: past, present and future".pp. 150 - 151. ISBN 978-84-7292-422-2.

Título: ANÁLISIS DE LA VIABILIDAD DEL YESO CON ADICIONES DE RESIDUO CERÁMICO PARA APLICACIÓN EN EDIFICACIÓN I.

Nombre del congreso: Workshop on Environmental Impact os Buildings.

Tipo de participación: Ponencia.

Fecha de realización: 25/09/2013.

Ciudad: Escuela Técnica Superior de Edificación (UPM).

Autores: María del Rocío Santos Jimenez; Mercedes del Rio Merino; Mariano González Cortina.

Publicación: "LIBRO DE ACTAS:"Workshop on Environmental Impact of Buildings"".pp. 41 - 48. ISBN 978-84-695-8575-7.

Premios

2015 – Premio a la mejor comunicación “New applications of ceramic waste generated in building rehabilitation Works” en el Congreso “II International and IV National Congress on Sustainable Construction and Eco-Efficient Solutions”.

Artículo publicado en “Monographic-eBook: The sustainable renovation of buildings and neighbourhoods”.

2013 - Accésit otorgado al trabajo “Análisis de la viabilidad del yeso con adiciones de residuo cerámico para aplicación en edificación” por Gas Natural en los “V Premios de Investigación” de la Fundación Escuela de la Edificación y Colegio Oficial de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de Madrid.