

**RESIDUOS Y RECURSOS: ESTUDIO DE LA VIABILIDAD
DEL RECICLAJE DE RESIDUOS EN APLICACIONES
CONSTRUCTIVAS.**

**DESARROLLO DE PRODUCTOS DE YESO PARA REVESTIMIENTOS CON
RESIDUOS PLÁSTICOS Y DE MADERA.**

WASTES AND RESOURCES: STUDY OF THE VIABILITY OF THE
RECYCLING OF WASTES IN CONSTRUCTIVE APPLICATIONS.

DEVELOPMENT OF GYPSUM PRODUCTS FOR COVERINGS WITH PLASTIC AND
WOOD RESIDUES.

TESIS DOCTORAL / PHD DISSERTATION

Manuel Alejandro Pedreño Rojas

Sevilla, 2021

Directores / Supervisors

Dra. Carmen Rodríguez Liñán

Dra. Paloma Rubio de Hita

RESIDUOS Y RECURSOS: Estudio de la viabilidad del reciclaje de residuos en aplicaciones constructivas. Desarrollo de productos de yeso para revestimientos con residuos plásticos y de madera. / WASTES AND RESOURCES: Study of the viability of the recycling of wastes in constructive applications. Development of gypsum products for coverings with plastic and wood residues. Manuel Alejandro Pedreño Rojas. Sevilla, 2021.

Tesis doctoral realizada en el seno del Departamento de Construcciones Arquitectónicas I y del grupo de investigación PAIDI TEP-205 “Análisis y Evaluación de Sistemas Constructivos y Estructurales en la Arquitectura”, adscrito al Instituto Universitario de Arquitectura y Ciencias de la Construcción (IUACC) de la Universidad de Sevilla.



AGRADECIMIENTOS

Me gustaría aprovechar estas primeras palabras del documento para agradecer a todas las personas que me han acompañado durante el desarrollo de esta tesis, no habiendo sido posible realizarla sin su apoyo y ayuda:

- A mi directora, la Profesora Carmen Rodríguez Liñán, por haber apostado por mí en todo momento desde mi etapa como alumno interno hasta la actualidad. Por saber guiarme en todo este largo periodo con sus sabios consejos y recomendaciones en lo profesional y en lo personal. Gracias por su continua confianza, por todas las horas dedicadas y por su constante preocupación y ofrecimiento. Es y será siempre para mí un ejemplo a seguir.
- A la codirectora de este trabajo, la Profesora Paloma Rubio de Hita, por apoyarme y mostrarme su aprecio diariamente. Por sus constantes ideas y aportaciones que han dado calidad al trabajo que se presenta. Gracias por confiar en mí como investigador y docente desde el primer día. Su visión de la docencia y su buen trato para con el alumnado ha marcado mis inicios en esta bonita y apasionante etapa de la enseñanza universitaria.
- A mis compañeros del grupo TEP-205, por hacerme sentir como uno más desde el primer momento. A la Profesora y amiga María Jesús Morales, por haberme sabido dar las pautas para iniciarme en este emocionante y duro camino de la investigación. Siempre le estaré agradecido por sus sabios consejos en lo profesional y en lo personal. A la Profesora Filomena Pérez, por haberme escuchado y recomendado siempre que la he necesitado. Gracias por saber transmitirme la pasión por la docencia y por saber valorar mi trabajo.
- Al personal del Laboratorio de Construcciones Arquitectónicas I, Lidia Molina y Ana Crespo. Gracias por vuestra ayuda y predisposición infinita. Sin vuestra colaboración esta tesis no hubiese sido posible.
- Al resto del personal de administración y servicios del Departamento de Construcciones Arquitectónicas I, en especial a Macarena de Rojas, por su buen trato y su predisposición para facilitar cualquier trámite administrativo.
- A los compañeros y profesores de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura que durante esta etapa se han preocupado y han sabido darme ánimos para que esta tesis llegue a buen puerto.
- A los profesores del Instituto Superior Técnico de Lisboa Jorge de Brito e Inês Flores-Colen, por haberme recibido en sus instalaciones y por prestarme todo el apoyo necesario durante el periodo que estuve de estancia en el Centro. Igualmente, al profesor Jan Fořt, de la Czech Technical University in Prague, por haberme hecho sentir como en casa durante los cuatro meses que estuve trabajando en su Institución.
- A mis compañeros de la Universidad Politécnica de Madrid y de la Universidad de Burgos por su continuo apoyo y muestras de afecto.
- Por último, y no menos importante, a mi familia y amigos, por apoyarme en todas mis decisiones y darme ánimos día a día, haciendo que esta tesis sea hoy una realidad.

Se desea expresar un explícito agradecimiento a las diferentes instituciones que han contribuido a la financiación de la presente tesis doctoral:

- El autor de este trabajo ha sido beneficiario, durante cuatro años, de un contrato predoctoral de Formación del Profesorado Universitario (FPU), en la convocatoria de 2015 (ref. FPU15/02939), financiado por el Ministerio de Educación del Gobierno de España. Igualmente, ligada a dicha ayuda, se obtuvo una ayuda para la realización de una estancia de tres meses en el Instituto Superior Técnico de Lisboa (ref. EST17/00201). Por otro lado, se pudo realizar una estancia de investigación, de cuatro meses de duración, en la Czech Technical University in Prague gracias a la financiación recibida por el IUACC, dentro del VI Plan Propio de Investigación de la Universidad de Sevilla.
- Además, desde sus inicios, esta tesis ha estado estrechamente ligada a los objetivos expuestos en el proyecto de investigación del Plan Nacional I+D+i, al que se asoció el contrato predoctoral, “W2R: Valorización integral de los residuos generados en la rehabilitación energética de edificios” (ref. BIA2013-43061-R).

Resumen	1
Abstract	3

BLOQUE A

I. Introducción / Introduction	7
II. Objetivos	23
III. Metodología	25
IV. Resumen y discusión de los resultados	27
<i>Sección 1: Caracterización de nuevos compuestos y productos con base de yeso y residuos de madera.</i>	27
<i>Sección 2: Generación de nuevos compuestos y productos con base de yeso y residuos plásticos.</i>	37
<i>Sección 3: Reutilización de residuos de yeso como sustituto total y/o parcial del yeso comercial.</i>	44
<i>Sección 4: Desarrollo de materiales para revestimientos interiores con matriz de yeso reciclado y residuos plásticos.</i>	54
V. Conclusiones / Conclusions	59
Referencias	63
Listado de Figuras y Tablas	69

BLOQUE B

I. Publicaciones en revistas indexadas	75
<u>SECCIÓN 1</u>	
<i>Artículo 1:</i> Physical and mechanical properties of wood-gypsum composites from demolition material in rehabilitation works.	77
<i>Artículo 2:</i> Eco-efficient acoustic and thermal conditioning using false ceiling plates made from plaster and wood waste.	87
<i>Artículo 3:</i> Impact of wetting-drying cycles on the mechanical properties and microstructure of wood waste-gypsum composites.	105
<u>SECCIÓN 2</u>	
<i>Artículo 4:</i> Influence of polycarbonate waste on gypsum composites: Mechanical and environmental study.	125
<i>Artículo 5:</i> Reuse of CD and DVD wastes as reinforcement in gypsum plaster plates.	145
<u>SECCIÓN 3</u>	
<i>Artículo 6:</i> Influence of the heating process on the use of gypsum wastes in plasters: Mechanical, thermal and environmental analysis.	161
<i>Artículo 7:</i> Influence of gypsum wastes on the workability of plasters: Heating process and microstructural analysis.	177
<i>Artículo 8:</i> Life cycle assessment of natural and recycled gypsum production in the Spanish context.	193
<u>SECCIÓN 4</u>	
<i>Artículo 9:</i> Use of polycarbonate waste as aggregate in recycled gypsum plasters.	207
II. Comunicaciones publicadas en actas de congresos	221
<i>Comunicación 1:</i> Complementary techniques for the characterization of new construction materials: analysis and review.	223
<i>Comunicación 2:</i> Influencia de la incorporación de residuos de madera en el comportamiento térmico de compuestos de mortero y yeso. Aplicaciones en la rehabilitación de edificios.	237
<i>Comunicación 3:</i> Influence of wood and plastic waste as aggregates in gypsum plasters.	253
<i>Comunicación 4:</i> Eco-efficient false ceiling plates made from plaster with wood and plastic residues.	265

ANEXOS

A. Bibliografía	277
B. Relevancia científica de las revistas indexadas	291

RESUMEN

Actualmente nos encontramos en una situación de crisis medioambiental de múltiples dimensiones dentro del sector de la construcción. Los edificios construidos son causa directa de contaminación, produciendo residuos y siendo consumidores de una gran cantidad de energía. En este sentido, se potencia el uso de residuos en la generación de nuevos materiales. Sin embargo, a pesar del alto potencial de valorización de los residuos, la normativa que permite la implementación de dichos residuos en la producción de nuevos materiales y componentes para la construcción es escasa y restrictiva.

Con todo ello, el principal objetivo de esta tesis doctoral es avanzar en el estudio de la viabilidad y caracterización de nuevos materiales con base de yeso que incorporen residuos plásticos y de madera. Este objetivo se plantea con dos vertientes: la generación y caracterización de los nuevos materiales con prestaciones mejoradas (ligereza, comportamiento térmico y acústico, etc.) y en segundo lugar, su incorporación en edificación a través de productos, evaluando las posibles mejoras acústicas, térmicas y/o medioambientales de las soluciones aportadas según los casos.

En el primero de los bloques se analizó la influencia de residuos de madera, en forma de serrín y virutas, procedentes de la demolición de forjados de viviendas, en mezclas de yeso. Se observó que se pudo aportar hasta un 40% en peso de residuo (sobre el total de yeso empleado) alcanzando los valores mínimos de resistencia establecidos por la normativa. Además, la ligereza del material y su comportamiento térmico y acústico mejoraban considerablemente (hasta en un 24%) respecto a los valores de referencia. Así, se elaboraron y caracterizaron placas para falsos techos con propiedades mejoradas, estudiándose también la posible afección que tendrían al ser sometidas a cambios higrotérmicos (cuartos húmedos).

El segundo bloque se centra en la reutilización de residuos de policarbonato procedentes del reciclaje de CDs y DVDs en el desarrollo de productos de yeso. Al igual que en bloque anterior, se caracterizó el compuesto para posteriormente desarrollar unas placas de yeso que incorporen dichos desechos. En este caso, no sólo se obtuvo una mejora en la ligereza del material y en su comportamiento térmico, sino que además se alcanzó un incremento de sus capacidades resistentes (23%), para ciertos porcentajes de incorporación, respecto a los valores de control.

En la tercera sección se apuesta por trabajar directamente con la matriz de yeso, planteando la posibilidad de sustituir total o parcialmente el yeso comercial por otro reciclado. Se analizan para ello dos tipos de residuos de yeso: por un lado el procedente del proceso de desulfurización de gases en una central térmica (FGD) y por otro el obtenido de los desechos de producción de una planta de elaboración de paneles de yeso laminado. Se estudian los beneficios medioambientales y físico-mecánicos de esta sustitución, verificándose que es posible reutilizar los desechos de producción sin necesidad de someterlos a un proceso de calentamiento previo.

Finalmente, se consigue, con el último bloque, la generación de materiales de yeso completamente reciclados (matriz reciclada con agregado plástico) 100% aptos para su uso en construcción. Además de los claros beneficios medioambientales alcanzados, se llega a alcanzar una sustancial mejora en otras propiedades como la ligereza (48%), el comportamiento térmico (44%) o incluso sus capacidades mecánicas (27%) respecto al material de referencia.



Figura 1. Diagrama resumen de la Tesis Doctoral. Fuente: Elaboración propia.

ABSTRACT

We are currently in a situation of environmental crisis of multiple dimensions within the construction sector. Buildings are a direct cause of pollution, producing waste and consuming large amounts of energy. In this sense, the use of waste is promoted in the generation of new construction materials. However, despite the high potential for the recovery of waste, the regulations that allow the implementation of those waste in the production of new materials and products for construction is scarce and restrictive.

In that sense, the main objective of this PhD dissertation is to advance in the study of the viability and characterization of new gypsum-based materials that incorporate plastic and wood waste. This objective is proposed with two aspects: the generation and characterization of new materials with improved performance (lightness, thermal and acoustic behavior, etc.) and secondly, their incorporation into buildings through products, evaluating possible thermal-acoustic improvements and/or environmental impacts of the new solutions.

In the first section, the influence of wood residues, in the form of sawdust and wood shavings, from housing demolition works, in plaster mixtures was analysed. It was observed that it was possible to contribute up to 40% by weight of residue (on the total of gypsum used) reaching the minimum strength values established by the regulations. In addition, the lightness of the material and its thermal and acoustic behaviour improved considerably (up to 24%) compared to the reference values. Thus, false ceilings plates with improved properties were elaborated and characterized, also studying the possible damages that they would have when subjected to hygrothermal changes (wet rooms).

The second section focuses on the reuse of polycarbonate waste, from recycled CDs and DVDs, in the development of gypsum products. As in the previous part, the composite was characterized to later develop plasterboards made with those materials. In this case, not only an improvement in the lightness of the material and its thermal behavior was obtained, but also an increase in its strength capacities (23%) was achieved for certain percentages of incorporation, with respect to the control values.

In the third section, the gypsum-plaster matrix was studied, analysing the possibility of totally or partially replacing the commercial plaster with a recycled one. Two types of gypsum waste were analysed for this: the one obtained from the gas desulfurization process in a thermal power plant (FGD) and another taken from the production waste of a plasterboard manufacturing plant. The environmental and physical-mechanical benefits of this substitution were studied, verifying that it was possible to reuse the production waste without having to subject it to a previous heating process.

Finally, in the last part, the generation of a completely recycled plaster material (recycled matrix with plastic aggregate), 100% suitable for its use in construction, was obtained. In addition to the obvious environmental benefits, a substantial improvement in other properties such as lightness (48%), thermal behavior (44%) or even its mechanical capacities (27%) was achieved compared to the reference material.

BLOQUE A

I. Introducción / Introduction

II. Objetivos

III. Metodología

IV. Resumen y discusión de los resultados

Sección 1: Caracterización de nuevos compuestos y productos con base de yeso y residuos de madera.

Sección 2: Generación de nuevos compuestos y productos con base de yeso y residuos plásticos.

Sección 3: Reutilización de residuos de yeso como sustituto total y/o parcial del yeso comercial.

Sección 4: Desarrollo de materiales para revestimientos interiores con matriz de yeso reciclado y residuos plásticos.

V. Conclusiones / Conclusions

Referencias

Listado de Figuras y Tablas

I. INTRODUCCIÓN

Generalidades

Actualmente nos encontramos en una situación de crisis ambiental de múltiples dimensiones dentro del sector de la construcción. Los edificios construidos son causa directa de contaminación, produciendo residuos y siendo consumidores de una gran cantidad de energía. El creciente interés por un desarrollo sostenible y un uso eficiente de la energía en los diferentes sectores, y en particular en el de la edificación, se plasma en una serie de medidas legales que se derivan de la transposición de la Directiva 2002/91/CE de eficiencia energética de los edificios. Así, la necesidad de adaptación del parque de viviendas existente a la nueva normativa en vigor para la reducción del consumo energético y de las emisiones de CO₂ genera un volumen importante de viviendas susceptibles de rehabilitación y/o renovación. Se abre así un amplio paradigma sobre el que es necesario actuar.

Ya en el Congreso Nacional de Medioambiente (2010) los expertos consideraron que, en España, un total de 1,8 millones de viviendas están en estado ruinoso, en mal estado o en estado deficiente, y casi el 60% se construyeron sin tener en cuenta ninguna normativa mínima de eficiencia energética. Este hecho, ligado a un aumento de las obras de rehabilitación, supone la generación de grandes cantidades de Residuos de Construcción y Demolición (RCD), que junto con los procedentes de obras de nueva planta, deben ser correctamente gestionados. En 2015, según los datos aportados por la Asociación Española de Reciclaje de Residuos de Construcción y Demolición, en España se generó aproximadamente un total de 20,17 millones de toneladas de RCD de los cuales un 24,6 % procedieron de la rehabilitación de viviendas. Del total de residuos generado ese año, un 40,9 % tuvo una correcta valorización. Dicho dato se aleja considerablemente del 70 % marcado como objetivo para el año 2020 por parte de la Directiva Europea de Residuos y el Programa Marco de Residuos PEAR. Dichas normativas pretenden introducir un nuevo enfoque que no sólo considere la fase de residuo sino todo el ciclo de vida de los productos y materiales, de manera que se reduzca el impacto que la generación de residuos causa al medioambiente y regular su gestión.

Por otro lado, es evidente que actualmente existe una demanda creciente de materiales plásticos. En el año 2019, la producción de la Unión Europea fue de 57.9 millones de toneladas. Este crecimiento en el consumo de materiales plásticos genera un aumento paralelo en la generación de residuos que, si no son reciclados, mayoritariamente acaban siendo vertidos en el medio marino originando su degradación y contaminación.

Ya en el año 2010, se introdujeron entre 4.8 y 12.7 millones de toneladas de plásticos en los entornos oceánicos y se estima que las piezas de plástico flotan en los océanos del mundo superan los 5 billones de toneladas. En 2015, la Comisión Europea adoptó un Plan de Acción de la UE para una economía circular. Se identificaron los plásticos como una prioridad clave y se comprometió a preparar una estrategia que tuviera en cuenta el ciclo de vida de los plásticos. En 2017, la Comisión confirmó que se en garantizar que todos los envases de plástico sean reciclables para 2030.

El reciclaje de los residuos plásticos está experimentando un crecimiento continuo. Según el último informe de Plastics Europe (2019), ese año se recogieron 29.1 millones de toneladas de residuos plásticos para su posterior tratamiento a través de los esquemas de recogida oficiales de la Unión Europea, consiguiéndose que se reciclase más plástico del que se depositó en vertederos. De esta cantidad el 32.5% se recuperó mediante procesos de reciclado, el 42.6% recuperación de energética, aunque aún el 24.9% se destinó a vertederos.

A nivel nacional, España está a la cola en tasas de reciclaje en la UE (en 2016 ocupó la posición 21 de los 30 países). De los 2.3 millones de Toneladas de residuos plásticos recogidos, el 46% a fue destinado a vertedero. Según Cicloplast, el destino mayoritario del plástico reciclado es para su uso en el sector de envases (el 80% del total reciclado). En el sector de la construcción, aun siendo un gran consumidor de plásticos (casi el 20% de la producción), la tasa de reciclaje apenas alcanza el 4%.

Aunando ambos aspectos, en España, tras la finalización en 2015 del Plan Nacional Integral de Residuos (PNIR), existe en la actualidad, y con vigencia hasta 2022, el denominado como Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos (PEMAR). Éste introduce determinadas modificaciones al anterior plan con el objetivo de mejorar y actualizar la información relativa a la producción y gestión de residuos, para incluir las previsiones sobre la evolución de la generación de residuos y su tratamiento y por último, para ajustar las medidas necesarias para cumplir con los objetivos legales en los plazos establecidos.

Igualmente, dentro de los objetivos marcados por la Unión Europea en la denominada Agenda 2030 se muestra claramente la voluntad por reducir las emisiones de residuos, así como de promover una arquitectura mucho más sostenible y concienciada con el medioambiente.

En lo referente al uso de residuos en la generación de nuevos materiales es importante resaltar que, a pesar del alto potencial de valorización de los residuos, la normativa que permite la implementación de dichos residuos en la producción de nuevos materiales y componentes para la construcción es escasa y restrictiva.

Aún falta normativa que establezca recomendaciones que contemplen la valorización de otras categorías de residuos como materia prima en la fabricación de materiales reciclados. Por este motivo, uno de los principales problemas que adolecen los materiales reciclados, es la falta de consideración por parte de los fabricantes, que no contemplan su reutilización como materia prima alternativa, así como el desconocimiento por parte de prescriptores y responsables de obra de sus posibilidades y prestaciones.

La legislación vigente sobre materiales reciclados se centra principalmente en la normalización del reciclaje de materiales en hormigón estructural (Jiménez-Montoya et al., 2009; Silva et al., 2014), material en el que se permite el uso de áridos procedentes de residuos. Aparte de las regulaciones existentes muchos investigadores, principalmente en Portugal y España, han estudiado el comportamiento del hormigón cuando se mezcla con diferentes proporciones de árido reciclado procedente de RCD (Pedro et al., 2014; Bravo et al., 2015; Lima et al., 2010; Carro et al., 2015; Sánchez de Rojas et al., 2006; Poon et al., 2009) o cuando se utilizan cenizas de madera o residuos cerámicos como materiales de sustitución de cemento, los cuales son utilizados principalmente por sus propiedades puzolánicas. Además, se ha estudiado la aplicación de estos nuevos materiales en los productos de construcción, como bloques de construcción de hormigón o adoquines (Soustos et al, 2011; Poon y Chan, 2006).

Aparte de hormigón estructural y los nuevos productos estudiados con sus diversas aplicaciones, la investigación también se ha centrado en el uso de áridos reciclados para la elaboración de morteros. Los investigadores han analizado hasta ahora residuos de cerámica como un árido reciclado en la producción de mortero u hormigón, o como un sustituto del cemento. Los residuos cerámicos reutilizados (Silva et al., 2009) provienen principalmente de azulejos manufacturados, piezas sanitarias o ladrillos (Naceri y Hamina, 2009; Gomes y de Brito, 2009), que se muelen para su incorporación junto con el cemento (Mahdi et al, 2010) como una forma de sustituto de cemento en la producción de mortero (Liguori et al., 2014) o como una adición. En cuanto a su uso como sustituto de los áridos naturales, las fracciones más gruesas se han utilizado como agregados en la producción de hormigón y las piezas más finas como árido reciclado en la elaboración de morteros.

Reutilización de residuos de madera en la generación de nuevos materiales y productos de construcción

En el caso de la madera, algunos autores han investigado su uso, en diversas formas y proporciones, como agregado para el desarrollo de nuevos materiales compuestos a base de cemento o yeso, y se han realizado numerosas investigaciones de compuestos maderacemento (Jorge et al., 2004). En 2016, Corinaldesi et al. (2016) estudiaron el uso de residuos de madera para reemplazar la arena en la preparación de morteros de cemento, obteniendo morteros compuestos con propiedades térmicas mejoradas. En la misma línea, algunos investigadores estudiaron la ceniza de madera como reemplazo parcial del cemento, sin embargo, los valores resultantes así obtenidos no cumplieron con los estándares requeridos (Elinwa et al., 2002; Cheah et al., 2011; Siddique, 2012). También se ha estudiado la adición de virutas de madera previamente tratadas con agua como reemplazo parcial del agregado fino en la generación del nuevo hormigón (Mohammed et al., 2014). Coatanlem y et al. (2005) analizaron la durabilidad de estos nuevos hormigones al ser sometidos a ambientes húmedos y secos, y demostraron la factibilidad de utilizar estos compuestos en la construcción, logrando un comportamiento óptimo cuando las astillas de madera estaban saturadas en una solución de silicato de sodio. Asimismo, Bederina et al. (2008) examinaron el uso de otros tratamientos y sus efectos sobre la resistencia de los hormigones madera-arena recién generados, concluyendo que no era necesario un tratamiento previo de los residuos de madera cuando se agregaban a mezclas a base de cemento.

Por otro lado, la investigación sobre las mezclas de yeso y madera es escasa. En las investigaciones de Dai et al. (2015) obtuvieron un producto con una resistencia a la flexión y a la compresión de 3.36 MPa y 8.73 MPa, respectivamente, mientras usaban un tratamiento de recubrimiento por pulverización epoxi a base de agua.

Hay pocos productos de nueva fabricación hechos de materiales compuestos que contienen desechos de madera. Del Río-Merino et al. (1999) patentó una placa de yeso aligerada mediante la adición de corcho para uso directo en la construcción, y que mejoró las propiedades térmicas y acústicas. Turgut et al. (2007) propusieron el uso de aserrín en la fabricación de ladrillos de piedra caliza, con un 30% de residuos de madera, lo que hizo que el producto fuera más ligero y, por tanto, más factible para múltiples aplicaciones de construcción. Otros investigadores han desarrollado nuevos paneles acústicos con materiales reciclados (Ricciardi et al., 2014), mientras que Wang et al. (2016) han planteado la fabricación de tableros de partículas aglomerados de cemento con aislamiento acústico y térmico que contienen residuos de madera CDW.

Empleo de residuos plásticos como agregados en el desarrollo de materiales y productos para la construcción

Para encontrar un uso alternativo a las grandes cantidades de plásticos que simplemente terminan en vertederos, muchos investigadores han estudiado el uso de desechos plásticos en la producción de nuevos materiales de construcción con propiedades mejoradas (Siddique et al., 2008; Ismail y Al-Hashmi, 2008; Saikia y de Brito, 2012; Gu y Ozbakkaloglu, 2016; Sharma y Bansal, 2016).

Uno de los plásticos más investigados es el tereftalato de polietileno (PET), procedente de botellas de plástico recicladas, que se utiliza en mezclas con matriz de yeso en pesos de hasta el 20%. Algunos autores afirman que aumentar el porcentaje de plástico conduce a compuestos más ligeros y con mejor comportamiento térmico, pero en detrimento de sus capacidades mecánicas (Karaman et al., 2006). La adición de residuos de PET al hormigón está destinada a reemplazar el uso de agregados naturales y, cuando esto ocurre, se analiza de cerca el comportamiento de abrasión mecánica de los compuestos resultantes. Se ha

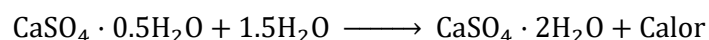
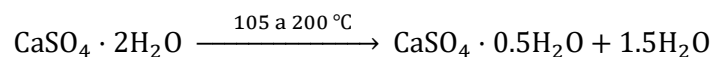
logrado un reemplazo máximo del 15% en volumen de agregado natural en mezclas de concreto, sin embargo, las propiedades de resistencia se deterioran cuando se agrega PET, aunque la resistencia a la abrasión es mejor que la del concreto de referencia (Saikia y de Brito, 2014). Los investigadores también han estudiado los residuos de PET en morteros de cemento (Hannawi et al., 2010; Ge et al., 2014; Da Silva et al., 2014).

Se han utilizado diferentes tipos de residuos de espuma plástica para crear nuevos compuestos de yeso ligero. Los investigadores que analizaron las propiedades mecánicas de los revocos de yeso cuando se agregaron residuos de poliestireno expandido (EPS) encontraron que la resistencia de las mezclas disminuía a medida que aumentaba el porcentaje de residuos, aunque el compuesto resultante era más ligero (San Antonio González et al., 2015). González-Madariaga y Macia (2008) utilizaron residuos de EPS en la preparación de paneles de revestimiento de yeso para su uso en la construcción, y otros autores (Gutiérrez-González et al., 2012) han analizado el uso de residuos de espuma de poliuretano (PUR) como agregado en compuestos de yeso, aplicando una relación de volumen máximo de residuos de espuma de poliuretano / yeso de 4/1. En este caso, se encontró que los compuestos eran más ligeros y su conductividad térmica mejoraba cuando aumentaban los porcentajes de residuos de PUR. Aunque su adherencia y propiedades mecánicas disminuyeron, los valores obtenidos se encuentran por encima de los requisitos mínimos de la norma (UNE-EN 13279-1, 2006). Estos compuestos de PUR / yeso también se han utilizado para crear paneles de cartón-yeso, reforzados con fibras de polipropileno, y se encontró que se mejoraron las propiedades térmicas (Alameda et al., 2016). Se ha creado nuevo hormigón ligero utilizando residuos de espuma PUR (Mounanga et al., 2008), y San Antonio González et al. (2015) han investigado la influencia de los residuos de poliestireno extruido (XPS) en compuestos a base de yeso.

Hay muchos otros estudios que han desarrollado nuevos compuestos ligeros de yeso, cemento y hormigón como resultado de la adición de diferentes agregados plásticos, por ejemplo: tuberías de PVC (Kou et al., 2009), residuos de bolsas de plástico (Ghernouti y Rabehi, 2012), plástico procedente del reciclaje de dispositivos electrónicos (Bulut y Şahin, 2017), residuos de polietileno (Jassim, 2017) y fibras de diatomita y polipropileno (Gencil et al., 2016).

Investigaciones basadas en el empleo de yeso reciclado como sustituto del comercial

El yeso comercial para la construcción ($\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$ - sulfato de calcio hemihidrato / bassanita) se produce calentando roca de yeso natural ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ - sulfato de calcio dihidratado / yeso) en aire a 105 °C a 200 °C. Para producir yeso, el yeso comercial debe mezclarse con agua, produciendo una reacción exotérmica. Después de esa reacción, el material se rehidrata, volviendo a su composición química original nuevamente (ec. 2) (Gartner, 2009; Fořt y Černý, 2018; Erbs et al., 2018).



El hecho de que la composición química del yeso no cambie lo convierte en un material completamente reciclable. Ante este hecho, teóricamente es posible solucionar uno de los principales problemas que presenta actualmente el sector de la construcción: la generación de grandes cantidades de residuos y su correcta gestión (Pacheco-Torgal, 2013). En el mundo, más de 15 millones de toneladas de desechos de yeso de placas de yeso se envían a vertederos cada año (Ahmed et al., 2011). Por tanto, la reutilización de residuos de yeso como sustitución de yeso comercial en la preparación de revocos y productos prefabricados

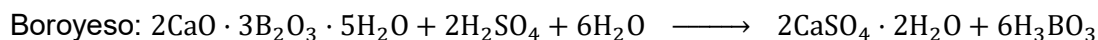
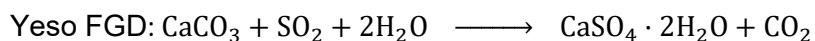
(placas de yeso y bloques) es una línea de investigación que algunas investigaciones han abordado durante los últimos años (Begliardo et al., 2013; Erbs et al., 2015; Papailiopolou et al., 2017).

En ese sentido, fueron muy relevantes las aportaciones de Jiménez-Rivero y García-Navarro (2016, 2017). Han analizado el coste del reciclaje de los residuos de yeso de las placas de yeso (GPW) desde el punto de vista económico y medioambiental. Encontraron que el 87% de los GPW se depositan en vertederos en la UE-28 y desarrollaron una investigación en la que utilizaron GPW como sustituto parcial del yeso comercial en yesos y placas de yeso (Jiménez-Rivero y García-Navarro, 2017).

Fernández-Casado (2010) a partir de datos de una empresa productora de cartón-yeso, en términos de consumo energético, económico, reducción de residuos, entre otros, definió las ventajas de la reutilización de residuos de cartón-yeso para generar nuevos paneles. Geraldo et al. (2017) evaluaron la reciclabilidad de los residuos de yeso de placas de yeso mediante el análisis de las propiedades mecánicas y fisicoquímicas después de múltiples ciclos de humectación y secado. No observaron descensos importantes en términos de comportamiento mecánico después de cada ciclo. Un procedimiento similar también fue realizado por Erbs et al. (2018). Alcanzaron una resistencia a la compresión de 8,40 MPa después de tres ciclos de reciclaje.

La influencia de diversas temperaturas de calcinación (160 °C, 180 °C y 200 °C) y tiempos (1, 2, 4, 8 y 24 h) también fue evaluada por Erbs et al. (2015). Encontraron que los mejores resultados de resistencia mecánica se obtuvieron a 180 °C durante 24 horas. En ese sentido, Rossetto et al. (2016) fijaron la temperatura de calcinación en 150 °C, utilizando diferentes periodos de calentamiento (1, 2, 3, 4, 5 y 6 h). Cuando utilizaron GPW en yesos, obtuvieron una peor trabajabilidad del material, mientras que aumentaron la resistencia a la compresión y la dureza superficial de las pastas.

Existen otros tipos de residuos de yeso, conocidos como yesos sintéticos, que provienen de diferentes procesos industriales y tienen la misma composición química que el yeso natural (Wirsching et al., 1994; Lushnikova y Dvorkin, 2016). Hoy en día muchos fabricantes los utilizan como sustitución total o parcial del yeso comercial. El yeso, el fosfoyeso y el boroyeso por desulfuración de gases de combustión (FDG) son los más comunes (Meawad et al., 2010). Sus reacciones químicas para la obtención del yeso sintético se muestran en las siguientes ecuaciones:



El yeso FGD como sustituto parcial del yeso comercial se utiliza ampliamente en algunos países como Alemania, Bélgica, Reino Unido o Francia (Eurogypsum, 2018). Sin embargo, según la Asociación Estadounidense de Cenizas de Carbón, en 2016 se produjeron más de 32 millones de toneladas de yeso FGD en Estados Unidos, de las cuales el 42,6% se destinó a vertederos. Por ello, existe un importante interés de muchos investigadores y empresas por seguir impulsando el uso del yeso FGD en diferentes áreas: producción de placas de yeso, cemento y compuestos de hormigón, y usos agrícolas (Lee et al., 2012; Lei et al., 2017; Watts y Dick, 2014). Tesarek y col. (2007) fue uno de los primeros en brindar información representativa completa sobre las propiedades mecánicas, térmicas e hídricas del yeso FGD calcinado. Sus resultados mostraron que las propiedades mecánicas de los materiales eran muy altas y competitivas, y se producía una pérdida significativa cuando aumentaba la

humedad. En ese sentido, Leiva et al. (2010) realizaron paneles de yeso compuestos de yeso 100% FGD para determinar su resistencia al fuego. Concluyeron que la capacidad de aislamiento de los paneles de yeso FGD era mayor que la de las placas de yeso comerciales. Estos resultados están de acuerdo con los de Zhang et al. (2016), quienes observaron una mejora en la conductividad térmica del yeso cuando se agregó yeso FGD.

El análisis de la huella de carbono de la producción de yeso FGD para aplicaciones de construcción fue analizado por Fort y Cerný (2018). Sus resultados mostraron que la huella de carbono era un 25,2% menor que la de la fabricación de yeso natural. Además, Suarez et al. (2016) produjeron cemento Portland ordinario en el que el 5% del yeso comercial se reemplazó con GPW como retardador de fraguado. Se evaluaron los beneficios ambientales, en términos de consumo de energía y emisiones de CO₂. Descubrieron que el proceso de producción de GPW consumía menos del 65% de la energía necesaria para producir yeso comercial y emitía menos del 65% de los gases de efecto invernadero. Finalmente, el consumo de energía de varios procesos de calentamiento fue evaluado por Camarini et al. (2016). Analizaron la influencia de diferentes temperaturas (120 °C, 150 °C y 200 °C) y tiempos de calcinación (1, 2, 5, 8, 16 y 24 h), concluyendo que la calcinación a 150 °C tuvo el mejor comportamiento.

Conclusiones

De todo lo anterior se puede deducir que no abundan las investigaciones que emplean diversos tipos de residuos en la creación de nuevos materiales con base de yeso, siendo, hasta el momento, mínimos los estudios que emplean este tipo de residuos para el diseño de nuevos productos constructivos. Igualmente, no existen investigaciones previas que hayan incorporado agregado alguno en mezclas de yeso con una matriz total o parcialmente reciclada. Por todo ello, plantear nuevas investigaciones en este campo supone mejorar los objetivos planteados para el sector.

El uso del residuo de madera surge a raíz de la tradición investigadora del Grupo TEP-205 al que pertenezco. Desde su fundación, sus integrantes han trabajado en el análisis de estructuras horizontales y cubiertas de madera, típicas de la mayoría de edificios históricos de la ciudad. En la intervención o rehabilitación de algunos de estos edificios se observó la importante cantidad de residuo de madera que se obtenía de las mismas, planteándose por ello su uso en esta Tesis.

Por otro lado, se apreció que el policarbonato es uno de los plásticos con mejores capacidades resistentes. En esta línea, y debido a la facilidad que suponía tomar este residuo de los desechos de CDs y DVDs generados en nuestra Universidad, este trabajo plantea su utilización como agregado en las mezclas de yeso.

A raíz de una estancia en el Instituto Superior Técnico de Lisboa, se pretende avanzar en la investigación y no sólo emplear los residuos como agregados en las mezclas de yeso, sino que fuese el propio material base, la matriz, la que también fuese reciclada. El yeso, es un material eternamente reciclable, pues su cíclica composición química no varía.

Por tanto, en definitiva, tomando los agregados plásticos y de madera que antes teníamos, junto con la matriz de yeso reciclado, se pretende generar nuevos materiales y productos mucho más limpios, más eficientes y 100% reciclados.

Organización y estructura de la Tesis

La presente Tesis Doctoral se ha realizado siguiendo las directrices de la modalidad de compendio de publicaciones recogida en la normativa que rige los estudios de Doctorado en

la Universidad de Sevilla. Para ello, y tras la realización de una breve introducción justificativa del trabajo, se han definido los objetivos del mismo, así como la metodología planteada para alcanzarlos. Un escueto resumen de los resultados obtenidos en los diferentes artículos, así como las principales conclusiones obtenidas, cierran lo que se ha denominado el Bloque A de este trabajo. Por su parte, el Bloque B queda compuesto por los nueve artículos científicos publicados, cuya unión hace que esta Tesis posea entidad. Finalmente, se aportan en este segundo bloque las comunicaciones a congresos elaboradas hasta la fecha y que complementan el contenido de los artículos.

Todos los resultados que dan cuerpo a esta Tesis Doctoral ya se han publicado en nueve artículos científicos, todos ellos en revistas de alto índice de impacto indexadas en *el Journal Citation Reports* (JCR). Así, los diferentes artículos se han publicado en las siguientes revistas: *Construction and Building Materials* (1 artículo; Q1), *Journal of Cleaner Production* (4 artículos; Q1), *Journal of Building Engineering* (1 artículo; Q1) y *Materials* (3 artículos, Q2).

Los resultados obtenidos en este trabajo se han agrupado en cuatro secciones diferenciadas, que dan respuesta a los cuatro objetivos específicos definidos en el capítulo 2 de este primer bloque:

Sección 1: Caracterización de nuevos compuestos y productos con base de yeso y residuos de madera.

En esta primera sección se analiza la influencia de incorporar los residuos de madera como agregados en las mezclas de yeso. Así, se comienza realizando una completa caracterización de los compuestos para, a raíz de ella, diseñar y elaborar placas para falsos techos generadas con dichas pastas. Por último, se analiza la posible afección de estos materiales ante cambios higrotérmicos (uso en locales húmedos).

El contenido de esta primera sección queda recogido en los siguientes artículos publicados:

- **Artículo 1:** 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*, 114, 6-14. ¹
- **Artículo 2:** Pedreño-Rojas, M. A., Morales-Conde, M. J., Pérez-Gálvez, F., Rodríguez-Liñán, C. (2017). Eco-efficient acoustic and thermal conditioning using false ceiling plates made from plaster and wood waste. *Journal of Cleaner Production*, 166, 690-705.
- **Artículo 3:** Pedreño-Rojas, M. A., Morales-Conde, M. J., Rubio-de-Hita, P., Pérez-Gálvez, F. (2019). Impact of Wetting–Drying Cycles on the Mechanical Properties and Microstructure of Wood Waste–Gypsum Composites. *Materials*, 12(11), 1829.

Sección 2: Generación de nuevos compuestos y productos con base de yeso y residuos plásticos.

La segunda sección tiene como principal objetivo estudiar los beneficios de añadir el residuo de policarbonato en las mezclas de yeso. En esta línea, tras una exhaustiva caracterización de los compuestos, se propuso emplear el residuo de CDs y DVDs en la generación de placas de yeso para revestimientos interiores.

¹ El Artículo 1 no cumple con los requisitos de autoría estipulados por la EIDUS para su cómputo como parte de este compendio de publicaciones. Sin embargo, al haberse superado el requisito mínimo exigido para la realización de la Tesis por esta modalidad, se decide incluir este artículo pues resulta fundamental para la correcta comprensión de la tesis, siendo el germen de la misma a raíz de un TFM anterior.

Los resultados alcanzados en la segunda sección se recogen en los siguientes artículos:

- **Artículo 4:** Pedreño-Rojas, M. A., Morales-Conde, M. J., Pérez-Gálvez, F., Rubio-de-Hita, P. (2019). Influence of polycarbonate waste on gypsum composites: Mechanical and environmental study. *Journal of Cleaner Production*, 218, 21-37.
- **Artículo 5:** Pedreño-Rojas, M. A., Morales-Conde, M. J., Pérez-Gálvez, F., Rubio-de-Hita, P. (2020). Reuse of CD and DVD Wastes as Reinforcement in Gypsum Plaster Plates. *Materials*, 13(4), 989.

Sección 3: Reutilización de residuos de yeso como sustituto total y/o parcial del yeso comercial.

A raíz de una estancia de investigación, tutorizada por el Prof. Jorge de Brito en el Instituto Superior Técnico de Lisboa, se plantea la posibilidad de que el material base (el yeso de la matriz) fuese también reciclado. En esa línea se analizan diversos tipos de yeso y se consigue el desempeño óptimo para su empleo en la generación de nuevos materiales y productos como sustituto total o parcial del yeso comercial. Posteriormente, los beneficios mediambientales de emplear este residuo quedan contrastados mediante el análisis de ciclo de vida (ACV) llevado a cabo conjuntamente con investigadores de la Czech Technical University in Prague de República Checa.

El contenido de esta tercera sección queda recogido en los siguientes artículos publicados:

- **Artículo 6:** Pedreño-Rojas, M. A., Flores-Colen, I., De Brito, J., Rodríguez-Liñán, C. (2019). Influence of the heating process on the use of gypsum wastes in plasters: Mechanical, thermal and environmental analysis. *Journal of Cleaner Production*, 215, 444-457.
- **Artículo 7:** Pedreño-Rojas, M. A., De Brito, J., Flores-Colen, I., Pereira, M. F. C., Rubio-de-Hita, P. (2020). Influence of gypsum wastes on the workability of plasters: Heating process and microstructural analysis. *Journal of Building Engineering*, 29, 101143.
- **Artículo 8:** Pedreño-Rojas, M. A., Fořt, J., Černý, R., Rubio-de-Hita, P. (2020). Life cycle assessment of natural and recycled gypsum production in the Spanish context. *Journal of Cleaner Production*, 253, 120056.

Sección 4: Desarrollo de materiales para revestimientos interiores con matriz de yeso reciclado y residuos plásticos.

Una vez obtenidos los resultados de las tres secciones anteriores, se analizan conjuntamente los valores obtenidos con el objetivo de generar un material 100% reciclado que aune los agregados plásticos estudiados en una matriz de yeso reciclado.

Los resultados alcanzados en la cuarta, y última, sección se recogen en el siguiente artículo:

- **Artículo 9:** Pedreño-Rojas, M. A., Rodríguez-Liñán, C., Flores-Colen, I., de Brito, J. (2020). Use of polycarbonate waste as aggregate in recycled gypsum plasters. *Materials*, 13(14), 3042.

I. INTRODUCTION

General aspects

We are currently in a situation of environmental crisis of multiple dimensions within the construction sector. Constructed buildings are a direct cause of pollution, producing waste and consuming a large amount of energy. The growing interest in sustainable development and an efficient use of energy in the different sectors, and in particular in the building sector, is reflected in a series of legal measures derived from the transposition of Directive 2002/91 / EC energy efficiency of buildings. Thus, the need to adapt the existing housing stock to the new regulations in force for the reduction of energy consumption and CO2 emissions generates a significant volume of homes that can be rehabilitated and / or renovated. This opens up a broad paradigm on which it is necessary to act.

Already in the National Environmental Congress (2010), experts considered that, in Spain, a total of 1.8 million homes are in a dilapidated state, in poor or deficient state, and almost 60% were built without taking into account has no minimum energy efficiency regulations. This fact, linked to an increase in rehabilitation works, implies the generation of large amounts of Construction and Demolition Waste (RCD), which, together with that from new plant works, must be properly managed. In 2015, according to the data provided by the Spanish Association for the Recycling of Construction and Demolition Waste, approximately a total of 20.17 million tons of RCD was generated in Spain, of which 24.6% came from the renovation of homes. Of the total waste generated that year, 40.9% had a correct recovery. This data is considerably far from the 70% set as a target for 2020 by the European Waste Directive and the PEMAR Waste Framework Program. These regulations aim to introduce a new approach that not only considers the waste phase but also the entire life cycle of products and materials, so as to reduce the impact that waste generation causes on the environment and regulate its management.

On the other hand, it is clear that there is currently a growing demand for plastic materials. In 2019, the production of the European Union was 57.9 million tons. This growth in the consumption of plastic materials generates a parallel increase in the generation of waste that, if not recycled, mostly ends up being dumped into the marine environment, causing its degradation and contamination.

As early as 2010, between 4.8 and 12.7 million tons of plastics were introduced into ocean environments and it is estimated that pieces of plastic float in the world's oceans exceed 5 trillion tons. In 2015, the European Commission adopted an EU Action Plan for a circular economy. Plastics were identified as a key priority and he undertook to prepare a strategy that takes into account the life cycle of plastics. In 2017, the Commission confirmed that it will ensure that all plastic packaging is recyclable by 2030.

The recycling of plastic waste is experiencing continuous growth. According to the latest Plastics Europe report (2019), that year 29.1 million tons of plastic waste were collected for subsequent treatment through the official collection schemes of the European Union, achieving that more plastic was recycled than was deposited in landfills. Of this amount, 32.5% was recovered through recycling processes, 42.6% by energy recovery, although 24.9% was still destined for landfills.

At the national level, Spain is behind in recycling rates in the EU (in 2016 it ranked 21st out of 30 countries). Of the 2.3 million tons of plastic waste collected, 46% was destined for landfill. According to Cicloplast, the majority destination of recycled plastic is for use in the packaging

sector (80% of the total recycled). In the construction sector, even though it is a large consumer of plastics (almost 20% of production), the recycling rate barely reaches 4%.

Combining both aspects, in Spain, after the completion in 2015 of the National Comprehensive Waste Plan (PNIR), there is currently, and valid until 2022, the so-called State Waste Management Framework Plan (PEMAR). It introduces certain modifications to the previous plan in order to improve and update the information related to waste production and management, to include forecasts on the evolution of waste generation and its treatment and finally, to adjust the necessary measures to meet legal objectives within the established deadlines.

Likewise, within the objectives set by the European Union in the so-called Agenda 2030, the will to reduce waste emissions is clearly shown, as well as to promote a much more sustainable and environmentally aware architecture.

Regarding the use of waste in the generation of new materials, it is important to highlight that, despite the high potential for waste recovery, the regulations that allow the implementation of said waste in the production of new materials and components for construction is scarce and restrictive.

There is still a lack of regulations that establish recommendations that consider the recovery of other categories of waste as raw material in the manufacture of recycled materials. For this reason, one of the main problems that recycled materials suffer is the lack of consideration by manufacturers, who do not contemplate their reuse as an alternative raw material, as well as the ignorance on the part of specifiers and construction managers of their possibilities and benefits.

The current legislation on recycled materials focuses mainly on the standardization of the recycling of materials in structural concrete (Jiménez-Montoya et al., 2009; Silva et al., 2014), material in which the use of aggregates from waste is allowed. Apart from the existing regulations, many researchers, mainly in Portugal and Spain, have studied the behavior of concrete when mixed with different proportions of recycled aggregate from RCD (Pedro et al., 2014; Bravo et al., 2015; Lima et al., 2010; Carro et al., 2015; Sánchez de Rojas et al., 2006; Poon et al., 2009) or when wood ash or ceramic residues are used as cement substitution materials, which are used mainly by its pozzolanic properties. In addition, the application of these new materials in construction products, such as concrete building blocks or pavers, has been studied (Soustos et al, 2011; Poon and Chan, 2006).

Apart from structural concrete and the new products studied with their various applications, research has also focused on the use of recycled aggregates for the preparation of mortars. Researchers have so far analyzed ceramic waste as a recycled aggregate in the production of mortar or concrete, or as a substitute for cement. Reused ceramic waste (Silva et al., 2009) comes mainly from manufactured tiles, sanitary pieces or bricks (Nacéri and Hamina, 2009; Gomes and de Brito, 2009), which are ground for incorporation together with cement (Mahdi et al, 2010) as a form of cement substitute in mortar production (Liguori et al., 2014) or as an addition. Regarding its use as a substitute for natural aggregates, the coarsest fractions have been used as aggregates in the production of concrete and the finest pieces as recycled aggregates in the preparation of mortars.

Reuse of Wood waste in the generation of new building materials and products

In the case of wood, some authors have investigated its use, in various forms and proportions, as an aggregate for the development of new composite materials based on cement or gypsum, and there have been numerous investigations of wood-cement composites (Jorge et al., 2004). In 2016, Corinaldesi et al. (2016) studied the use of wood waste to replace sand in the

preparation of cement mortars, obtaining composite mortars with improved thermal properties. Along similar lines, some researchers studied wood-ash as partial replacement for cement, however, the resulting values thus obtained did not meet the required standards (Elinwa et al., 2002; Cheah et al., Siddique et al., 2012). Adding wood chips previously treated with water as partial replacement for fine aggregate in the generation of new concrete has also been studied (Mohammed et al., 2014). Coatanlem et al. (2005) analysed the durability of these new concretes when subjected to humid and dry environments, and demonstrated the feasibility of using these compounds in construction, achieving an optimum performance when wood chips were saturated in a sodium silicate solution. Likewise, Bederina et al. (2008) examined the use of other treatments and their effects on the strength of newly generated wood-sand concretes, concluding that no pre-treatment of the wood waste was necessary when added to cement-based mixtures.

On the other hand, research on gypsum-wood composites is scarce. Important contributions by Dai et al. (2015) yielded a product with a flexural and compressive strength of 3.36 MPa and 8.73 MPa, respectively, while using a water-based epoxy spray coating treatment.

There are a few new construction products made from composite materials containing wood waste. Del Río-Merino et al. (1999) patented a gypsum board made lighter by adding cork for direct use in construction, and which improved thermal and acoustic properties. Turgut et al. (2007) proposed the use of sawdust in the manufacture of limestone bricks, with wood waste amounting to 30 %, which made the product lighter and, thus, more feasible for multiple construction applications. Other researchers have developed new acoustic panels with recycled materials (Ricciardi et al., 2014), while Wang et al. (2016) have posed the manufacture of noise- and thermal-insulating cement-bonded particle boards containing CDW wood waste.

Use of plastic waste as aggregate in the generation of materials and products for construction

To find a use for such large quantities of plastics that merely end up in landfills, many researchers have studied the use of plastic waste in the production of new building materials with enhanced properties (Siddique et al., 2008; Ismail and Al-Hashmi, 2008; Saikia and de Brito, 2012; Gu and Ozbakkaloglu, 2016; Sharma and Bansal, 2016).

One of the most researched plastics is polyethylene terephthalate (PET), from recycled plastic bottles, which is used in mixtures with a gypsum matrix at weights of up to 20%. Some authors state that increasing the percentage of plastic leads to lighter composites with better thermal behavior, but to the detriment of their mechanical capacities (Karaman et al., 2006). Adding PET waste to concrete is intended to replace the use of natural aggregates, and when this occurs, the mechanical abrasion behavior of the resulting composites is closely scrutinized. A maximum 15% replacement in volume of natural aggregate in concrete mixes has been achieved, yet strength properties deteriorate when PET is added, even though abrasion resistance is better than that of the reference concrete (Saikia and de Brito, 2014). Researchers have also studied PET waste in cement mortars (Hannawi et al., 2010; Ge et al., 2014; Da Silva et al., 2014).

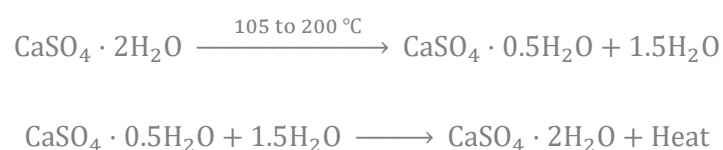
Different types of plastic foam waste have been used to create new lightweight gypsum composites. Investigators analyzing the mechanical properties of gypsum plasters when expanded polystyrene (EPS) waste was added found that the plasters' resistance decreased as the residue percentage rose, although the resulting composite was lighter (San Antonio González et al., 2015). González-Madariaga and Macia (2008) used EPS waste in the preparation of gypsum lining panels for use in construction, and other authors (Gutiérrez-González et al., 2012) have analysed the use of polyurethane foam (PUR) waste as aggregate in gypsum composites, applying a maximum volume ratio of polyurethane foam waste/plaster of 4/1. In this case, it was found that the composites were lighter, and their thermal conductivity

improved when the PUR waste percentages increased. Although their adherence and mechanical properties decreased, the values obtained are above the minimum standard requirements (UNE-EN 13279-1, 2006). These PUR/gypsum composites have also been used to create plasterboard panels, reinforced with polypropylene fibers, and it was found that the thermal properties were enhanced (Alameda et al., 2016). New lightweight concrete has been created by using PUR-foam waste (Mounanga et al., 2008), and San Antonio González et al. (2015) have researched the influence of extruded polystyrene (XPS) waste on gypsum-based composites.

There are many other studies that have developed new lightweight gypsum, cement and concrete composites as a result of adding different plastic aggregates, for example: PVC pipes (Kou et al., 2009), plastic bag waste (Ghernouti and Rabehi, 2012), plastic from the recycling of electronic devices (Bulut and Şahin, 2017), polyethylene waste (Jassim, 2017) and diatomite and polypropylene fibers (Gencel et al., 2016).

Researches based on the use of recycled gypsum as a substitute for commercial one

Commercial gypsum for construction ($\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$ - calcium sulphate hemihydrate/bassanite) is produced by heating natural gypsum rock ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ - calcium sulphate dihydrate/gypsum) in air at 105 °C to 200 °C. In order to produce gypsum plaster, the commercial gypsum must be mixed with water, producing an exothermic reaction. After that reaction, the material rehydrates, turning into their original chemical composition again (eq. 2) (Gartner, 2009; Fořt and Černý, 2018; Erbs et al., 2018).



The fact that the chemical composition of gypsum does not change makes it a completely recyclable material (GtoG Project, 2015). Given this fact, it is theoretically possible to solve one of the main problems that currently presents the construction sector: the generation of large amounts of waste and its correct management (Pacheco-Torgal, 2013). In the world, more than 15 million tons of gypsum waste from plasterboard are sent to landfills each year (Ahmed et al., 2011). Therefore, the reuse of gypsum waste as replacement of commercial gypsum in the preparation of plasters and prefabricated products (plasterboards and blocks) is a line of research that some investigations have addressed during the last years (Begliardo et al., 2013; Erbs et al., 2015; Papailiopoulou et al., 2017).

In that sense, the contributions made by Jimenez-Rivero and Garcia-Navarro (2016a, 2017a) were very relevant. They have analysed the cost of recycling gypsum waste from plasterboards (GPW) from the economic and environmental viewpoints. They found that 87% of GPW is landfilled in the EU-28 and developed a research on which they used GPW as a partial substitute of commercial gypsum in plasters and plasterboards (Jimenez-Rivero and García-Navarro, 2017b).

Fernandez-Casado (2010) based on data from a plasterboard production company, in terms of energy consumption, economic, waste reduction, among others, defined the advantages of the reuse of plasterboard waste to generate new panels. Geraldo et al. (2017) evaluated the recyclability of gypsum waste from plasterboard by analysing the mechanical and physicochemical properties after multiple cycles of dehydration and hydration. They did not observe important decreases in terms of mechanical behaviour after each cycle. A similar procedure was also conducted by Erbs et al. (2018). They reached a compressive strength of 8.40 MPa after three recycling cycles.

The influence of various calcination temperatures (160 °C, 180 °C and 200 °C) and times (1, 2, 4, 8 and 24 h) was also evaluated by Erbs et al. (2015). They found that the best mechanical strength results were obtained at 180 °C for 24 hours. In that sense, Rossetto et al. (2016) fixed the calcination temperature at 150 °C, using different heating periods (1, 2, 3, 4, 5 and 6 h). When they used GPW in plasters, they obtained a worse workability of the material, while the compressive strength and surface hardness of the pastes increased.

There are other types of gypsum wastes, known as synthetic gypsums, which come from different industrial processes, and have the same chemical composition as natural gypsum (Wirsching et al., 1994; Lushnikova and Dvorkin, 2016). Nowadays many manufacturers use them as total or partial substitution of commercial gypsum (Gyptec, 2018). Flue gas desulphurisation (FDG) gypsum, phosphogypsum and borogypsum are the most common (Meawad et al., 2010). Their chemical reactions for obtaining the synthetic gypsum are shown in the following equations:



FGD gypsum as partial substitute of commercial gypsum is widely used in some countries like Germany, Belgium, United Kingdom or France (Eurogypsum, 2018). However, according to the American Coal Ash Association, in 2016 over 32 million tons of FGD gypsum were produced in the United States, of which 42.6% went to landfills. For that reason, there is an important interest of many researchers and companies to continue promoting the use of FGD gypsum in different areas: plasterboard production, cement and concrete composites, and agricultural uses (Lee et al., 2012; Lei et al., 2017; Watts and Dick, 2014). Tesarek et al. (2007) were one of the first to give complete representative information on the mechanical, thermal and hydric properties of calcined FGD gypsum. Their results showed that the mechanical properties of the materials were very high and competitive, and a significant loss occurred when the moisture increased. In that sense, Leiva et al. (2010) made gypsum panels composed of 100% FGD gypsum in order to determine their fire resistance. They concluded that the insulation capacity of the FGD gypsum panels was higher than that of commercial plasterboards. Those results are in accordance with the ones of Zhang et al. (2016), who observed an improvement in the thermal conductivity of plaster when FGD gypsum was added.

The carbon footprint analysis of the production of FGD gypsum for construction applications was analysed by Fort and Cerný (2018). Their results showed that the carbon footprint was 25.2% lower than for the manufacture of natural gypsum. Furthermore, Suarez et al. (2016) produced ordinary Portland cement in which 5% of commercial gypsum was replaced with GPW as a set retarder. The environmental benefits, in terms of energy consumption and CO₂ emissions, was evaluated. They found that the GPW production process consumed less than 65% of the energy required to produce commercial gypsum and emitted less than 65% of greenhouse gases. Finally, the energy consumption of several heating processes was evaluated by Camarini et al. (2016a). They analysed the influence of different temperatures (120 °C, 150 °C and 200 °C) and calcination times (1, 2, 5, 8, 16 and 24 h), concluding that the calcination at 150 °C had the best performance.

Conclusions

From all the above, it can be deduced that there are not many investigations that use different types of waste in the creation of new gypsum-based materials, being, until now, minimal studies that use this type of waste for the design of new products constructive. Likewise, there are no previous investigations that have incorporated any aggregate in gypsum mixtures with a totally or partially recycled matrix. Therefore, proposing new research in this field means improving the objectives set for the sector.

The use of wood residue arises from the research tradition of the TEP-205 Group to which I belong. Since its foundation, its members have worked on the analysis of horizontal structures and wooden roofs, typical of most of the city's historic buildings [43, 44]. In the intervention or rehabilitation of some of these buildings, the significant amount of wood residue obtained from them was observed, thus considering its use in this Thesis.

On the other hand, it was appreciated that polycarbonate is one of the plastics with the best resistant capacities. In this line, and due to the ease of taking this residue from the CDs and DVDs generated in our University, this work proposes its use as an aggregate in plaster mixtures.

As a result of a stay at the Higher Technical Institute of Lisbon, the aim is to advance in research and not only use the waste as aggregates in the plaster mixtures, but it was the base material itself, the matrix, which was also recycled. Gypsum is an eternally recyclable material, since its cyclical chemical composition does not vary.

Therefore, in short, taking the plastic and wood aggregates that we used to have, together with the recycled plaster matrix, it is intended to generate new materials and products that are much cleaner, more efficient and 100% recycled.

Organization and structure of the PhD. thesis

This Doctoral Thesis has been carried out following the guidelines of the publication compendium modality contained in the regulations governing Doctoral studies at the University of Seville. For this, and after carrying out a brief justifying introduction of the work, the objectives of the work have been defined, as well as the methodology proposed to achieve them. A brief summary of the results obtained in the different articles, as well as the main conclusions obtained, close what has been called Block A of this work. For its part, Block B is made up of the nine published scientific articles, whose union makes this thesis have entity. Finally, in this second block the communications to congresses prepared to date and that complement the content of the articles are provided.

All the results that give substance to this Doctoral Thesis have already been published in nine certain articles, all of them in high-impact journals indexed in the Journal Citation Reports (JCR). Thus, the different articles have been published in the following journals: Construction and Building Materials (1 article; Q1), Journal of Cleaner Production (4 articles; Q1), Journal of Building Engineering (1 article; Q1) and Materials (3 articles , Q2).

The results obtained in this work have been grouped into four differentiated sections, which respond to the four specific objectives defined in chapter 2 of this first block:

Section 1: Characterization of new compounds and products based on gypsum and wood residues.

In this first section the influence of incorporating wood residues as aggregates in gypsum mixtures is analyzed. Thus, a complete characterization of the compounds is carried out in order, as a result, to design and elaborate plates for false ceilings generated with said pastes. Finally, the possible effect of these materials in hygrothermal changes (use in humid places) is analyzed.

The content of this first section is collected in the following published articles:

- **Article 1:** 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*, 114, 6-14.
- **Article 2:** Pedreño-Rojas, M. A., Morales-Conde, M. J., Pérez-Gálvez, F., Rodríguez-Liñán, C. (2017). Eco-efficient acoustic and thermal conditioning using false ceiling plates made from plaster and wood waste. *Journal of Cleaner Production*, 166, 690-705.
- **Article 3:** Pedreño-Rojas, M. A., Morales-Conde, M. J., Rubio-de-Hita, P., Pérez-Gálvez, F. (2019). Impact of Wetting – Drying Cycles on the Mechanical Properties and Microstructure of Wood Waste – Gypsum Composites. *Materials*, 12 (11), 1829.

Section 2: Generation of new compounds and products based on gypsum and plastic waste.

The second section's main objective is to study the benefits of adding polycarbonate residue in gypsum mixes. In this line, after an exhaustive characterization of the compounds, it was proposed to use the residue of CDs and DVDs in the generation of plasterboards for interior coatings.

The results achieved in the second section are collected in the following articles:

- **Article 4:** Pedreño-Rojas, M. A., Morales-Conde, M. J., Pérez-Gálvez, F., Rubio-de-Hita, P. (2019). Influence of polycarbonate waste on gypsum composites: Mechanical and Environmental study. *Journal of Cleaner Production*, 218, 21-37.
- **Article 5:** Pedreño-Rojas, M. A., Morales-Conde, M. J., Pérez-Gálvez, F., Rubio-de-Hita, P. (2020). Reuse of CD and DVD Wastes as Reinforcement in Gypsum Plaster Plates. *Materials*, 13 (4), 989.

Section 3: Reuse of gypsum waste as a total and / or partial substitute for commercial gypsum.

Following a research stay, tutored by Prof. Jorge de Brito at the Higher Technical Institute of Lisbon, the possibility arises that the base material (the plaster of the matrix) was also recycled. In this line, various types of plaster are analyzed and the optimal performance for its use in the generation of new materials and products as a total or partial substitute for commercial plaster is achieved. Subsequently, the environmental benefits of using this waste are contrasted through the life cycle analysis (LCA) carried out jointly with researchers from the Czech Technical University in Prague in the Czech Republic.

The content of this third section is collected in the following published articles:

- **Article 6:** Pedreño-Rojas, M. A., Flores-Colen, I., De Brito, J., Rodríguez-Liñán, C. (2019). Influence of the heating process on the use of gypsum wastes in plasters: Mechanical, thermal and environmental analysis. *Journal of Cleaner Production*, 215, 444-457.
- **Artículo 7:** Pedreño-Rojas, M. A., De Brito, J., Flores-Colen, I., Pereira, M. F. C., Rubio-de-Hita, P. (2020). Influence of gypsum wastes on the workability of plasters: Heating process and microstructural analysis. *Journal of Building Engineering*, 29, 101143.
- **Artículo 8:** Pedreño-Rojas, M. A., Fořt, J., Černý, R., Rubio-de-Hita, P. (2020). Life cycle assessment of natural and recycled gypsum production in the Spanish context. *Journal of Cleaner Production*, 253, 120056.

Section 4: Development of materials for interior cladding with a matrix of recycled plaster and plastic waste.

Once the results of the three previous sections have been obtained, the values obtained are jointly analyzed with the aim of generating a 100% recycled material that combines the studied plastic aggregates in a recycled plaster matrix.

The results achieved in the fourth and last section are collected in the following article:

- **Artículo 9:** Pedreño-Rojas, M. A., Rodríguez-Liñán, C., Flores-Colen, I., de Brito, J. (2020). Use of polycarbonate waste as aggregate in recycled gypsum plasters. *Materials*, 13(14), 3042.

II. OBJETIVOS

El principal objetivo de esta Tesis Doctoral es avanzar en el estudio de la viabilidad y caracterización de nuevos materiales y productos con base de yeso que incorporen residuos plásticos y de madera de diversas procedencias, analizando la influencia que estos tienen en comparación con otros compuestos existentes en el mercado. Este objetivo se plantea con dos vertientes: la generación y caracterización de los nuevos materiales con prestaciones mejoradas (ligereza, resistencia, comportamiento térmico y acústico, etc.) y en segundo lugar su incorporación en edificación como productos para revestimientos, evaluando las posibles mejoras resistentes, acústicas, térmicas y/o medioambientales de las soluciones aportadas según los casos.

El objetivo planteado queda integrado dos líneas prioritarias de investigación establecidas por la Comisión Europea, la gestión de residuos y la mejora de la eficiencia energética de los edificios. Es importante destacar que el trabajo a desarrollar en esta investigación va a suponer, no sólo una valorización del residuo generando nuevos materiales aplicados como elementos que mejoran la ecoeficiencia del edificio, sino también la generación de nuevas aplicaciones constructivas de revestimientos de forma que estos queden integrados en los sistemas constructivos de los edificios.

El objetivo general antes definido queda materializado en los siguientes objetivos específicos:

- **Objetivo Específico 1:** Analizar la influencia de incorporar residuos de madera como agregados en las mezclas de yeso. En este sentido, se propone realizar una completa caracterización de los compuestos para, a raíz de ella, diseñar y elaborar placas para falsos techos generadas con dichas pastas. Por último, analizar la posible afección de estos materiales ante cambios higrotérmicos (uso en locales húmedos).
- **Objetivo Específico 2:** Estudiar los beneficios (físicos, mecánicos y medioambientales) de añadir residuo de policarbonato en mezclas de yeso. En esta línea, tras una exhaustiva caracterización de los compuestos, se propone emplear el residuo de CDs y DVDs en la generación de placas de yeso para revestimientos interiores.
- **Objetivo Específico 3:** Caracterizar diversos tipos de residuos de yeso, buscando el desempeño óptimo para su empleo en la generación de nuevos materiales y productos de construcción, como sustituto total o parcial del yeso comercial. Posteriormente, se plantea obtener los beneficios medioambientales de emplear este residuo mediante el empleo de la metodología de análisis de ciclo de vida (ACV).
- **Objetivo Específico 4:** Analizar conjuntamente los valores obtenidos en los objetivos (o secciones) anteriores para generar un material 100% reciclado que aune los agregados estudiados en una matriz de yeso reciclado.

III. METODOLOGÍA

Recopilación bibliográfica

El primer paso para el desarrollo de la presente Tesis Doctoral es recopilar la bibliografía existente sobre el tema de estudio. Así, se analizaron las metodologías y los resultados obtenidos en otras investigaciones. Todo ello se recoge en la Introducción de este trabajo y de los diferentes artículos científicos que lo componen.

Campaña experimental

Una vez analizada la información existente se diseñó una campaña de ensayos experimentales y de simulación.

Esta campaña de ensayos incluye:

- Caracterización física y mecánica de los compuestos y productos desarrollados. Se realizaron mayoritariamente en el laboratorio de construcción de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Sevilla, aunque también en el laboratorio de construcción del Instituto Superior Técnico de Lisboa.
- Caracterización térmica de las diferentes mezclas, obteniendo sus coeficientes de conductividad térmica. Dichos ensayos serán realizados en el laboratorio de física de la Escuela Técnica Superior de Edificación de la Universidad Politécnica de Madrid y en el laboratorio de construcción del Instituto Superior Técnico de Lisboa.
- Caracterización acústica para conocer el coeficiente de absorción sonora de algunos de los materiales. Estos ensayos se realizarán en el laboratorio de acústica del Departamento de Física Aplicada II de la Universidad de Sevilla.
- Análisis de los impactos ambientales, durante la etapa de producción de esos materiales y productos, empleando la metodología de Análisis de Ciclo de Vida.

La metodología seguida para la realización de cada uno de estos ensayos queda consecuentemente especificada y desarrollada en cada uno de los artículos donde son empleadas.

Análisis de los resultados y obtención de conclusiones

Se elaboró un estudio comparativo de las características físicas y mecánicas de los nuevos compuestos de yeso con los diferentes contenidos de madera y plástico planteados frente a una muestra de yeso convencional sin residuos. En una segunda fase se empieza a trabajar con una matriz de yeso reciclado, como sustituto parcial y/o total del yeso comercial. Se determinaron las propiedades, así como las ventajas e inconvenientes desde el punto de vista físico y de capacidad resistente, de los nuevos compuestos. El resultado de este análisis nos señalará la idoneidad de estos compuestos para ser sustitutos del yeso tradicional en las aplicaciones constructivas a proponer.

Se planteó y analizó el empleo de los productos desarrollados en un edificio modelo. Finalmente, se realizará un estudio medioambiental de estos productos, analizándose los beneficios obtenidos en comparación con otros productos existentes en el mercado.

IV. RESUMEN Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

SECCIÓN 1: CARACTERIZACIÓN DE NUEVOS COMPUESTOS Y PRODUCTOS CON BASE DE YESO Y RESIDUOS DE MADERA. [ARTÍCULOS 1, 2 y 3]

1.1. Breve definición del residuo de madera empleado

La madera utilizada procede de la demolición o sustitución de viejos forjados de madera, típicos de la arquitectura doméstica tradicional de Sevilla. Los dos tipos de residuo de madera empleados fueron virutas (WS) y serrín (S), tal y como se aprecia en la Figura 2. Para obtener el residuo en forma de serrín y virutas, la madera fue limpiada, triturada y tamizada, clasificándose como virutas las piezas comprendidas entre 1 y 8 mm y como serrín las inferiores a 1 mm. Una caracterización más exhaustiva del residuo queda recogida en los artículos correspondientes.



Figura 2. Residuos de madera (serrín y virutas) empleados en la investigación. Fuente: Elaboración propia.

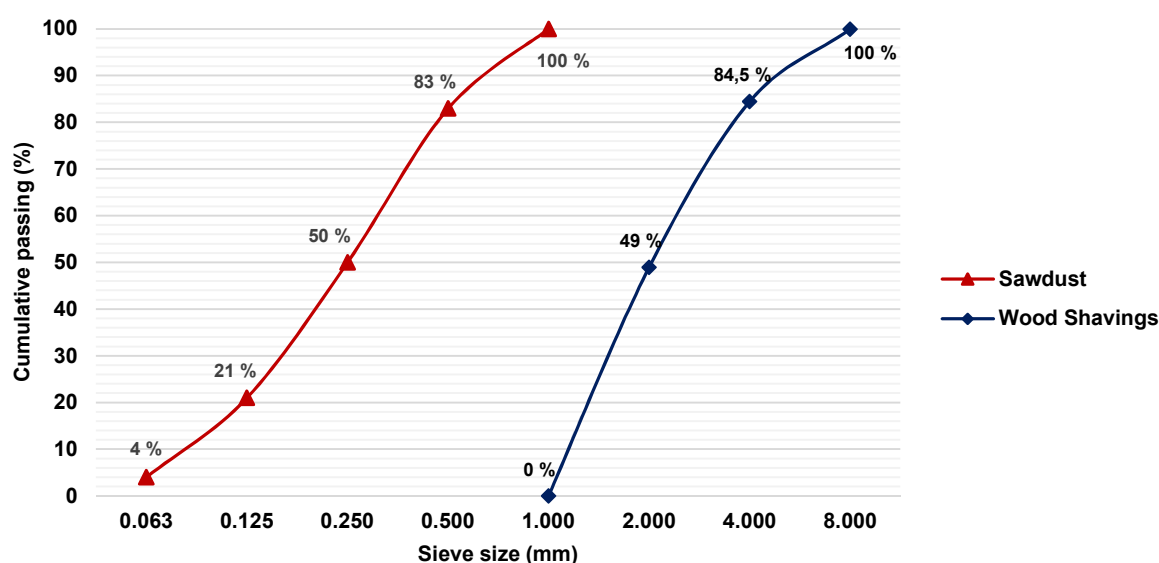


Figura 3. Granulometría de ambos tipos de residuo de madera. Fuente: Elaboración propia.

1.2. Compuestos yeso-madera: caracterización.

Con estos residuos se elaboran mezclas con un diferente porcentaje de incorporación (2.5, 5, 10, 20, 40 %) respecto al peso de yeso utilizado, tal y como puede observarse en las tablas de dosificaciones contenidas en las publicaciones. Además, se elabora una serie con el material de referencia o control, que es aquel que no incorpora ningún tipo de residuo de madera a la mezcla de yeso.

Cabe destacar, que además de los residuos antes mencionados, en una etapa inicial de la investigación (*Artículo 1*), se emplearon fibras de refuerzo de la matriz de yeso además del propio agregado de madera: fibra de vidrio (F) y paja (ST). Sin embargo, los resultados obtenidos no resultaron ser de gran relevancia por lo que se optó por suprimirlas en las siguientes etapas del trabajo.

Las propiedades físicas y mecánicas de los nuevos compuestos fueron estudiadas exhaustivamente tal y como se recoge en el Artículo 1, sin embargo, y a modo de resumen, en este apartado únicamente se recogen su densidad aparente en estado seco y su resistencia a flexión y compresión. Igualmente, se adjuntan algunas imágenes obtenidas por microscopía electrónica de barrido (SEM) que ayudan a entender los resultados obtenidos.

Densidad aparente en estado seco

La Figura 4 recoge los resultados obtenidos para la densidad aparente en estado seco de los nuevos compuestos yeso-madera. En ella se aprecia que la incorporación de residuo de madera a la mezcla se traduce, en todos los casos, en una disminución de la densidad del material a la vez que se incrementa el porcentaje de residuo agregado. Dicha caída es mayor en los compuestos que incorporan virutas frente a los que contienen serrín al mismo porcentaje. Así, la mayor disminución se alcanza en el material con un 40% de virutas WS40 (702 kg/m^3), donde se reduce en un 46.3% el valor obtenido para el material de referencia.

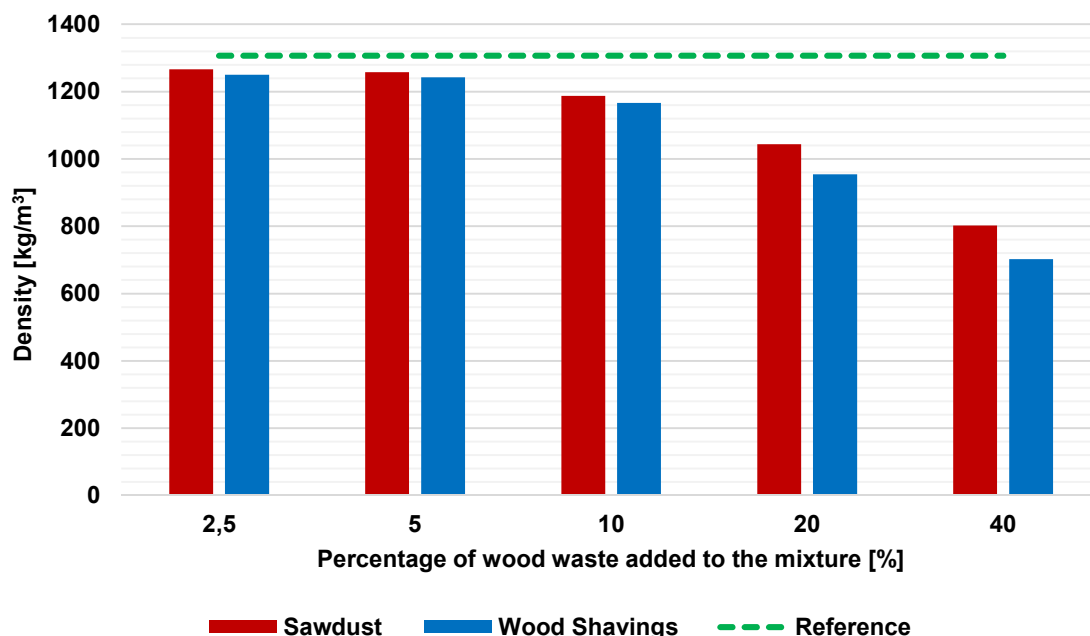


Figura 4. Resultados obtenidos para la densidad de los compuestos yeso-madera. Fuente: Elaboración propia.

Resistencia a flexión

Los valores obtenidos para la resistencia a flexión de las mezclas de yeso-madera quedan recogidos en la Figura 5. En ella se aprecia que esta propiedad disminuye progresivamente a la vez que se incrementa el porcentaje de residuo añadido. Al igual que ocurría con la densidad, esta bajada es mayor en los compuestos con virutas frente a aquellos que incorporan serrín en la misma proporción.

Es importante reseñar que la incorporación de serrín a la mezcla, en un porcentaje de hasta un 5% en peso, supone un ligero incremento de los valores de resistencia a flexión del material de referencia. Así, para el compuesto con serrín al 2.5% en peso S2.5, se alcanza un valor de 4.01 MPa, suponiendo un incremento del 10.8% respecto a los valores de control. Igualmente se destaca el hecho de que, para todas las mezclas elaboradas, se alcanza el valor mínimo de 1 MPa exigido por la normativa para compuestos de yeso [REF].

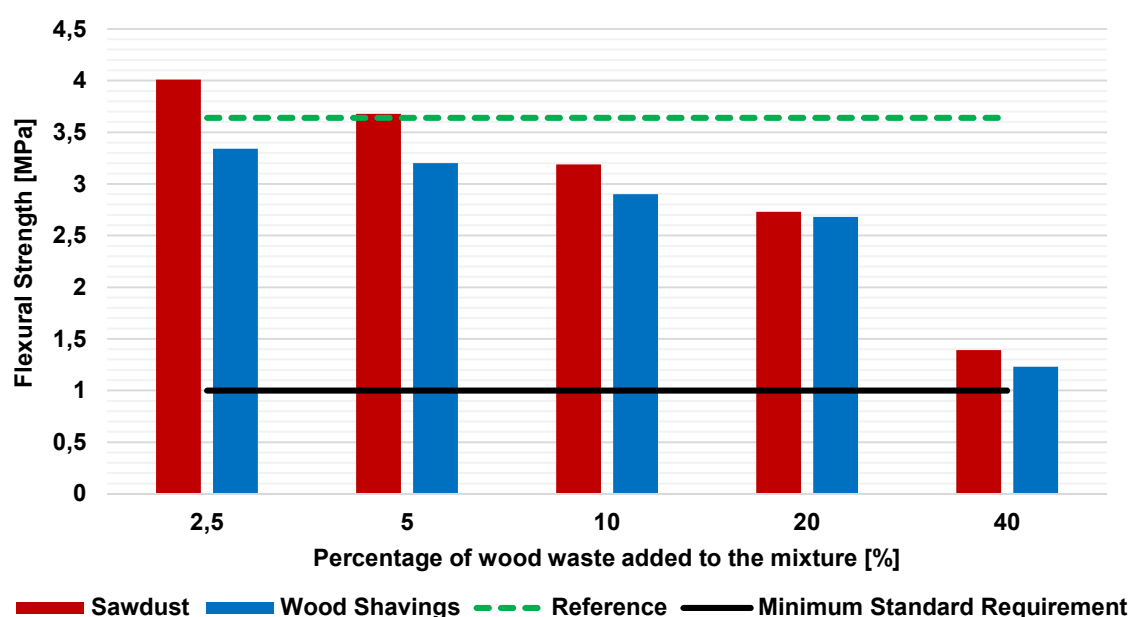


Figura 5. Resultados obtenidos para la resistencia a flexión de los compuestos yeso-madera. Fuente: Elaboración propia.

Resistencia a compresión

Los valores alcanzados de resistencia a compresión de las nuevas pastas muestran un comportamiento similar al observado en las propiedades anteriores; esto es, una disminución progresiva de la misma a la vez que se incrementa el porcentaje de residuo de madera añadido. Igualmente, para las mezclas de serrín se obtienen valores más elevados, al mismo porcentaje, que para aquellas que tienen virutas (Figura 6). En este caso, ninguna de las mezclas alcanza el valor de 9.87 MPa obtenido para el yeso de referencia.

Igualmente, todos los compuestos desarrollados superan el valor mínimo de 2 MPa requerido por los estándares de calidad para su utilización como recubrimiento de yeso en edificación [REF].

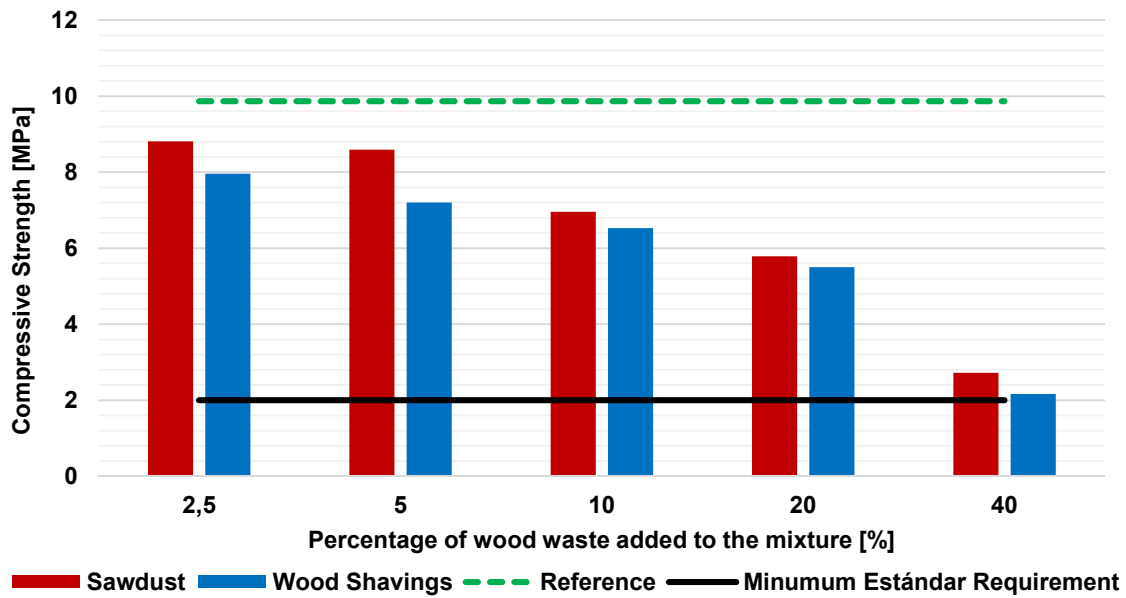


Figura 6. Resultados obtenidos para la resistencia a compresión de los compuestos yeso-madera.
Fuente: Elaboración propia.

Microscopía electrónica de barrido (SEM)

Las imágenes obtenidas en la microscopía electrónica de barrido (Figura 7) dan justificación a los resultados alcanzados en este trabajo. Así, se observa que la incorporación del residuo de madera en mayores porcentajes supone una rotura de la matriz de yeso, sin alcanzarse una correcta adherencia yeso-madera. Este efecto está más acentuado en los compuestos con virutas, al contar estas con una mayor superficie de contacto. Se explica así que la bajada en términos de ligereza y resistencia sea mayor en esta familia de materiales.

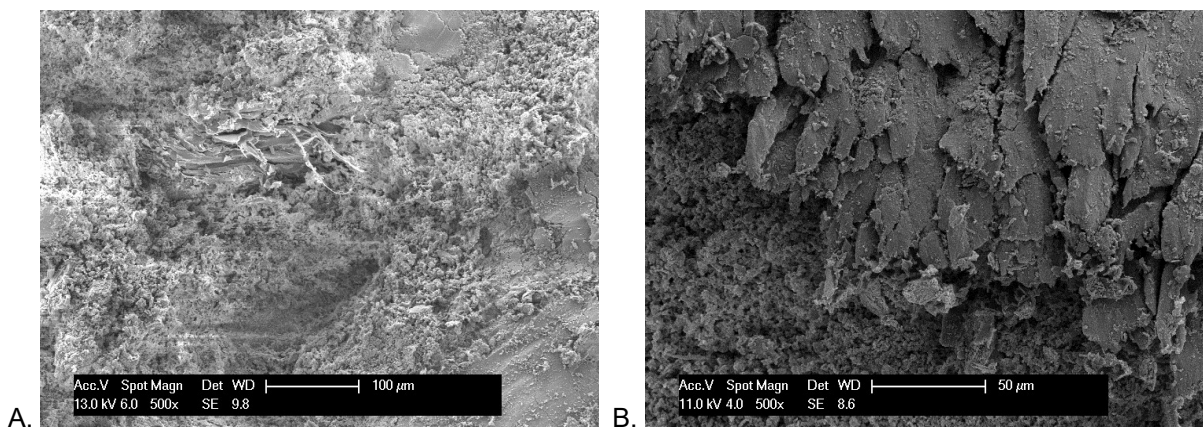


Figura 7. Imágenes obtenidas de la microscopía electrónica de barrido realizada a compuestos con un 20% de residuo de madera. **A)** S20. **B)** WS20. Fuente: Elaboración propia.

1.3. Desarrollo de placas para falso techo con propiedades mejoradas.

Tras la generación y estudio exhaustivo de los nuevos compuestos yeso-madera, en una segunda etapa de la investigación, se analiza e implementa su utilización como materia prima para la elaboración y desarrollo de nuevos productos para la construcción a base de yeso. En este sentido, se decide emplear dichos compuestos para la elaboración de placas de yeso para falsos techos (*Artículo 2*).

Para la generación de las placas, y previamente a su ejecución a escala real en laboratorio, se realiza una modelización de las mismas mediante elementos finitos.

Conocidas las propiedades resistentes de los nuevos materiales, principalmente su resistencia a compresión y su módulo de elasticidad, las placas de falso techo (de 60 x 60 cm² de dimensión y 1.5 cm de espesor) son modelizadas en el software SAP2000. De los resultados obtenidos tras la simulación del ensayo de carga en ordenador, junto con los valores reales de tensión procedentes de la caracterización del compuesto, se observa que las placas con un porcentaje de agregado de madera de hasta un 20% en peso resistirían, al menos de manera teórica, el ensayo de rotura especificado por la normativa [REF], tal y como se observa en la Figura 8.

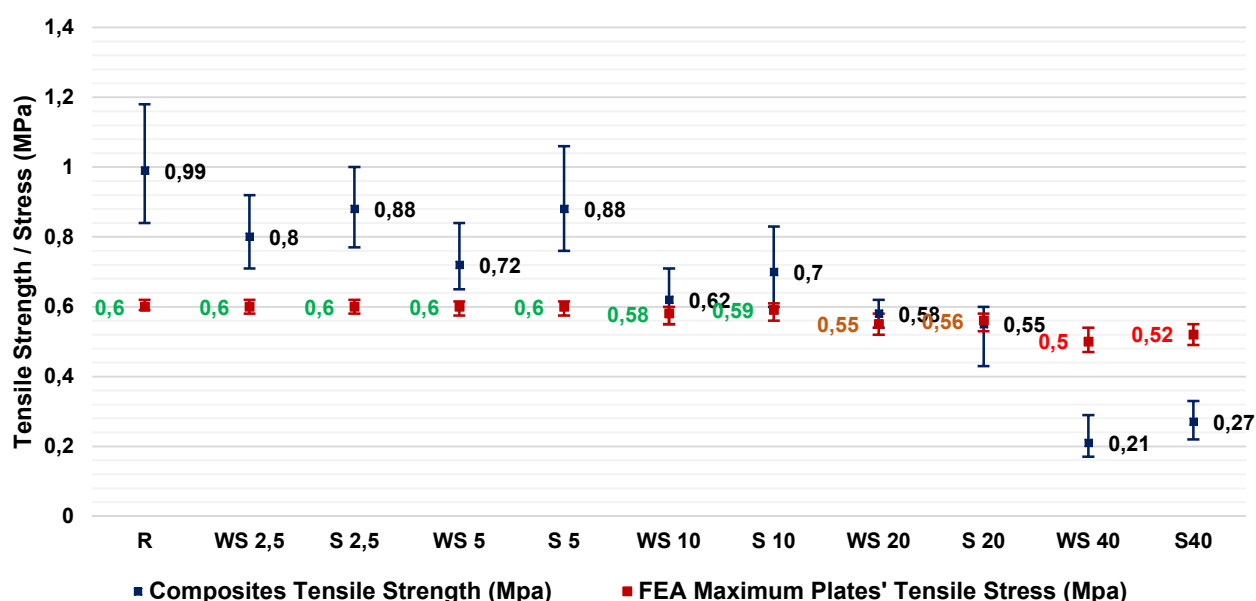


Figura 8. Comparación entre los resultados de resistencia a tracción de laboratorio obtenidos para los compuestos yeso-madera y la tensión máxima a la que se vería sometida la placa según la simulación en software de elementos finitos. Fuente: Elaboración propia.

Una vez alcanzado el porcentaje de residuo máximo a añadir a las mezclas para la elaboración de las placas (20%), se comienza la fase de laboratorio donde se desarrollan a escala real tres placas por serie con agregado de madera (tanto de serrín como de virutas) al 10 y 20% en peso sobre el total de yeso empleado. Además, se realiza una quinta serie con el material de referencia (aquel que no incorpora ningún tipo de agregado de madera).

Una vez listas para ser ensayadas, las placas deben resistir, sin presentar daño alguno, durante 30 minutos una carga longitudinal de 6 kg (0.1 kN/ml) en su fibra central, tal y como se recoge en la norma UNE-EN 14246 [REF]. Además, una vez superado el ensayo, las placas fueron llevadas a rotura, obteniéndose así su capacidad máxima de carga. La Figura 9 recoge una instantánea del ensayo de rotura realizado a las placas en el laboratorio.



Figura 9. Ensayo de rotura de las placas yeso-madera en laboratorio según norma UNE-EN 14246.
Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 1 muestra los resultados obtenidos tras la rotura de las placas en el ensayo de flexión. En ella se observa que las 15 placas elaboradas pasaron el ensayo de resistencia a flexión establecido por la normativa. Como era de esperar, las cargas máximas de rotura de las placas se obtienen para las piezas de control. Asimismo, en todos los casos, las placas de serrín registraron valores de resistencia superiores a los alcanzados por las que contienen virutas con los mismos porcentajes. Por lo tanto, las tres placas elaboradas con el compuesto con un 20% de virutas de madera (WS20) tienen la menor capacidad de carga.

La comparación de los resultados, tanto en el análisis teórico del producto como en la ejecución de las placas en el laboratorio, muestra que las piezas ensayadas con un 10% de residuo de madera superan la prueba de flexión reglamentaria por un amplio margen (0,31 kN para WS10 y 0,42 kN para S10, en comparación con los 0,06 kN exigidos). Además, la serie de placas con 20% de desecho también pasa la prueba (0,17 kN para WS20 y 0,19 kN para S20).

Tabla 1. Resultados del test de resistencia a flexión de las placas yeso-madera.

Placa	Chequeo según UNE-EN 14246 (6kg 30´)	Carga máxima de rotura [kN]	Valor medio [kN] (CoV [%])
R 1	OK	0.44	0.56 (19.86)
R 2	OK	0.66	
R 3	OK	0.57	
WS10 1	OK	0.34	0.31 (12.08)
WS10 2	OK	0.33	
WS10 3	OK	0.27	
S10 1	OK	0.35	0.42 (14.06)
S10 2	OK	0.44	
S10 3	OK	0.46	
WS20 1	OK	0.18	0.17 (6.66)
WS20 2	OK	0.16	
WS20 3	OK	0.18	
S20 1	OK	0.19	0.19 (7.90)
S20 2	OK	0.21	
S20 3	OK	0.18	

Comportamiento térmico de las placas yeso-madera

Con el objetivo de implementar la aplicabilidad de las placas de falso techo desarrolladas, su comportamiento térmico fue también analizado. La Figura 10 realiza una comparación de los valores de conductividad térmica de las placas junto con los de densidad. Además, se incluyen los valores máximos permitidos por la normativa, así como de otros productos existentes en el mercado.

Del estudio realizado se puede afirmar que todas las nuevas piezas mejoran sustancialmente los valores de conductividad prestados por otros productos comercializados. En esta línea, los valores más bajos de conductividad térmica se alcanzan para las mezclas con viruta al 20% WS20 (0,156 W/mK), mejorando en un 37,6 % los valores obtenidos para el material de referencia.

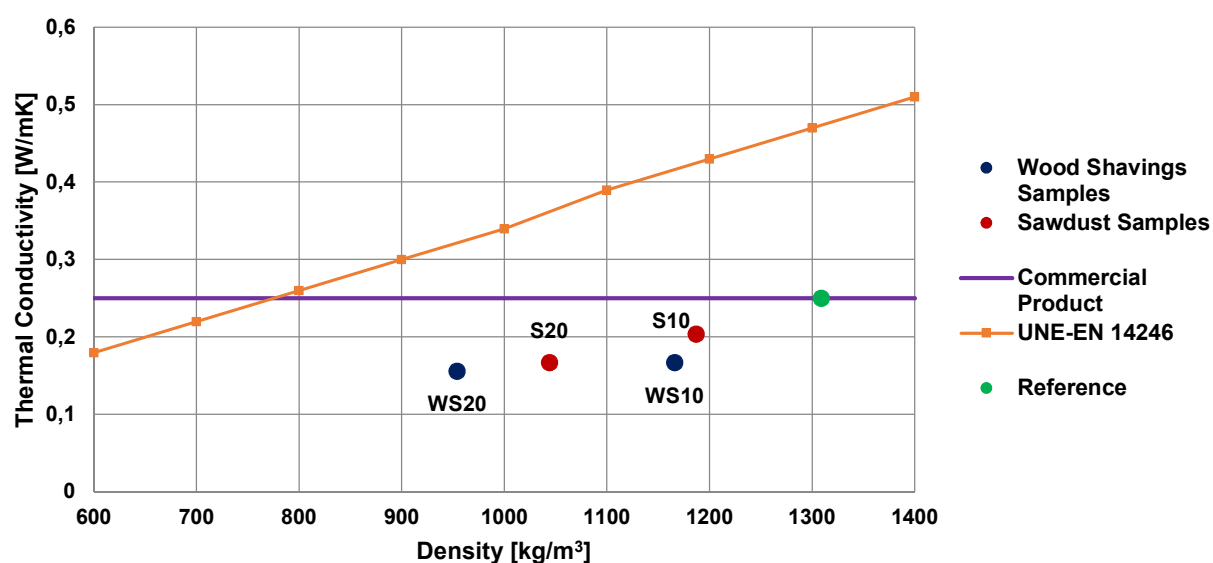


Figura 10. Comportamiento térmico de las placas yeso-madera. Comparación con UNE-EN 14246 y valores de referencia de productos comercializados. Fuente: Elaboración propia.

Comportamiento acústico de las placas yeso-madera

Una de las propiedades más a tener en cuenta en el desarrollo y caracterización de placas para falsos techos es su comportamiento acústico, más en concreto sus coeficientes de absorción sonora.

Para obtener dichos valores, las diferentes placas son analizadas mediante tubo de Kundt. Igualmente, se plantearon dos escenarios diferentes: placas sin perforar y otras con una matriz de perforaciones homogénea en toda su superficie. Son estas últimas las que ofrecen mejores resultados, y en concreto para el compuesto de serrín al 20% (S20). Los coeficientes de absorción sonora para las diferentes frecuencias de esta familia de placas, en contraposición con el material de referencia y otros productos del mercado queda recogidos en la Figura 11.

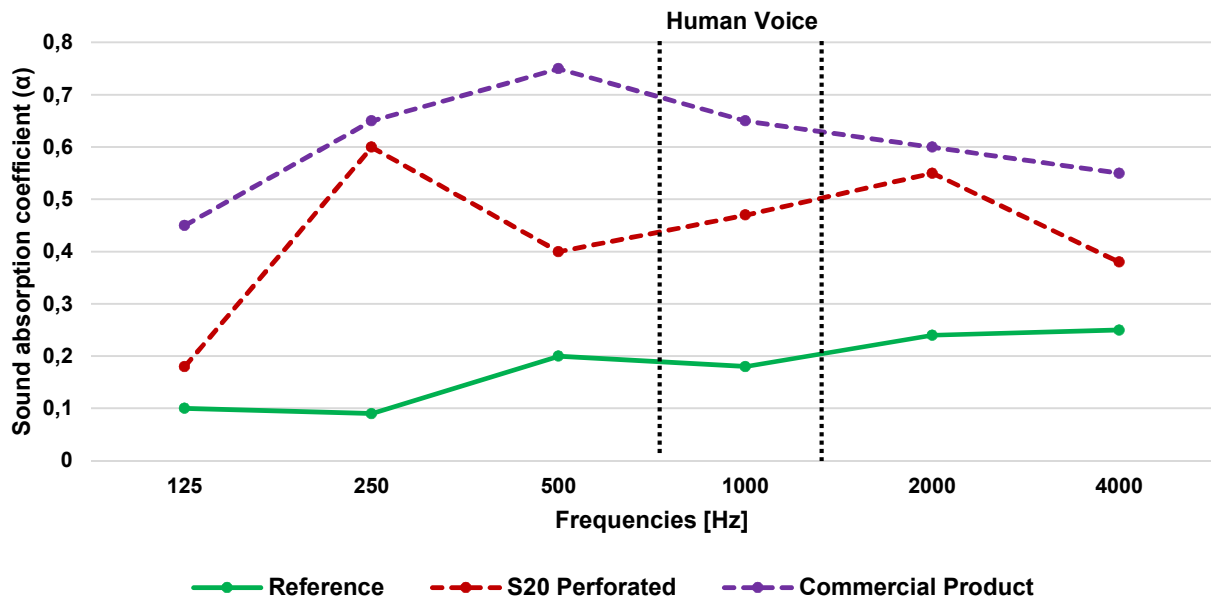


Figura 11. Comparación de los coeficientes de absorción sonora de las placas yeso-madera. Fuente: Elaboración propia.

1.4. Envejecimiento climático acelerado de los productos yeso-madera.

La madera es un material biodegradable que, al ser expuesto a determinadas condiciones atmosféricas (principalmente ambientes húmedos) puede sufrir algún tipo de deterioro. En esta línea, y con el objetivo de analizar la posible afección que tendría sobre los compuestos yeso-madera su exposición en ciertas condiciones ambientales, los productos fueron sometidos a una serie de ciclos de humectación y secado según se recoge en el *Artículo 3*.

En esta publicación puede observarse la definición del ciclo de procedimiento de envejecimiento acelerado que se emplea en este trabajo (7 días de duración cada ciclo). Los diferentes compuestos yeso-madera fueron sometidos a este proceso de humectación-secado durante un máximo de 15 ciclos, midiéndose la evolución de los mismos a los 5, 10 y 15 ciclos.

Inspección visual de las muestras tras el envejecimiento

Al final de cada ronda de ciclos de humectación-secado, una inspección visual de las muestras se llevó a cabo para localizar cualquier posible daño causado por el envejecimiento acelerado de los materiales.

Después de la inspección ejecutada al final de los primeros 5 y 10 ciclos, no se detectó ningún daño en las muestras. Sin embargo, después de la finalización de todo el proceso (15 ciclos), se observaron daños en las muestras con virutas de madera con un mayor porcentaje de residuos. Específicamente, los compuestos WS10 y WS20 mostraron pequeñas manchas de moho en la superficie de la muestra como se muestra en la Figura 12. Esta proliferación fue mucho más significativa en la mezcla con 20% de virutas. Además, pequeñas grietas y degradación superficial aparecieron en las muestras WS20 después de 15 ciclos de envejecimiento. Por último, es importante señalar que no se observaron daños superficiales en ninguna de las mezclas que utilizaron serrín como agregado en todo el plan de ensayos.

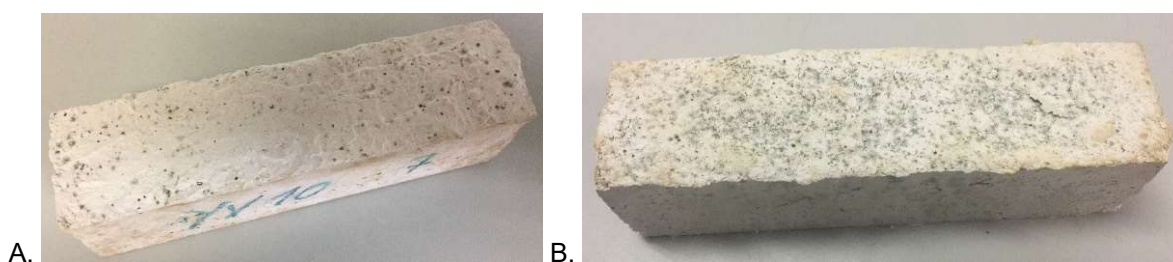


Figura 12. Pequeñas manchas de moho en probetas yeso-virutas después de 15 ciclos de humectación-secado. **A)** WS10; **B)** WS20. Fuente: Elaboración propia.

Evolución de la densidad de los compuestos tras el envejecimiento

La Figura 13 muestra los valores de densidad de las mezclas al final de cada serie de repeticiones de ciclo. Se observó que, para todos los compuestos, el incremento en el número de ciclos de humectación-secado estuvo ligado a una disminución de la densidad en relación a los que no habían sido sometidos al proceso de envejecimiento (0 ciclos). La mayor caída se logró para las muestras WS20, reduciendo la densidad del yeso en un 11,8% después de 15 ciclos de envejecimiento. Esta reducción se debió a la pérdida de masa, provocada principalmente por el pequeño proceso de desintegración, que sufrieron los materiales con mayor porcentaje de residuos, cuando fueron sometidos a los ciclos de humectación-secado.

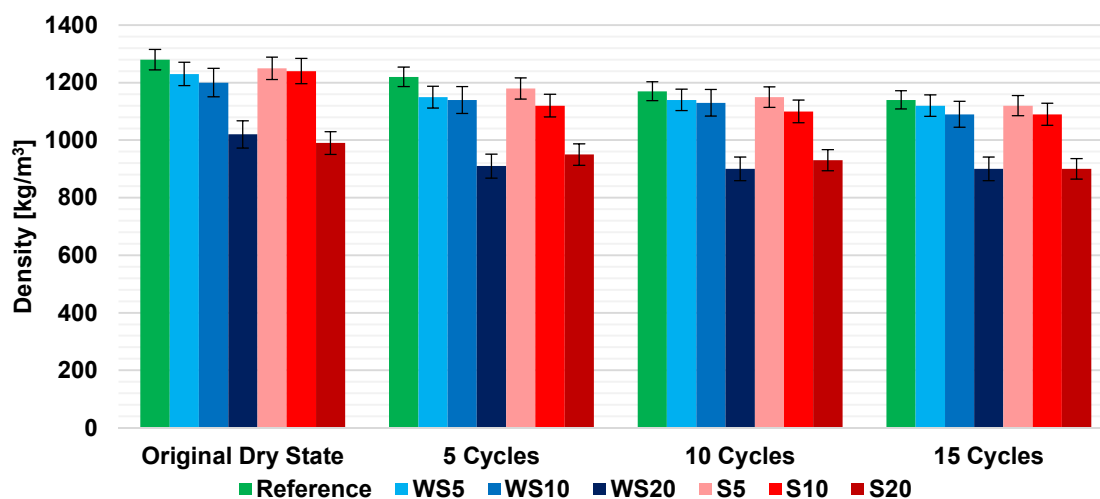


Figura 13. Densidad de los compuestos yeso-madera después de 0, 5, 10, y 15 ciclos de humectación-secado. Fuente: Elaboración propia.

Evolución de la resistencia a flexión de los compuestos tras el envejecimiento

Los resultados obtenidos para el ensayo de resistencia a la flexión de las mezclas (y su variabilidad), al final de cada serie de repeticiones de ciclo, se presentan en la Figura 14. Se observó que, en todos los casos, el incremento en el número de ciclos se tradujo en una disminución significativa de la resistencia a la flexión de los materiales. La caída fue más relevante en aquellos compuestos que contenían un menor porcentaje de residuo de madera, siendo el material de referencia el que presentaba la mayor caída a los 15 ciclos (38,9%). Debe tenerse en cuenta que, en la mayoría de las mezclas, los valores de resistencia a flexión alcanzados fueron superiores al requisito mínimo normativo (1 MPa). Sin embargo, las muestras WS20 después de 10 y 15 ciclos de humectación-secado rozaron la exigencia normativa sin alcanzarla (0,98 y 0,96 MPa, respectivamente).

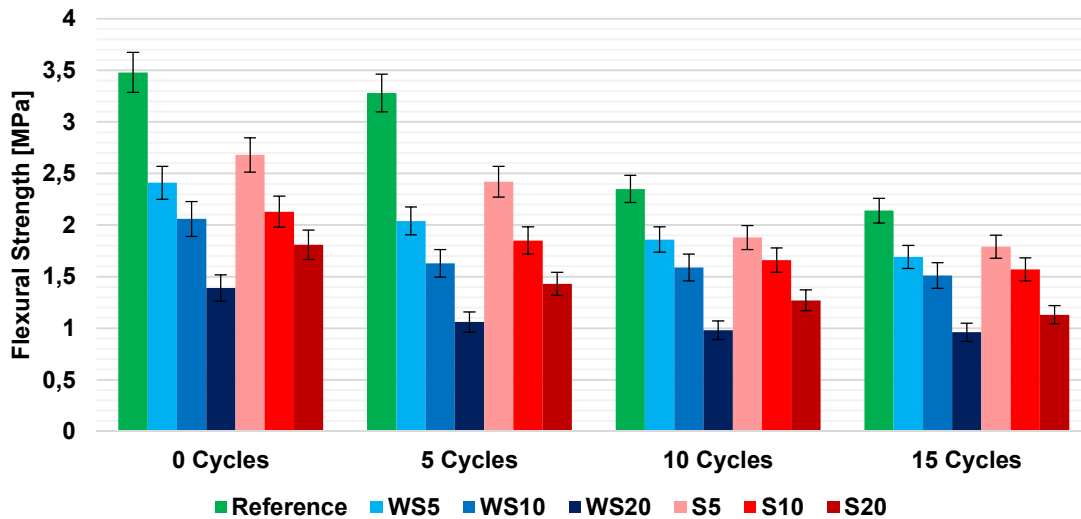


Figura 14. Resistencia a flexión de los compuestos yeso-madera después de 0, 5, 10, y 15 ciclos de humectación-secado. Fuente: Elaboración propia.

Evolución de la resistencia a compresión de los compuestos tras el envejecimiento

El comportamiento de los compuestos al ser sometidos al ensayo de compresión se analiza en la Figura 15, que muestra los valores medios de resistencia, medidos en MPa, al final de cada serie de repeticiones de ciclo. En todos los casos, el aumento del número de ciclos de envejecimiento estuvo vinculado a una disminución significativa de la resistencia a compresión de los materiales. La caída fue más relevante en aquellos materiales que contenían un menor porcentaje de residuos de madera, siendo el material de referencia el que presentaba la mayor caída a los 15 ciclos (52,5%). La mayoría de los resultados obtenidos estuvieron por encima del valor mínimo exigido para los revestimientos de yeso (2 MPa) por la normativa. Sin embargo, la resistencia lograda para la mezcla WS20 (1,94 MPa), después de 15 ciclos de humectación-secado, no fue suficiente para superar esa exigencia. El leve proceso de desintegración superficial que sufrieron los compuestos con mayor porcentaje de residuos durante el envejecimiento acelerado podría ser una de las causas que ocasionaron la pérdida de resistencia de los nuevos compuestos yeso-madera tras los ciclos.

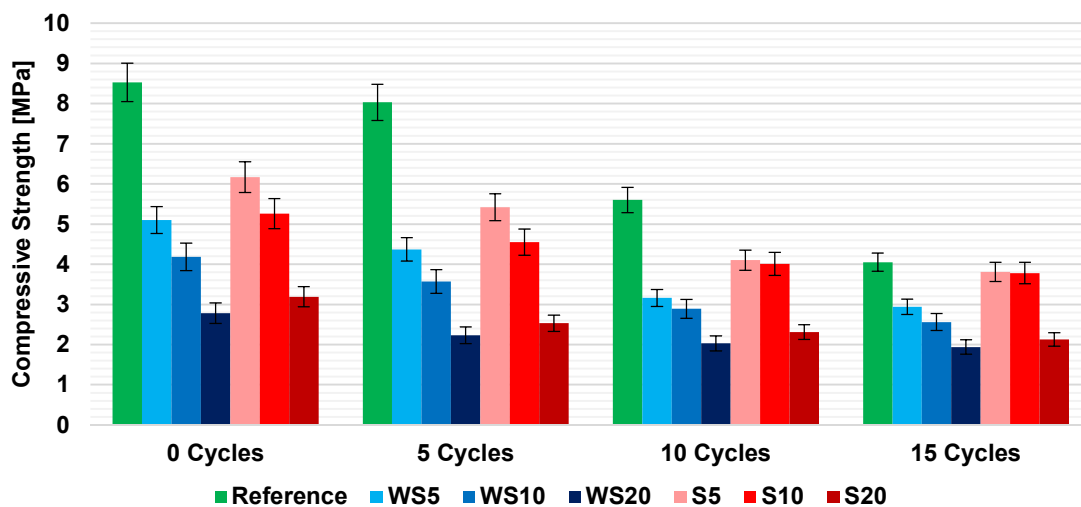


Figura 15. Resistencia a compresión de los compuestos yeso-madera después de 0, 5, 10, y 15 ciclos de humectación-secado. Fuente: Elaboración propia.

SECCIÓN 2: GENERACIÓN DE NUEVOS COMPUESTOS Y PRODUCTOS CON BASE DE YESO Y RESIDUOS PLÁSTICOS. [ARTÍCULOS 4 y 5]

2.1. Breve definición del residuo plástico empleado

Para esta investigación, como ejemplo de residuo plástico, se empleó policarbonato (PC) obtenido del reciclaje de CDs y DVDs. El policarbonato es un plástico de gran calidad y pureza, siendo también uno de los que más capacidad resistente presenta.

Los CDs y DVDs utilizados proceden de puntos de recogida de diferentes localizaciones de la Universidad de Sevilla. Posteriormente, se trituraron los discos, empleando para ello la trituradora Enviro EN RS y se clasificaron los residuos obtenidos en dos granulometrías mediante un proceso de tamizado (Figura 16). Como se puede observar, el primer grupo está formado por piezas de hasta 10 mm, mientras que el segundo tiene piezas de hasta 4 mm (Figura 17).

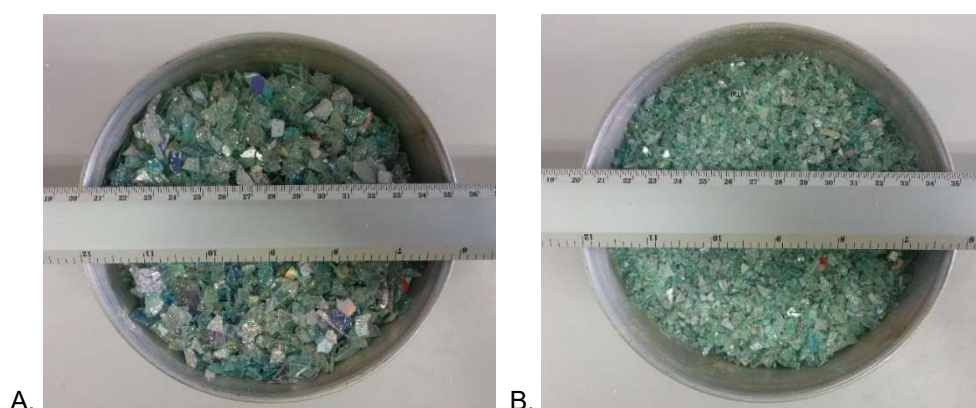


Figura 16. Desechos de CDs y DVDs, triturados y listos para ser usados como agregados en las mezclas. **A)** Partículas de hasta 10 mm (BPS). **B)** Partículas de hasta 4 mm (SPS). Fuente: Elaboración propia.

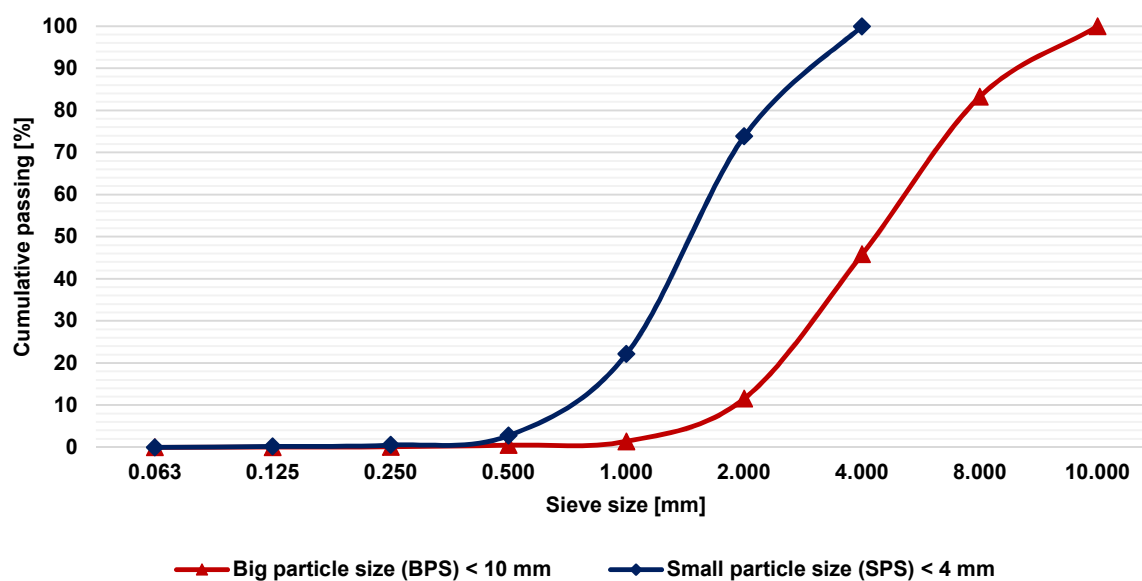


Figura 17. Granulometría de los CDs y DVDs triturados empleados en este trabajo. Fuente: Elaboración propia.

2.2. Compuestos yeso-policarbonato: caracterización.

Con el residuo de policarbonato, y para ambas granulometrías, se elaboran mezclas con diferentes porcentajes de incorporación (5, 10, 20, 30, 40, 50 y 60 %) respecto al peso de yeso utilizado, tal y como puede observarse en las tablas de dosificaciones contenidas en las publicaciones. Además, se elabora una serie con el material de referencia o control, que es aquel que no incorpora ningún tipo de residuo plástico a la mezcla de yeso. Toda la caracterización de estos compuestos queda recogida de manera exhaustiva en el *Artículo 4*.

En esta ocasión, para realizar la caracterización físico-mecánica de los compuestos de yeso con policarbonato, se ha medido la densidad aparente de los mismos en estado seco, su resistencia a flexión y compresión (junto con sendos coeficientes de aligeramiento) y el módulo de elasticidad de los compuestos. En este caso, además de la microscopía electrónica de barrido (SEM), se ha empleado la tomografía computarizada de rayos-x (XCT) para justificar los comportamientos observados.

Densidad aparente en estado seco

La densidad aparente en estado seco obtenida para los compuestos de yeso-policarbonato producidos se presenta en la Figura 18. Como puede observarse, los valores de densidad de las mezclas oscilaron entre 1336 y 1138 kg/m³ dependiendo del porcentaje en peso de agregado y del tamaño de partícula de residuos plásticos. Se observa que, en todos los casos, el incremento del porcentaje de residuos de policarbonato agregado a las mezclas provocó una disminución de la densidad en relación al material de referencia. La reducción de densidad es más pronunciada en mezclas en las que se utilizan como aditivo los residuos con menor tamaño de partícula (<4 mm), con una caída del 14,82% en la densidad de la mezcla con respecto a la mezcla de referencia. En el caso de las partículas de mayor tamaño (<10 mm), la reducción de densidad es del 9,89% en comparación con las muestras de referencia. En ambos casos, la disminución de densidad corresponde a mezclas con agregado plástico al 60% en peso.

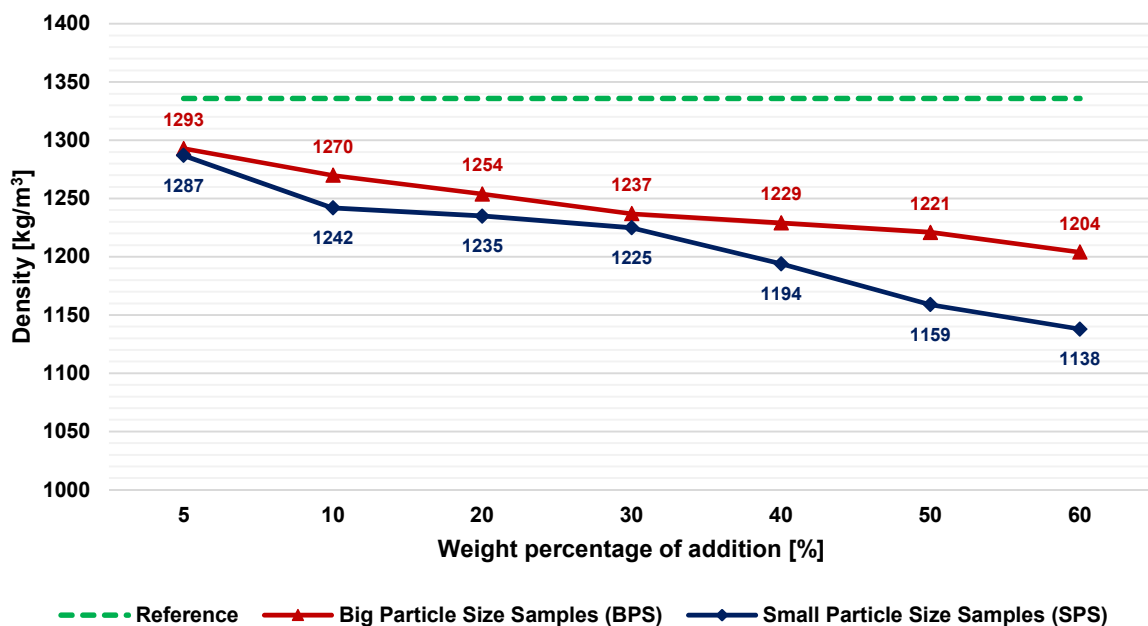


Figura 18. Resultados obtenidos para la densidad aparente en estado seco de los compuestos yeso-policarbonato. Fuente: Elaboración propia.

Propiedades mecánicas (resistencia a flexión y compresión)

Al igual que con la densidad, el incremento del porcentaje de residuos de CDs y DVDs añadidos a las mezclas da como resultado una disminución de la resistencia a flexión y compresión de los compuestos. En todos los casos, y para el mismo porcentaje de adición, las mezclas con partículas menores de 4 mm mostraron un mejor comportamiento mecánico que las que contienen partículas de hasta 10 mm. De acuerdo con los resultados obtenidos para la resistencia a la flexión (Figura 19), en muestras de hasta un 10% de residuos plásticos, se logró un aumento de la resistencia de las nuevas pastas de yeso con respecto al material de referencia, con el mayor incremento (11,99%) alcanzado para el compuesto SPS 5. Con un 20% de residuos plásticos añadidos, hubo una reducción progresiva de la resistencia a la flexión con respecto al material de referencia, siendo la disminución más pronunciada en la mezcla BPS 60, con un 31,51%. Cabe destacar que, en todos los casos, los valores de resistencia obtenidos son muy superiores a la exigencia mínima de la norma de 1 MPa para este tipo de materiales, lo que hace viable el uso de cualquiera de las mezclas analizadas en trabajo de construcción [REF].

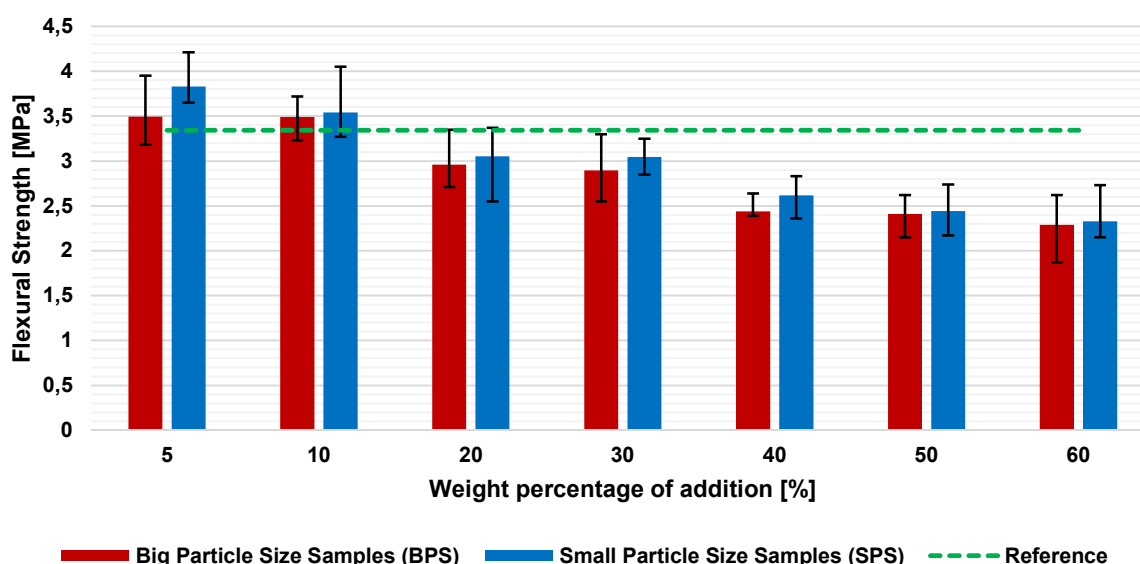


Figura 19. Resultados obtenidos para la resistencia a flexión de los compuestos yeso-policarbonato.
Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, los resultados obtenidos del ensayo de resistencia a compresión (Figura 20) muestran que los nuevos materiales mostraron un correcto desempeño en los tests, superando el valor del material de referencia en todas las mezclas con hasta un 40% en peso de residuos de CDs y DVDs. El mayor aumento de resistencia se registró en el compuesto SPS 5 (36,94%), mientras que la disminución más pronunciada se produjo en la mezcla BPS 60 (17,89%). Todos los valores registrados estuvieron muy por encima del mínimo de 2 Mpa establecido por la norma para la resistencia a la compresión de los composites a base de yeso, lo que significa que las mezclas producidas se comportan muy bien en relación con el requisito de la norma [REF], a pesar de la sustitución con tasas de hasta el 60% en peso. Esto se explica con el hecho de que el policarbonato es un plástico de alta resistencia que, cuando no se usa en altos porcentajes, puede crear una matriz compacta con el yeso que supera los valores obtenidos para el material de control.

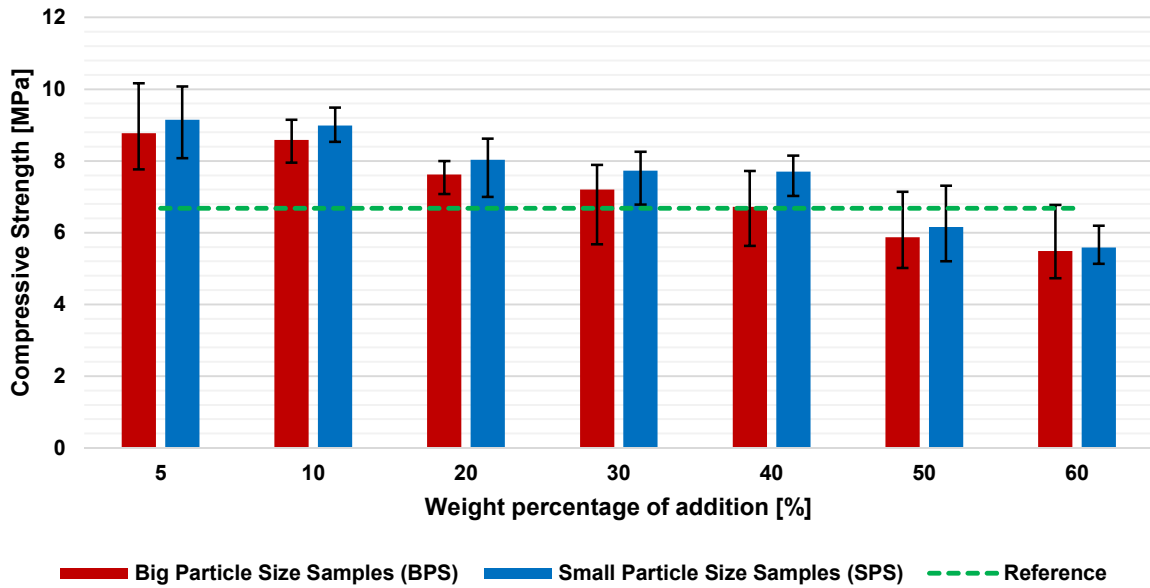


Figura 20. Resultados obtenidos para la resistencia a compresión de los compuestos yeso-policarbonato. Fuente: Elaboración propia.

Justificación de los resultados obtenidos mediante el empleo de técnicas SEM y XCT

Los buenos resultados cosechados tras la incorporación del residuo de policarbonato como agregado en las mezclas de yeso se justifican, de forma muy visual y clara, con las imágenes obtenidas de los ensayos de microscopía electrónica de barrido (SEM) y de tomografía computarizada de rayos-x (XCT).

Por su parte, las imágenes SEM (Figura 21) demuestran la existencia de una perfecta adherencia entre la matriz de yeso y el residuo de policarbonato. Esta unión es mucho más acentuada en las mezclas con partículas de menor tamaño (SPS), explicándose así la importante mejora alcanzada en las propiedades resistentes de los compuestos frente al material de control.

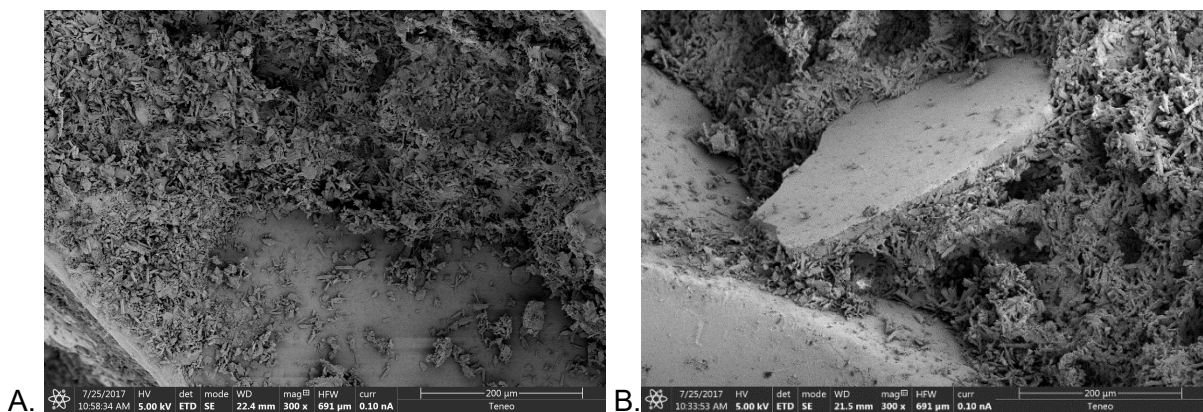


Figura 21. Imágenes obtenidas de la microscopía electrónica de barrido realizada a compuestos con un 50% de residuo de policarbonato. **A)** BPS 50. **B)** SPS 50. Fuente: Elaboración propia.

Por su parte, los ensayos XCT, además de corroborar la buena adherencia existente entre el residuo y la matriz se usaron para medir la porosidad de la muestra (Figura 22). Así, en las mezclas con mayor tamaño de partícula aparecían menos cantidad (número) de poros pero de mayor tamaño en comparación con las que usaban agregado de hasta 4 mm al mismo porcentaje de incorporación.

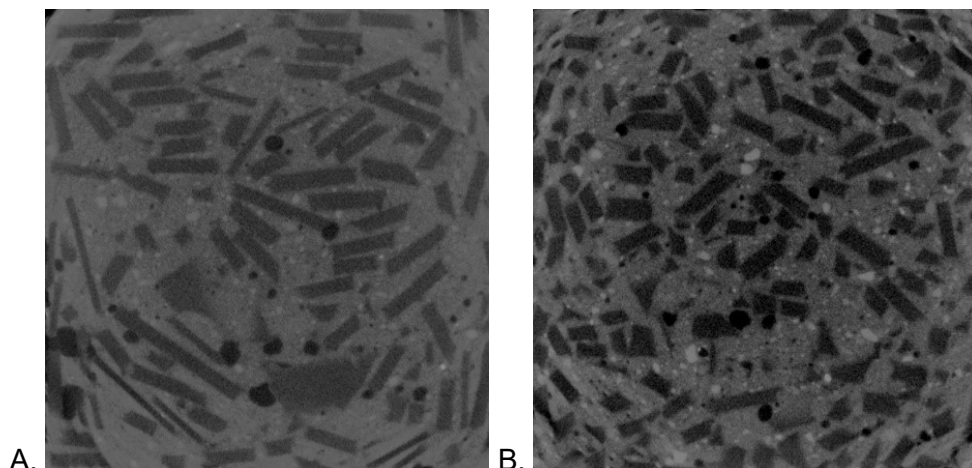


Figura 22. Imágenes obtenidas de la tomografía computarizada de rayos-x realizada a compuestos con un 50% de residuo de policarbonato. **A)** BPS 50. **B)** SPS 50. Fuente: Elaboración propia.

2.3. Desarrollo y caracterización de placas de yeso para revestimientos con agregado de policarbonato.

Una vez se han estudiado y caracterizado los compuestos yeso-policarbonato se plantea la reutilización del residuo como agregado en la generación de productos de construcción. En esta línea, se opta por desarrollar en laboratorio placas de yeso (60x60 cm² y 1.5 cm de espesor) para revestimientos (paredes y techos). El estudio de las nuevas placas con residuos de CDs y DVDs se recoge en el *Artículo 5*.

Diseño de las placas de revestimiento

Este trabajo parte de tres escenarios de trabajo diferentes en función de la manera en la que se incorpora el residuo de CDs en la placa:

- *Escenario 1:* se desarrollan placas elaboradas empleando como materia prima los compuestos SPS 10, 20, 40 y 60 ya caracterizados en la etapa anterior.
- *Escenario 2:* en esta ocasión los CDs son utilizados íntegramente como capa intermedia de refuerzo de los paneles. Se estudian diferentes disposiciones de las piezas como se recoge en la Figura 23.
- *Escenario 3:* combina los dos escenarios anteriores planteando placas con las combinaciones más beneficiosas. Esto es: emplea el residuo como agregado en la matriz de yeso y como piezas internas completas de refuerzo.

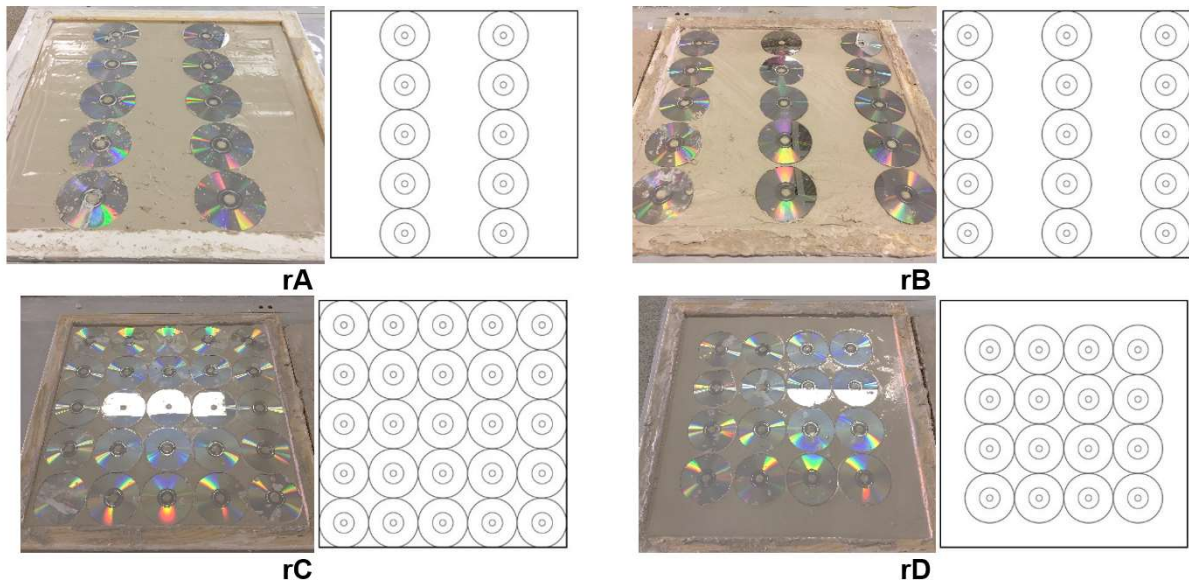


Figura 23. Combinaciones de refuerzo interno de las placas con CDs analizadas en el Escenario 2.
Fuente: Elaboración propia.

Rotura a flexión de las placas

Al igual que se hizo con las placas con residuos de madera, los nuevos paneles fueron sometidos a ensayos de resistencia a flexión. Para ello se les aplicó una carga lineal centrada de 0.1 kN/ml durante 30 minutos [REF]. Tras comprobar que no habían sufrido ningún daño en este proceso se continuó con el ensayo hasta alcanzar la carga de rotura de las placas.

La Figura 24 recoge las cargas de rotura obtenidas para cada una de las series de placas. Los valores mostraron que, en términos generales, el mejor desempeño se logró para las placas del escenario 3, siendo las muestras SPS20-rD las que obtuvieron el mayor valor (0,70 kN). Es importante señalar que tres series aumentaron el valor de resistencia a la flexión de las probetas de referencia (placas SPS10, rD y SPS20-rD).

Por otro lado, el resultado más bajo se logró para las muestras rC. Comparando los resultados de los escenarios 1 y 2 con los obtenidos para el escenario 3, se puede apreciar un mejor desempeño mecánico cuando ambas opciones de refuerzo trabajaron juntas. En el caso de las placas SPS20 el incremento al agregar el refuerzo con piezas completas de CDs fue del 25%, mientras que para la serie SPS40 fue del 12,8%.

En resumen, se debe considerar que, a pesar de no tener los mejores resultados de resistencia en algunas series, las placas que incorporaron el residuo a la matriz de yeso (escenarios 1 y 3) tienen un mejor desempeño mecánico.

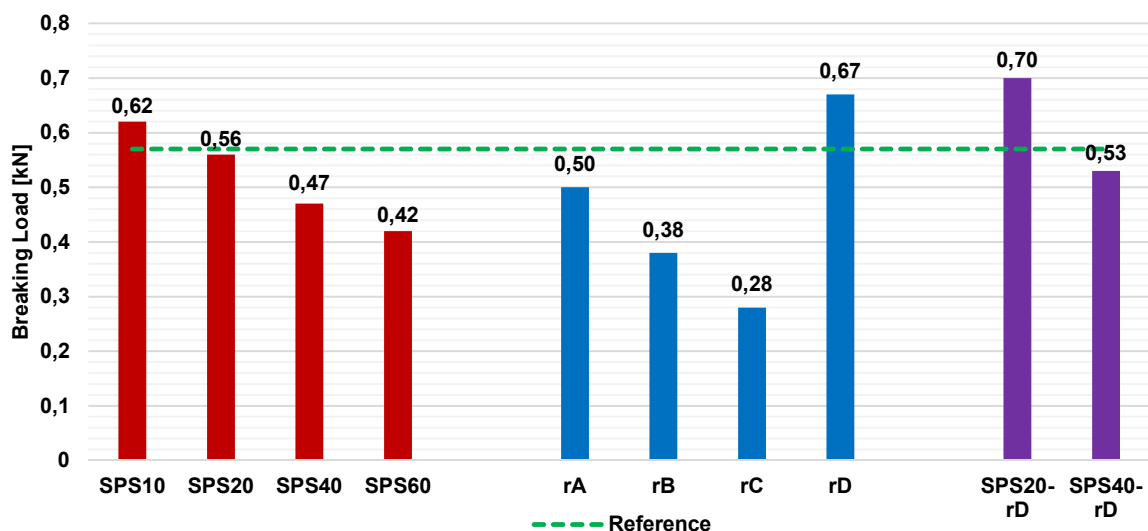


Figura 24. Carga de rotura obtenida para cada uno de los escenarios (placas) desarrollados. Fuente: Elaboración propia.

Comportamiento térmico de las placas

Los resultados del ensayo de conductividad térmica para todas las placas se muestran en la Figura 25. Los valores obtenidos mostraron que, cuando aumentó la cantidad de residuos de PC añadidos a las placas, la conductividad térmica de los compuestos disminuyó. En ese sentido, las placas que contenían agregado plástico en la matriz (escenarios 1 y 3) fueron los que presentaron mejor comportamiento térmico. El mejor valor de conductividad térmica (0,16 W/mK) se logró para las placas SPS60, en las que se obtuvo una reducción del 36% respecto a las muestras de referencia. Por otro lado, a pesar de disminuir levemente los valores de conductividad, los peores resultados se obtuvieron para las muestras del escenario 2, ya que la cantidad de residuo plástico que contenían fue mínima en comparación con las otras series.

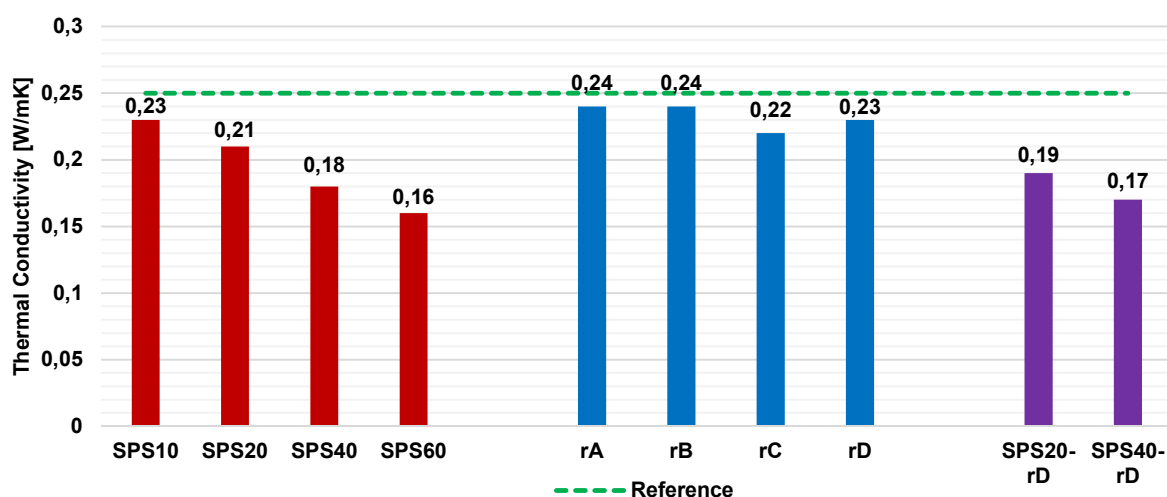


Figura 25. Conductividad térmica obtenida para cada uno de los escenarios (placas) desarrollados. Fuente: Elaboración propia.

SECCIÓN 3: REUTILIZACIÓN DE RESIDUOS DE YESO COMO SUSTITUTO TOTAL Y/O PARCIAL DEL YESO COMERCIAL [ARTÍCULOS 6, 7 y 8]

3.1. Breve definición de los residuos de yeso empleados

En este trabajo, se utilizaron tres tipos diferentes de yeso para desarrollar nuevos compuestos de yeso:

- *Yeso comercial (CG)*: se utilizó yeso de fraguado controlado, también conocido como yeso para la construcción, o yeso B1 según la norma UNE-EN 13279-1.
- *Yeso de desulfuración de gases de combustión (FGD)*: el yeso sintético utilizado en la investigación se obtuvo de la desulfuración de gases producida en la central térmica de Pego (Portugal).
- *Residuos de yeso generados en la producción de placas de yeso laminado (GPW)*: se obtuvo a partir del polvo generado durante el proceso de corte de las placas de yeso de una planta de fabricación ubicada en Sines (Portugal).

En esta investigación se estudió la influencia de diversos procesos de calentamiento en la utilización de los residuos de yeso. Además, ambos residuos de yeso se utilizaron en su estado original, sin ningún tipo de calentamiento. La Tabla 2 recoge la descripción de los distintos procesos de calentamiento, temperatura y tiempo, realizados (*Artículo 7*).

Tabla 2. Descripción de los diferentes procesos de calentamiento realizados.

Proceso de Calentamiento	Sin Calentamiento (WH)	100-6	100-24	150-3	150-6	180-3	180-6
Temperatura [°C]	-	100	100	150	150	180	180
Tiempo [h]	-	6	24	3	6	3	6

Para identificar las fases cristalinas de cada material tras los distintos procesos de calentamiento se emplea la técnica de la difracción de rayos X (XRD). Las Figuras 26 y 27 muestran los resultados obtenidos para cada uno de los dos residuos empleados y los distintos calentamientos.

La Figura 26 muestra los resultados de la difracción del residuo de FGD después de cada proceso de calentamiento. Como era de esperar, la cantidad de partículas de yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) disminuyó al producirse el calentamiento. Sin embargo, sólo uno de los métodos de calcinación desarrollados (180 °C durante 6 horas) transformó todas las partículas de yeso en basanita ($\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$). Además, la calcinación a 100 °C durante 24 horas transformó una gran cantidad de yeso en basanita, quedando solo una mínima cantidad de partículas dihidratadas.

Por su parte, la Figura 27 presenta los difractogramas obtenidos para GPW después de cada proceso de calentamiento. Al igual que en el caso anterior, la cantidad de partículas de yeso disminuyó con la calcinación. 3 horas a 150 °C fueron suficientes para sustituir todo el yeso por basanita. Sin embargo, 6 horas a 100 °C no fueron suficientes para eliminar completamente la fase de yeso, es decir, quedó una pequeña parte dihidratada en el material. Finalmente, se considera fundamental reseñar que en el material sin calentar se localizó un alto porcentaje de partículas hemihidratadas, haciéndolo a priori óptimo para ser usado en las mezclas sin calentamiento previo alguno.

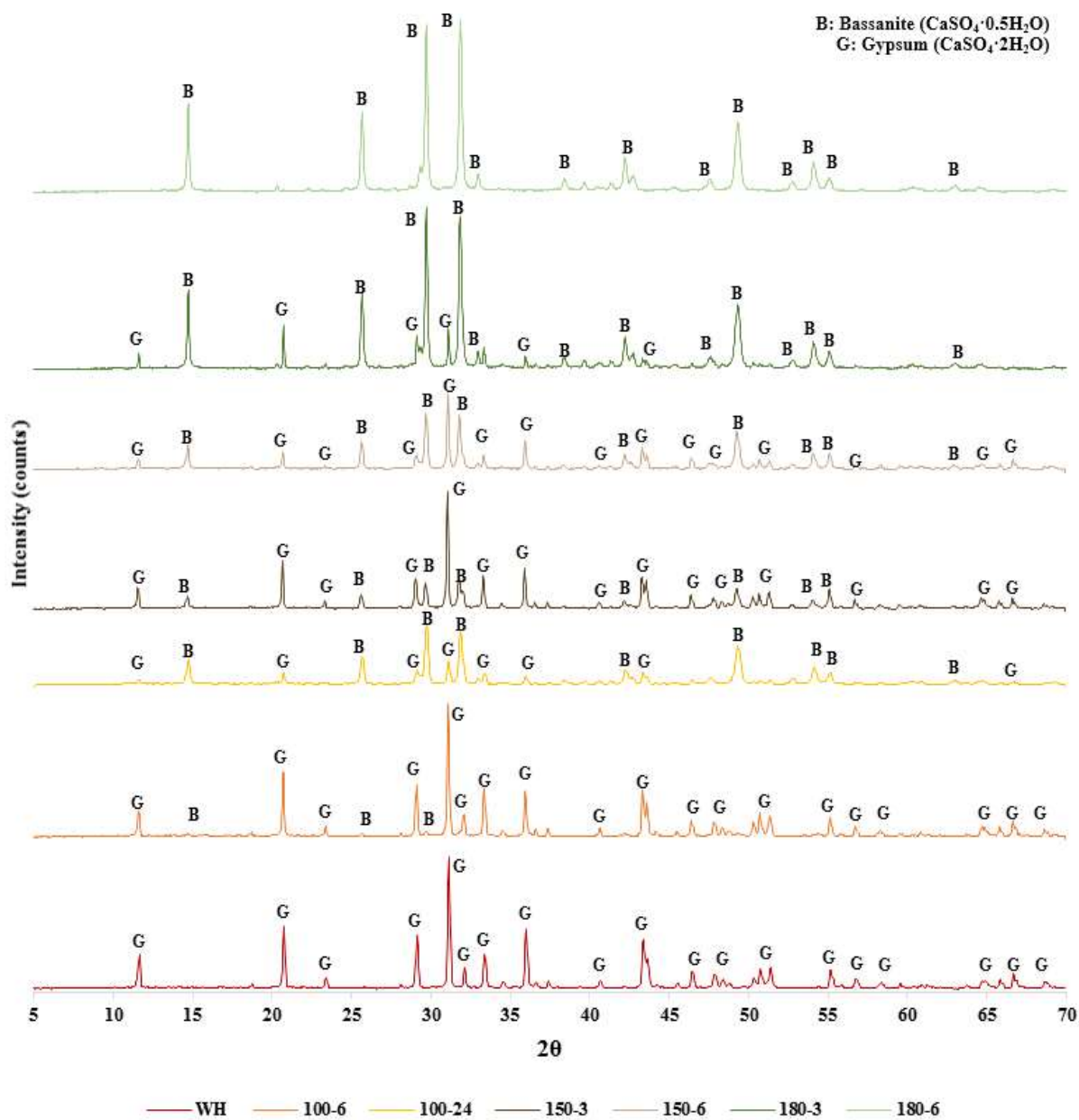


Figura 26. Difractogramas obtenidos para el yeso FGD tras los distintos procesos de calentamiento.
Fuente: Elaboración propia.

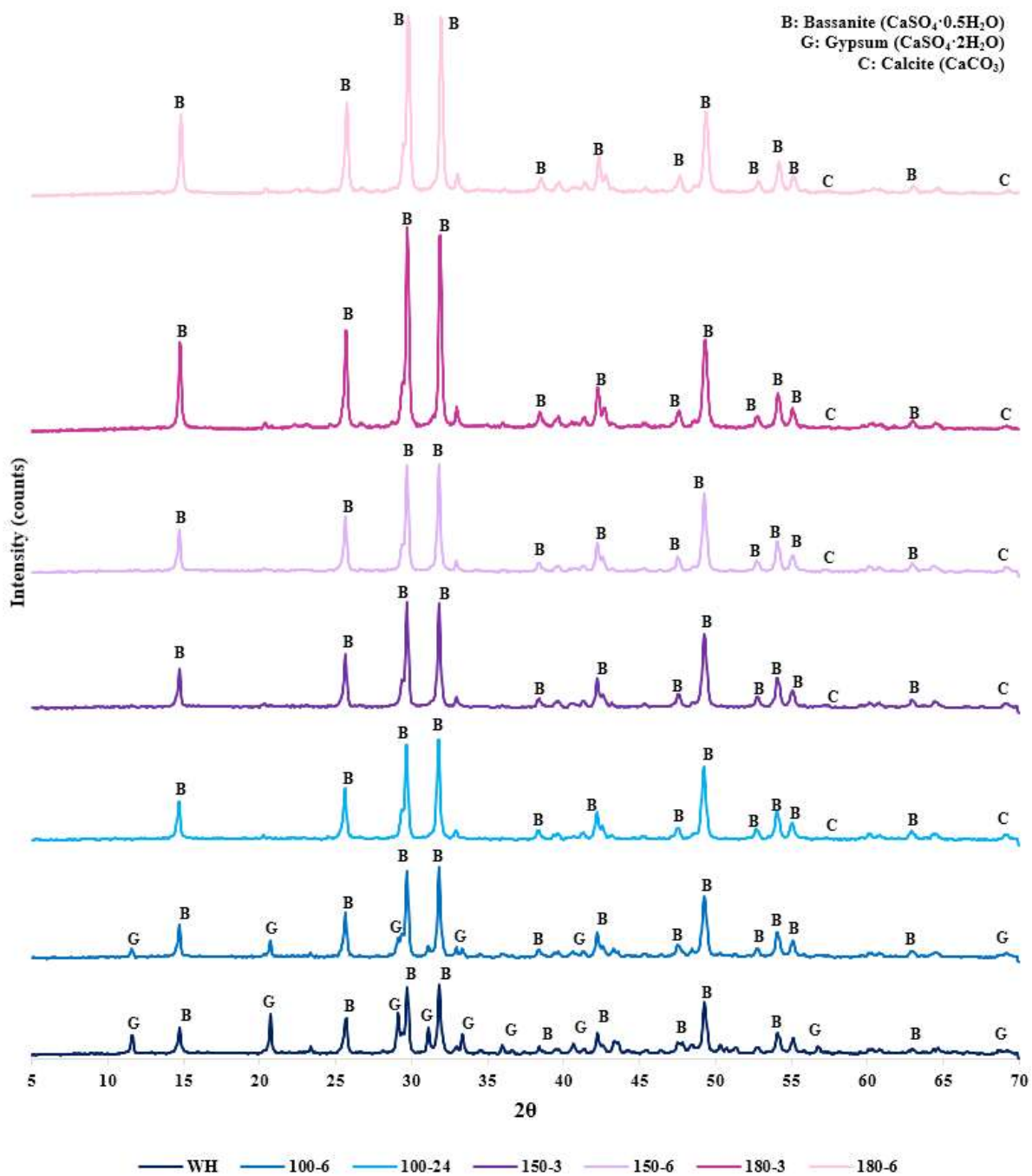


Figura 27. Difractogramas obtenidos para el yeso GPW tras los distintos procesos de calentamiento.
 Fuente: Elaboración propia.

3.2. Caracterización de los compuestos de yeso con una matriz reciclada

Una vez caracterizados los dos tipos de residuos de yeso a emplear en esta investigación, se plantea su utilización como sustitutos parciales y/o totales del yeso comercial. Así, se desarrollan series de probetas con diferentes porcentajes de sustitución (25, 50, 75 y 100%), en peso, sobre el total de yeso comercial empleado.

En esta línea resulta fundamental estudiar la trabajabilidad de la mezcla pues, según las investigaciones anteriores, resulta ser un factor determinante a la hora de materializar los nuevos compuestos de matriz reciclada (*Artículo 7*). Posteriormente, y a la vista de los resultados, se analizan algunas propiedades como la densidad aparente en estado seco o la resistencia a flexión y/o compresión de las pastas. Finalmente, se emplea de nuevo la técnica SEM para la justificación de algunos de los valores obtenidos (*Artículo 6*).

Trabajabilidad de las pastas. Relación agua-yeso

La trabajabilidad está directamente relacionada con la relación agua/yeso (w/g) de las mezclas. Según la normativa, el contenido de agua de cada mezcla se puede medir utilizando el procedimiento de la mesa de sacudidas.

La Figura 28 muestra las relaciones w/g de los diversos compuestos FGD. La cantidad de agua necesaria disminuyó a medida que aumentaba el contenido de residuo añadido. Además, esa disminución fue mayor en yesos con desechos sin calentar. También se observó que la muestra FGD 100 WH no se pudo producir porque el polvo no reaccionó, en su totalidad, con el agua. Este comportamiento se puede justificar con los difractogramas de cada material que se muestran en la Figura 26. Según ellos, cuando la cantidad de partículas de yeso en el residuo es mayor, la cantidad de agua de amasado disminuye. Finalmente, se observó que cuando se utilizó FGD calentado a 180 °C para realizar los nuevos yesos, la relación w/g fue, en todos los casos, la misma que para la muestra de referencia (0,55).

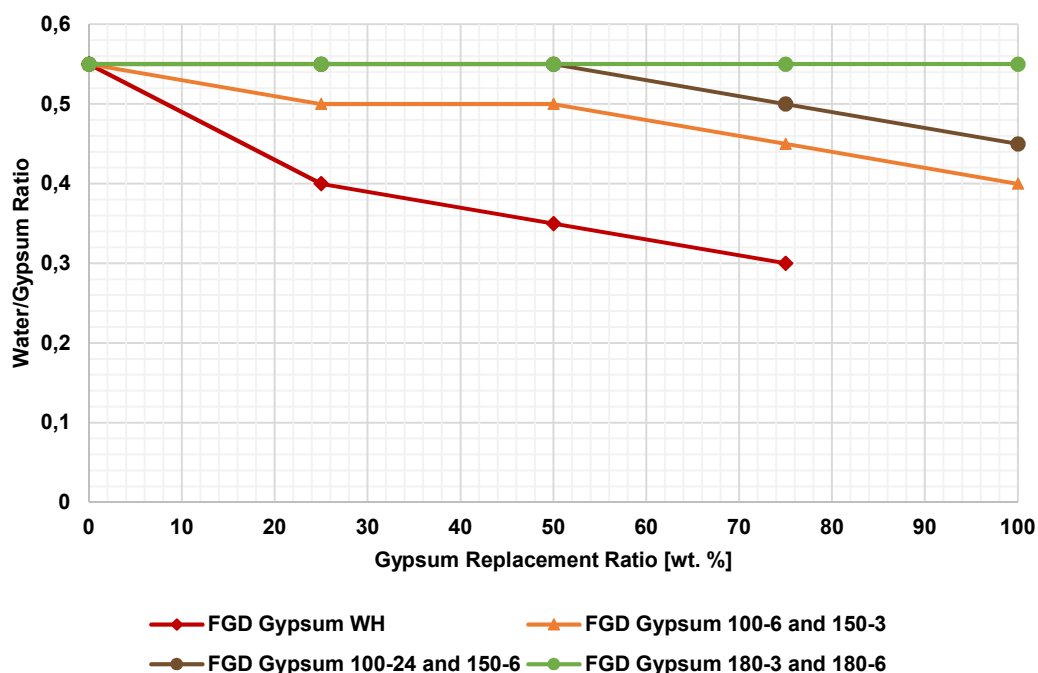


Figura 28. Relación agua/yeso requerida para las diferentes mezclas realizadas con yeso FGD.

Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, la relación w/g para los yesos GPW aumentó cuando se incrementó el contenido de desechos en las mezclas. Como se aprecia en la Figura 29, ese aumento es mayor en mezclas que usan GPW sin calentar. Con la incorporación de sólo un 5% de residuos de yeso, se obtuvo un aumento de agua del 45% para alcanzar los requisitos normativos. Finalmente, al igual que sucedió con los yesos FGD, se encontró que cuando se utilizó GPW calentado a 180 °C para crear los nuevos yesos, la relación w/g fue, en todos los casos, la misma que para la muestra de referencia (0,55).

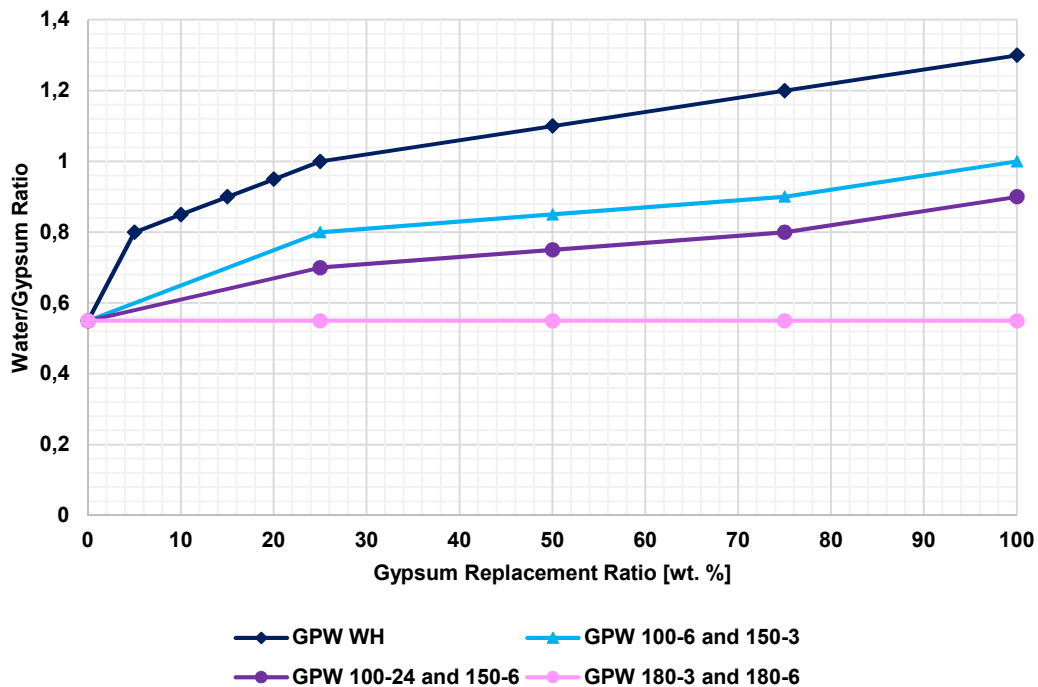


Figura 29. Relación agua/yeso requerida para las diferentes mezclas realizadas con yeso GPW.
Fuente: Elaboración propia.

Como resumen, los resultados anteriores confirman que es imposible la utilización de yesos FGD sin ser estos sometidos a un importante proceso de calentamiento previo (180 °C durante 6 horas), perdiendo así gran parte de los beneficios medioambientales de su utilización. Por todo ello, a partir de este momento, en este resumen nos centraremos únicamente en los resultados alcanzados para el yeso GPW. Sin embargo, los datos de resistencias y demás propiedades para los compuestos con FGD quedan adecuadamente recogidos en los *Artículos 6 y 7*.

Densidad aparente de las mezclas GPW en estado seco

La densidad aparente en estado seco de las pastas de yeso GPW se presenta en la Figura 30. Los resultados obtenidos mostraron que la densidad de las mezclas disminuyó cuando aumentó el porcentaje de residuos añadidos, siendo mayor en aquellos con un calentamiento más intenso. En esta línea, la mayor bajada se obtiene para la mezcla GPW100 100-24, donde se logró una caída del 35,7% respecto al material de referencia.

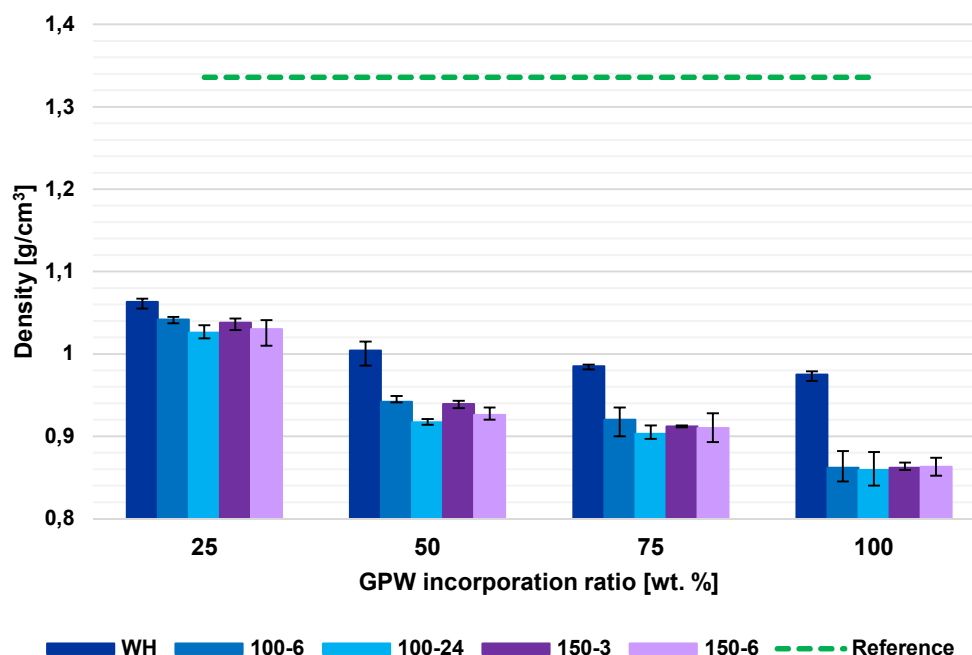


Figura 30. Densidad aparente en estado seco para las diferentes mezclas realizadas con yeso GPW.
Fuente: Elaboración propia.

Comportamiento mecánico de los compuestos GPW

Los resultados de la resistencia a flexión de los yesos GPW se presentan en la Figura 31. Se destaca que todos los revocos alcanzaron el valor mínimo de 1 MPa exigido por la normativa. Además, se pueden observar dos tipos de comportamiento diferentes, en función del proceso de calentamiento al que se sometió el residuo.

Por un lado, el GPW que contenía una pequeña parte de yeso sin calentar (GPW WH y GPW 100-6) presentó un comportamiento similar inesperado. En términos generales, para ambos materiales, la resistencia a la flexión de los composites aumentó mientras aumentaba el porcentaje de GPW, con un gran descenso entre la muestra de referencia y las mezclas con un 25% de residuo. Esto puede justificarse por el aumento de la relación w/g en las mezclas. El yeso GPW100 WH alcanzó el valor de resistencia más alto (3,42 MPa), superando la muestra de referencia en un 11%. Estos resultados no concuerdan con los valores de densidad obtenidos para esos compuestos. Por lo general, una disminución de la densidad del yeso está relacionada con una disminución de los valores de resistencia, lo que no sucedió en estos casos. La menor densidad del material suele estar vinculada a un aumento de la porosidad, además de una pérdida de la cohesión interna de las matrices.

Sin embargo, en las mezclas con residuos de yeso calcinado (GPW 100-24, GPW 150-3 y GPW 150-6), la resistencia a la flexión disminuyó cuando aumentó el porcentaje de GPW. El valor más bajo se alcanzó para el yeso GPW100 150-6 (1,52 MPa), lo que significó una caída del 50% con respecto a la muestra de referencia.

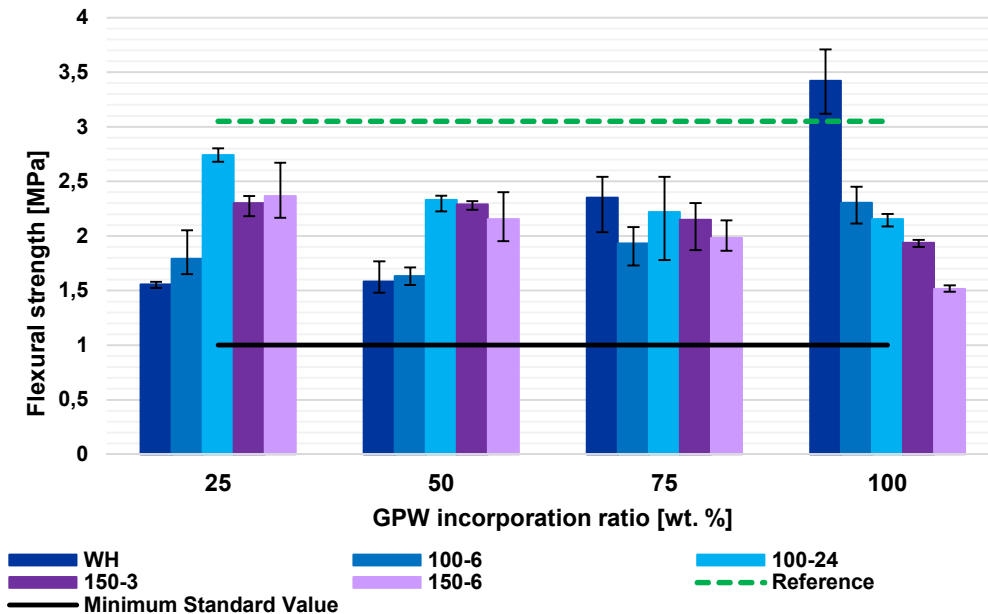


Figura 31. Resistencia a flexión para las diferentes mezclas realizadas con yeso GPW. Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de resistencia a compresión (Figura 32) de las mezclas GPW muestran un comportamiento muy similar al obtenido para la resistencia a flexión. En este caso, dos mezclas (GPW25 100-24 y GPW100 WH) obtuvieron un valor superior al del material de referencia. Además, el valor más bajo en este caso se obtuvo para el yeso GPW25 WH (2,26 MPa). En cuanto a la resistencia a compresión, todos los resultados son superiores al mínimo de 2 MPa exigido por la normativa.

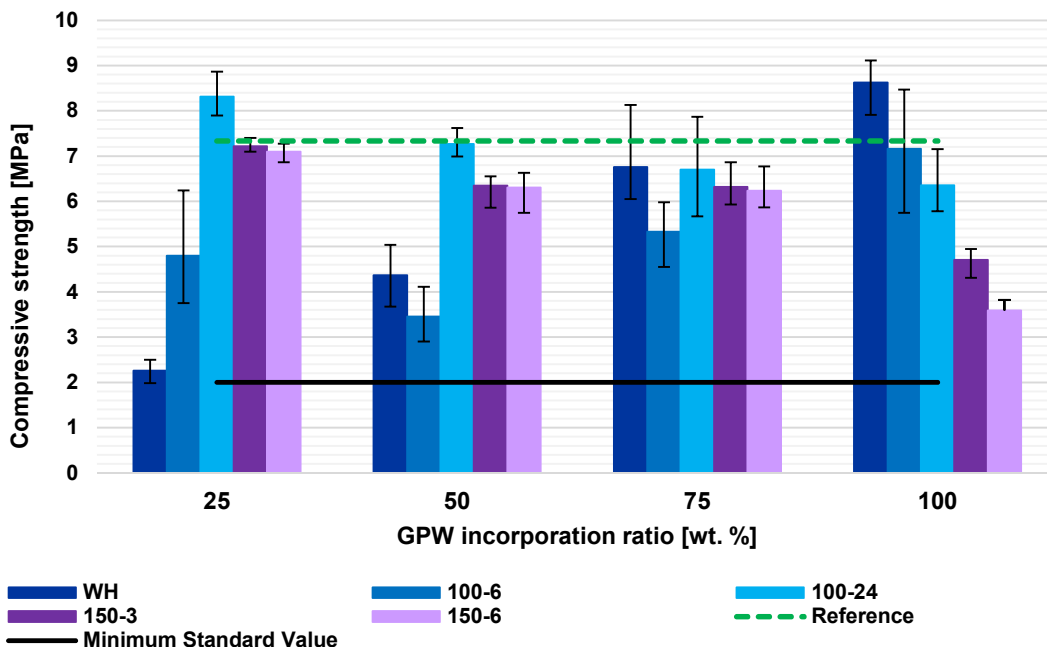


Figura 32. Resistencia a compresión para las diferentes mezclas realizadas con yeso GPW. Fuente: Elaboración propia.

Se realizó un análisis SEM para justificar algunos de los resultados obtenidos de las pruebas experimentales. La Figura 33A muestra una imagen del yeso GPW100 WH. Se aprecia una muy buena adherencia entre las fibras de vidrio de los residuos y el propio yeso. Además, la matriz de yeso se muestra muy compacta, con poros muy pequeños. Ambos factores pueden justificar el buen desempeño de ese compuesto. Por otro lado, la Figura 33B presenta una imagen de GPW100 150-6. En ella se observa una degradación superficial de la fibra de vidrio. Esa degradación puede estar provocada por la alta temperatura del proceso de calentamiento, lo que podría justificar la caída de resistencia de los compuestos con ese tipo de residuo.

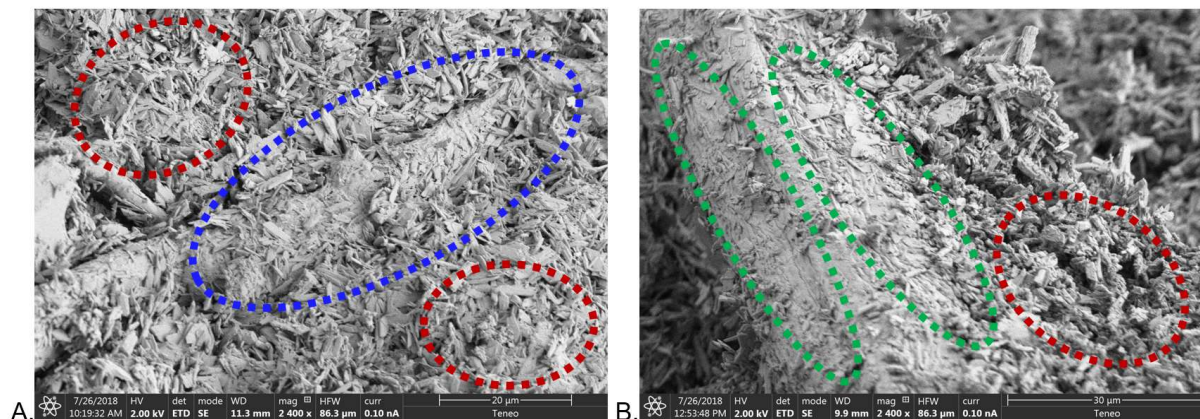


Figura 33. Imágenes SEM de yesos GPW (2400x). **A)** GPW100 WH. **B)** GPW100 150-6. Aspectos destacados: matriz de yeso compacta (rojo); buena adherencia entre las fibras de vidrio y el yeso (azul) y degradación superficial de la fibra de vidrio (verde). Fuente: Elaboración propia.

3.3. Beneficios medioambientales del empleo de yeso reciclado frente al comercial

Con el objetivo de analizar el beneficio de emplear yeso reciclado procedente de desechos de producción frente al uso del yeso comercial, en el *Artículo 8* se lleva a cabo un análisis de ciclo de vida (ACV) de los procesos de producción de dichos materiales.

Los datos utilizados para la realización de la medición fueron tomados directamente de una planta de producción de yeso mediana ubicada en Jaén. Para la ejecución del análisis se utilizó la metodología Impact 2002+, que ya había sido empleada por otros investigadores en trabajos similares.

Para este estudio, se tomaron en cuenta tres escenarios diferentes. El de referencia estaba vinculado a la producción de yeso comercial. Además, se analizaron dos tipos diferentes de residuos de yeso para obtener el yeso reciclado: desechos de paneles de cartón yeso y polvo procedente de los procesos de corte de las placas. Los límites del sistema, con todas las fases, para cada tipo de yeso se presentan en la Figura 34.

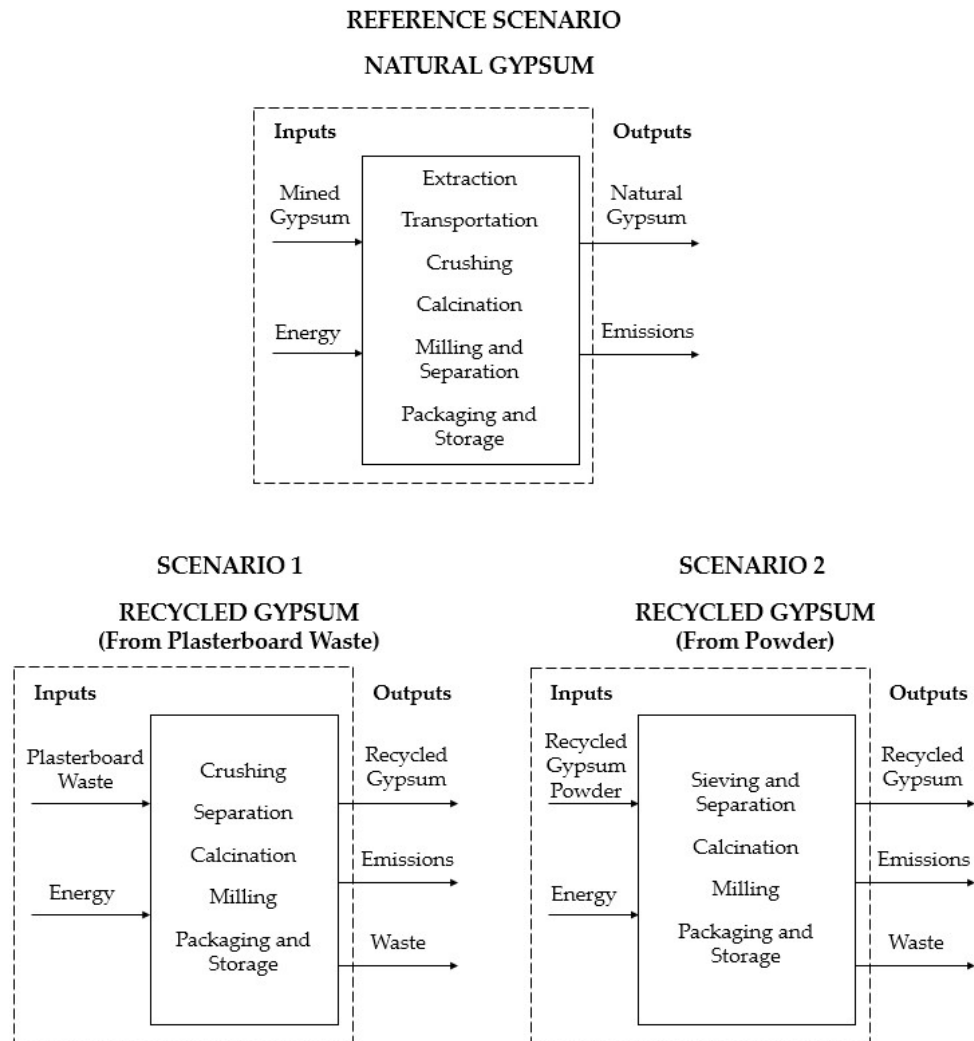


Figura 34. Límites del sistema para la producción de cada uno de los tipos de yeso estudiados.
Fuente: Elaboración propia.

Resultados del ACV

Los resultados obtenidos para los indicadores MidPoint para cada tipo de yeso se muestran en la Figura 35. Se puede observar que, en todos los indicadores de impacto, excepto la extracción de minerales, el yeso comercial generó un impacto mayor en comparación con las opciones de yeso reciclado. Esta diferencia alcanzó su valor más alto en la categoría de radiación ionizante, donde se registró un incremento del 87,82% con respecto al yeso procedente de residuos de cartón-yeso. Además, es importante señalar que el yeso en polvo reciclado es el que menos impacto genera en todas las categorías analizadas, llegando a alcanzar un 67,57% menos que el procedente de placas. Teniendo en cuenta las emisiones de CO₂ (calentamiento global) de la producción de cada yeso, el reciclaje de yeso puede generar ahorros de entre un 40 y un 45% en comparación con la fabricación de yeso comercial. Otro efecto secundario positivo significativo del reciclaje de yeso se puede ver en la reducción del consumo de energía para la fabricación de yeso reciclado. Aquí, se observó una disminución de casi el 60%, que cumple con los esfuerzos que conducen a reducir las demandas de consumo de energía del sector de la construcción.

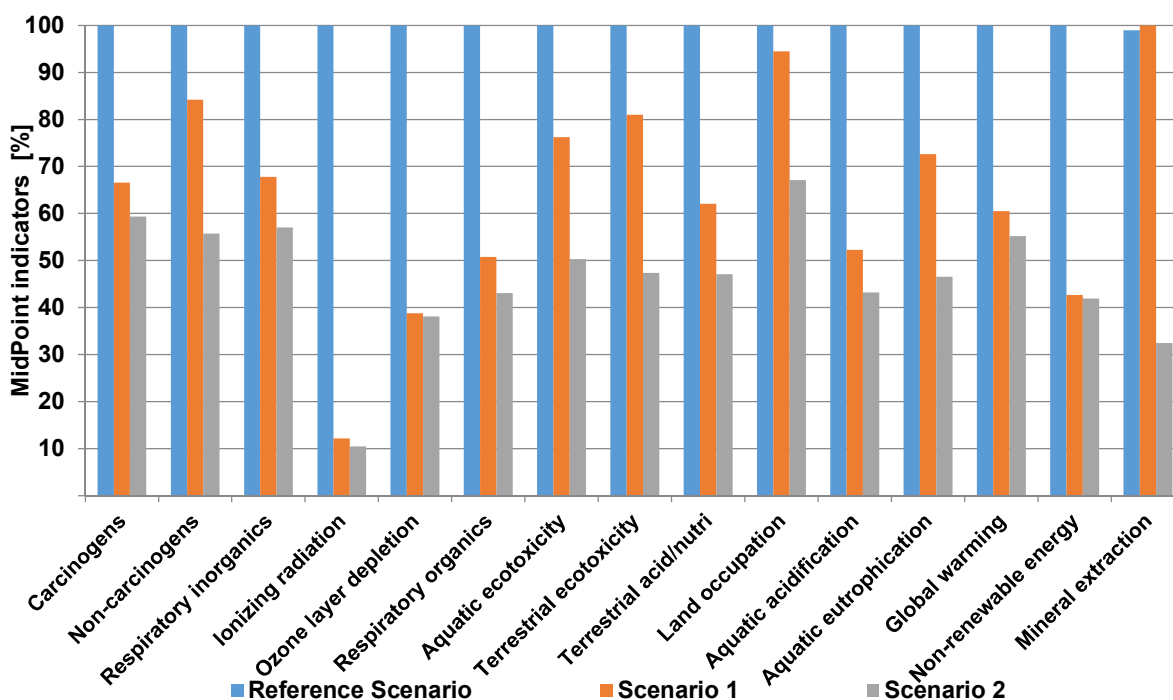


Figura 35. Resultados para los indicadores MidPoint. Comparación entre los diferentes tipos de yeso estudiados. Fuente: Elaboración propia.

Los resultados obtenidos para los indicadores EndPoint normalizados se presentan en la Figura 36. Como se puede apreciar, se logró una importante reducción de los impactos medioambientales al comparar la producción de yeso reciclado con el comercial. En ese sentido, la mayor reducción se obtuvo para la categoría de recursos (56 y 58%), en la que todos los materiales lograron su mayor impacto. En términos generales, los mejores resultados, en cuanto a las categorías EndPoint, se obtuvieron para la producción de yeso reciclado (en polvo), siendo sus resultados similares a los obtenidos para los residuos de placas de cartón-yeso (sólo un 6% inferior).

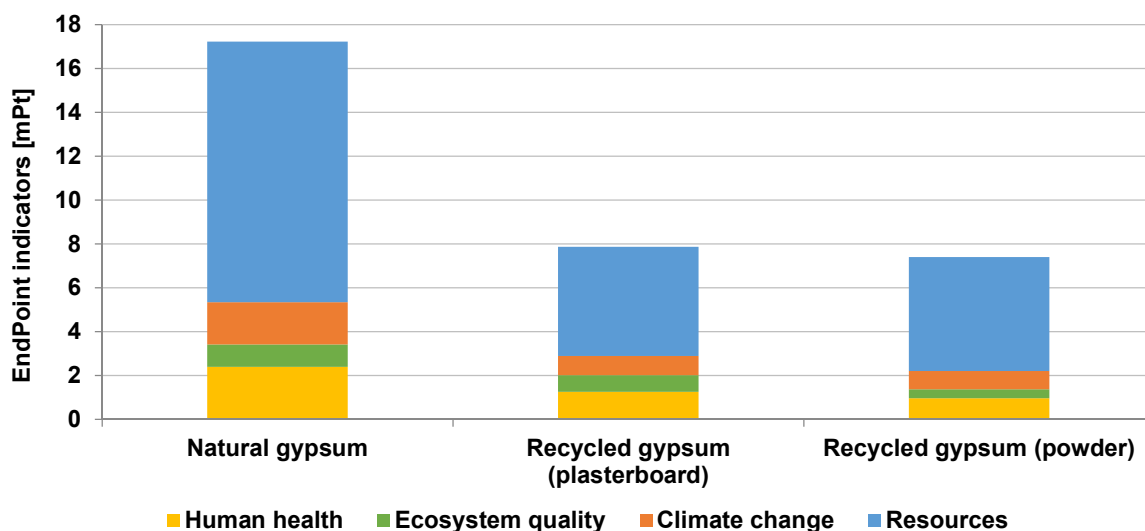


Figura 36. Resultados para los indicadores EndPoint. Comparación entre los diferentes tipos de yeso estudiados. Fuente: Elaboración propia.

SECCIÓN 4: DESARROLLO DE MATERIALES PARA REVESTIMIENTOS INTERIORES CON MATRIZ DE YESO RECICLADO Y RESIDUOS PLÁSTICOS [ARTÍCULO 9]

Las tres secciones anteriormente expuestas poseen un cierto carácter independiente entre ellas. Es por ello por lo que se optó por, a raíz de un exhaustivo análisis de los resultados obtenidos, emplear esta cuarta y última sección para ligar las anteriores, dando así unidad a la Tesis que se presenta.

En esta línea, se observó que la utilización de residuos de policarbonato (de hasta 4 mm de tamaño) dio como resultado el mejor aprovechamiento en lo que a empleo de agregado en la mezcla de yeso se refiere.

Por su parte, los residuos de polvo de yeso sin calentar procedentes de los desechos de producción obtuvieron excelentes resultados en términos de ligereza, resistencia y comportamiento térmico.

Por todo ello, en esta última sección se ha optado por aunar ambos residuos para la generación de nuevos compuestos de yeso, planteándose como principal objetivo el desarrollo de pastas 100% recicladas con propiedades mejoradas respecto a los materiales de referencia.

4.1. Breve definición de los residuos empleados

Para este estudio, los siguientes materiales (Figura 37) se utilizaron para el desarrollo de los nuevos compuestos de yeso:

- *Yeso comercial (CG)*: yeso comercial tradicional para la construcción B1, con propiedades de fraguado controlado.
- *Residuos de yeso sin calentar tomados de desechos de producción (GPW)*: adquiridos en una planta de fabricación de placas de yeso laminado con sede en Sines (Portugal). El yeso reciclado proviene del proceso de corte de los paneles, utilizándose piezas menores a 1 mm.
- *Residuos de policarbonato (PC)*: CD y DVD rechazados obtenidos en todos los puntos de reciclaje ubicados en la Universidad de Sevilla. Posteriormente, se trituraron las piezas obteniendo piezas menores a 4 mm.
- *Ácido cítrico*: utilizado como retardador de fraguado en algunos compuestos, para mantener la relación w/g en todas las pastas.

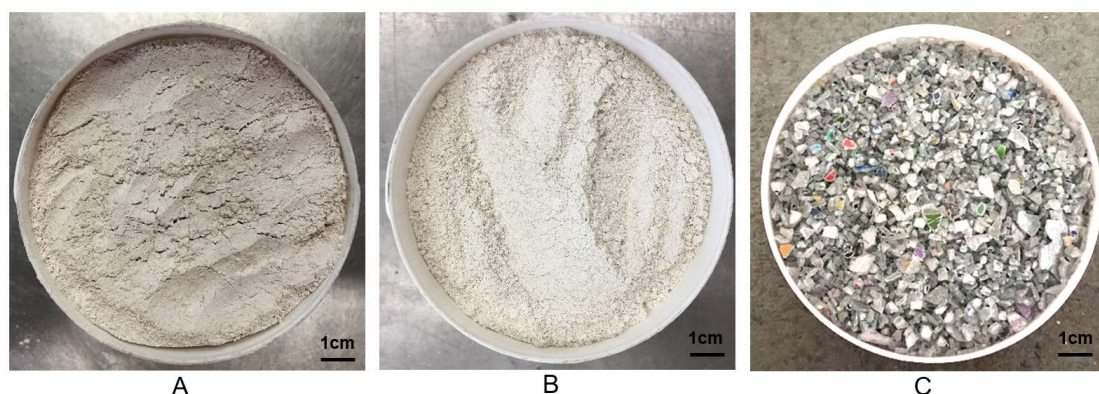


Figura 37. Materiales empleados para el desarrollo de los nuevos compuestos de yeso reciclado con agregado plástico. **A)** CG, **B)** GPW. **C)** PC. Fuente: Elaboración propia.

4.2. Caracterización de los nuevos compuestos de yeso reciclado con agregado plástico

En esta última sección se generan diversos compuestos cuyas proporciones son las resultantes de combinar los porcentajes de incorporación del agregado de PC (0, 10, 20, 30 y 40% respecto al peso de yeso empleado) y de sustitución del yeso comercial por GPW (0, 50 y 100%). Señalar también que el ácido cítrico se incorporará a razón de 1‰ respecto a la masa de yeso reciclado utilizado.

Desarrolladas las diferentes mezclas, se mide la densidad aparente en estado seco de las mismas, su resistencia a flexión y compresión y su comportamiento térmico.

Densidad aparente en estado seco

La Figura 38 presenta los resultados de la densidad aparente seca de las nuevas mezclas de yeso. Se concluye que, cuando aumentó el porcentaje de residuo de PC agregado a los yesos, la densidad del material disminuyó. Por tanto, la mayor disminución se obtuvo para la mezcla GPW100 P40, en la que la densidad del compuesto fue un 36,8% menor que la obtenida para el material de referencia. Además, las diferencias entre los valores de densidad conseguidos para las pastas GPW100 y GPW50, con el mismo porcentaje de residuos plásticos añadidos, no fue muy significativa respecto al obtenido para la serie de referencia (sin yeso reciclado).

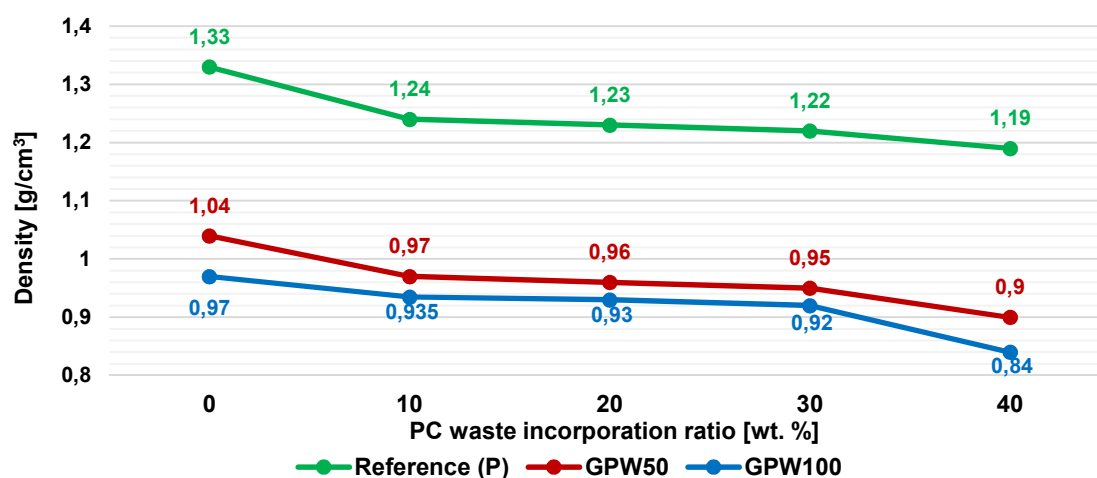


Figura 38. Densidad aparente en estado seco para las diferentes mezclas realizadas con yeso GPW y agregado de PC. Fuente: Elaboración propia.

Propiedades mecánicas

La Figura 39 presenta los resultados de la resistencia a flexión (con desviación estándar). En ella se muestra que, al aumentar la cantidad de residuos de PC añadido a los yesos, se redujo la resistencia a flexión de los mismos. En todas las mezclas, y para el mismo contenido de agregado, los compuestos con sustitución completa del yeso comercial por uno reciclado (serie GPW100) mostraron el mejor comportamiento mecánico. Por otro lado, las mezclas GPW50 presentaron la peor capacidad. Según los resultados, el mayor aumento en el rendimiento de resistencia de los yesos, en comparación con el material sin agregado plástico alguno, se logró en muestras con 10% de residuo de PC, con el mayor crecimiento (32,9%) encontrado en el compuesto GPW50-P10. Además, todas las mezclas con 50% de residuo de yeso (serie GPW50) que contenían agregado de PC mostraron una mejora en su resistencia a flexión respecto a la sin agregado plástico (GWP50), que alcanzó el valor más bajo (1.58 MPa). Finalmente, todos los compuestos desarrollados alcanzaron el requisito estándar mínimo de 1 MPa para pastas de yeso, por lo que son aptos para su uso en cualquier trabajo de construcción.

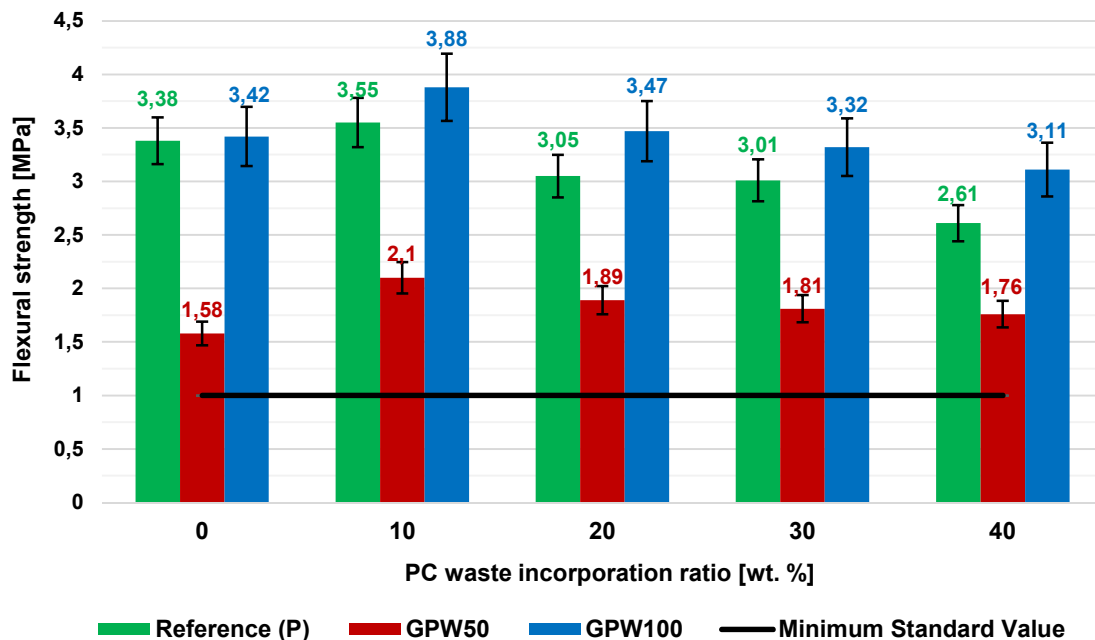


Figura 39. Resistencia a flexión para las diferentes mezclas realizadas con yeso GPW y agregado de PC. Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de la resistencia a compresión de los compuestos de yeso se presentan en la Figura 40 (incluyendo desviación estándar). En términos generales, se detectó el mismo comportamiento que en el ensayo de flexión. Se obtuvo una ligera mejora de los valores de resistencia, en todos los casos, cuando se utilizó PC al 10% en peso como agregado en las mezclas. Una vez más, la mezcla GPW100-P10 fue la que mejor desempeño obtuvo (9,30 MPa), con una mejora del 26,9% respecto a la muestra de referencia. Por otro lado, el peor resultado de resistencia a compresión se alcanzó para el compuesto GPW50-P40, con 4.01 MPa. Además, es importante destacar nuevamente que, para todos los compuestos desarrollados, se superó notablemente el valor mínimo de 2 MPa exigido por la normativa para la resistencia a la compresión de pastas de yeso.

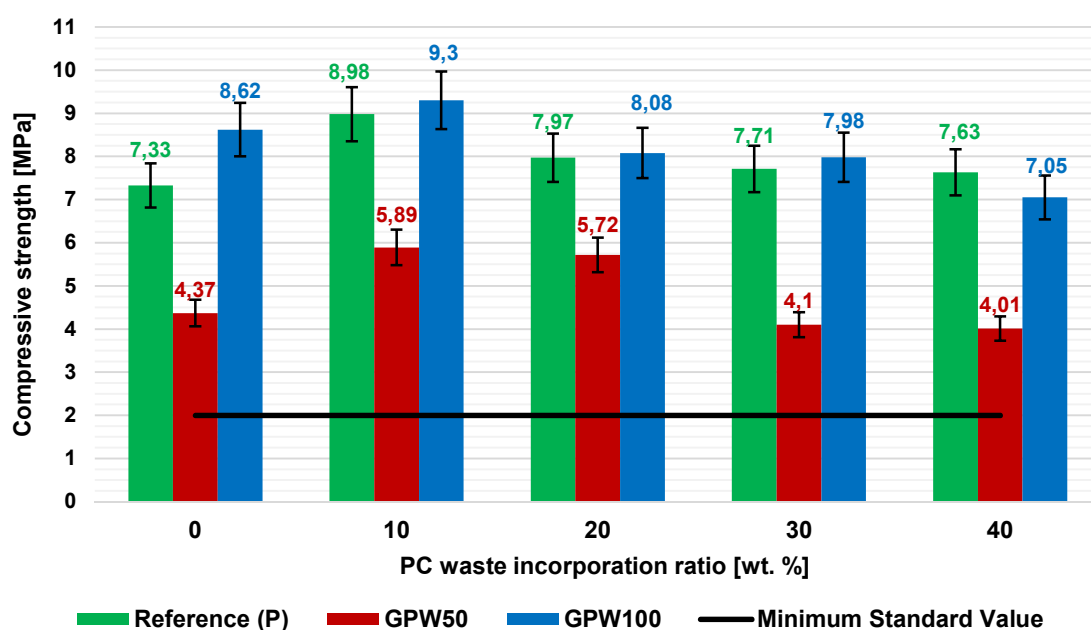


Figura 40. Resistencia a compresión para las diferentes mezclas realizadas con yeso GPW y agregado de PC. Fuente: Elaboración propia.

Comportamiento térmico

De acuerdo con los resultados obtenidos en este ensayo (Figura 41), se puede decir que se observó una leve caída en la conductividad térmica de los nuevos compuestos de yeso a medida que aumentaba la cantidad de ambos tipos de residuos añadidos (GPW y PC). Así, los mejores valores se obtuvieron para GPW100-P40 (0,143 W/mK), en el que se obtuvo una mejora del 42,8% con respecto al yeso de referencia (0,250 W/mK).

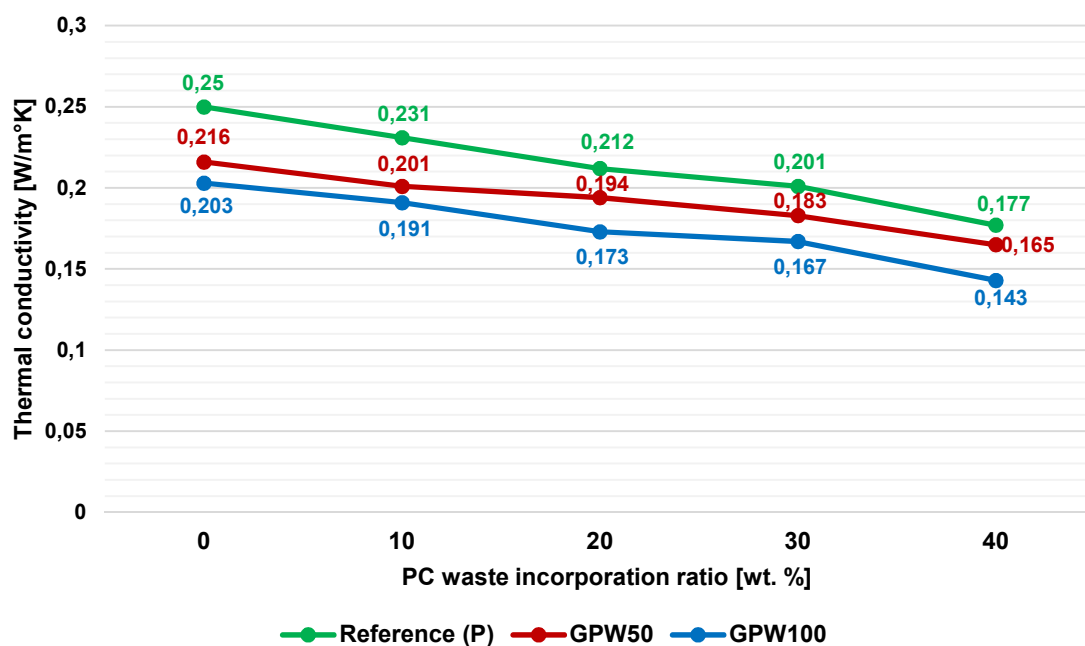


Figura 40. Conductividad térmica para las diferentes mezclas realizadas con yeso GPW y agregado de PC. Fuente: Elaboración propia.

V. CONCLUSIONES

La Tesis Doctoral que aquí se presenta ha pretendido aportar un granito de arena en el avance del conocimiento en la generación de nuevos materiales y productos ecoeficientes para el sector de la construcción. Centrándonos en los elementos ejecutados con una matriz de yeso, se comienza analizando la influencia de incorporar residuos plásticos y de madera como agregados en las mezclas. Posteriormente se trabajó con la propia matriz de yeso, analizándose diversas alternativas de sustitución por otro material de origen reciclado. Finalmente, y aunando las dos ideas anteriores, se desarrollaron compuestos completamente reciclados, incorporando los beneficios de la matriz de yeso reciclado y del agregado plástico.

A continuación, se muestran las diferentes conclusiones parciales obtenidas para cada una de las secciones de esta investigación. Se finalizará con una reflexión general y planteando futuras líneas de investigación.

Sección 1: Caracterización de nuevos compuestos y productos con base de yeso y residuos de madera

En este primer bloque de contenidos de la Tesis se ha demostrado la viabilidad de incorporar residuos de madera (serrín y virulas), procedentes de la demolición de viviendas, como agregados en mezclas de yeso. De los resultados obtenidos se pueden obtener las siguientes conclusiones:

- Es posible incorporar hasta un 40% en peso de agregado de madera en las mezclas de yeso cumpliendo con los requisitos normativos relativos a la resistencia máxima exigida a estos compuestos. Además, se consigue disminuir la ligereza del material hasta en un 46.3%.
- Se verificó, a escala real de laboratorio, que es posible desarrollar placas de yeso con residuos de madera (con hasta un 20% de agregado) resistiendo las exigencias normativas relativas al ensayo a flexión de las piezas. Además, se logra disminuir considerablemente la conductividad térmica del material (37.6%), así como plantear un producto competitivo en lo relativo a la absorción acústica del panel en las frecuencias características de la voz humana.
- Finalmente, como contrapunto, se verificó la imposibilidad de disponer productos con más de un 20% de virutas de madera como revestimientos interiores de locales húmedos, mientras que las muestras con serrín al mismo porcentaje no mostraron daño alguno.

Sección 2: Generación de nuevos compuestos y productos con base de yeso y residuos plásticos

En la actualidad, los residuos plásticos están causando un grave problema medioambiental en todo el Planeta debido al incontrolable consumo y posterior desecho de estos materiales. En esta línea se ha optado por utilizar desechos de policarbonato tomados del reciclaje de CDs y DVDs. Trabajamos así con uno de los materiales plásticos con mejores capacidades resistentes. Su empleo como agregado en materiales y productos con base de yeso queda estudiado en esta sección. En ella sacamos las siguientes conclusiones:

- Manteniendo la trabajabilidad de las nuevas mezclas, es posible incorporar este residuo en las pastas a razón de hasta un 60% respecto al peso de yeso comercial empleado, sobrepasando, en todos los casos, los valores de resistencia mínimos exigidos. Así se

consigue mejorar la ligereza de los compuestos, así como su conductividad térmica. Finalmente, es importante destacar que, para ciertos porcentajes de incorporación, se llega a sobrepasar los valores de resistencia a flexión y compresión del material de control.

- Tras la caracterización de los compuestos yeso-PC, se elaboraron placas de revestimiento interior, demostrándose que la combinación del uso del residuo de CDs como agregado en la matriz y como refuerzo interior de las planchas, es la que mejor rendimiento ofrecía si tomamos en cuenta los valores de resistencia y de comportamiento térmico.

Sección 3: Reutilización de residuos de yeso como sustituto total y/o parcial del yeso comercial

Hasta ahora los residuos habían sido empleados como agregados en las mezclas, sin embargo, en esta tercera sección, se propone sustituir total o parcialmente el yeso comercial que compone la matriz por otro de origen reciclado, obteniendo las siguientes conclusiones:

- Aunque fue necesario un mayor contenido de agua en la producción de las mezclas, se logró un buen desempeño de las pastas cuando se utilizó residuo de yeso (GPW) sin calentar. Se obtuvo incluso un material más ligero y con mejores prestaciones resistentes. Por otro lado, se demostró la inviabilidad de utilizar FGD sin calentar como componente de yesos. Sin embargo, se obtuvo un buen comportamiento, en cuanto a trabajabilidad, cuando el polvo de yeso artificial de central térmica (FGD) se sometió a un proceso de calentamiento a 180 °C durante 6 horas.
- El análisis de ciclo de vida llevado a cabo demostró que el uso de yeso reciclado frente a otras opciones comerciales puede llegar a suponer hasta casi un 60% de reducción de ciertos impactos medioambientales ligados al proceso de producción del material.

Sección 4: Desarrollo de materiales para revestimientos interiores con matriz de yeso reciclado y residuos plásticos

En esta última sección se ha optado por aunar los residuos de policarbonato junto con los de yeso reciclado para la generación de nuevos compuestos de yeso, planteándose como principal objetivo el desarrollo de pastas 100% recicladas con propiedades mejoradas respecto a los materiales de referencia. Así, se desarrollaron nuevos yesos ligeros y ecoeficientes, completamente reciclados, con mayor resistencia a la flexión (hasta en un 14,8%), resistencia a la compresión (hasta en un 26,8%) y conductividad térmica (hasta un 42,8% menos), en relación con el material de referencia. Esto significa que los nuevos materiales desarrollados contribuyen a reducir significativamente las cantidades de estos residuos que terminan en vertederos, contribuyendo a una economía circular, al tiempo que logran una mejora notable de sus propiedades físicas y mecánicas.

Futuras líneas de investigación

A la vista de los resultados obtenidos en esta Tesis, se propone, como futuras líneas de trabajo, el análisis de las propiedades frente al fuego de los diferentes materiales y productos desarrollados. Igualmente, se está trabajando en la elaboración de pastas con una matriz de yeso reciclado y con la incorporación de agregado de madera.

V. CONCLUSIONS

The presented PhD. thesis tried to contribute in the advancement of knowledge in the generation of new materials and eco-efficient products for the construction sector. Focusing on the elements executed with a plaster matrix, we begin by analyzing the influence of incorporating plastic and wood waste as aggregates in the mixtures. Subsequently, we worked with the gypsum matrix itself, analyzing various alternatives for substituting another material of recycled origin. Finally, and combining the two previous ideas, completely recycled composites were developed, incorporating the benefits of the recycled gypsum matrix and plastic aggregate.

The different partial conclusions obtained for each of the sections of this research are shown below. It will end with a general reflection and proposing future lines of research.

Section 1: Characterization of new composites and products based on gypsum and wood residues

In this first block of contents of the Thesis, the viability of incorporating wood residues (sawdust and virules), coming from the demolition of houses, as aggregates in plaster mixtures has been demonstrated. From the results obtained, the following conclusions can be obtained:

- It is possible to incorporate up to 40% by weight of wood aggregate in the plaster mixtures, complying with the regulatory requirements regarding the maximum resistance required of these compounds. In addition, it is possible to reduce the lightness of the material by up to 46.3%.
- It was verified, on a real laboratory scale, that it is possible to develop plasterboards with wood residues (with up to 20% added), resisting the normative requirements related to the flexural test of the pieces. In addition, it is possible to considerably reduce the thermal conductivity of the material (37.6%), as well as to propose a competitive product regarding the acoustic absorption of the panel at the characteristic frequencies of the human voice.
- Finally, as a counterpoint, the impossibility of disposing products with more than 20% of wood shavings as interior linings of damp premises was verified, while the samples with sawdust at the same percentage did not show any damage.

Section 2: Generation of new compounds and products based on gypsum and plastic waste

At present, plastic waste is causing a serious environmental problem throughout the planet due to the uncontrollable consumption and subsequent disposal of these materials. In this line, it has been chosen to use polycarbonate waste taken from recycling CDs and DVDs. We thus work with one of the plastic materials with the best resistant capacities. Its use as an aggregate in gypsum-based materials and products is studied in this section. In it we draw the following conclusions:

- Maintaining the workability of the new mixtures, it is possible to incorporate this residue in the pastes at a rate of up to 60% with respect to the weight of commercial plaster used, exceeding, in all cases, the minimum resistance values required. This improves the lightness of the compounds, as well as their thermal conductivity. Finally, it is important to note that, for certain incorporation percentages, the flexural and compressive strength values of the control material are exceeded.

- After the characterization of the gypsum-PC compounds, interior cladding plates were elaborated, showing that the combination of the use of the CD residue as aggregate in the matrix and as internal reinforcement of the plates, is the one that offered the best performance if we take into account it counts the resistance and thermal behavior values.

Section 3: Reuse of gypsum waste as a total and / or partial substitute for commercial gypsum

Until now the residues had been used as aggregates in the mixtures, however, in this third section, it is proposed to totally or partially replace the commercial plaster that makes up the matrix with another of recycled origin, obtaining the following conclusions:

- Although a higher water content was necessary in the production of the mixtures, a good performance of the pastes was achieved when GPW was used without heating. An even lighter material with better resistant performance was obtained. On the other hand, the infeasibility of using unheated FGD as a component of plasters was demonstrated. However, a good performance, in terms of workability, was obtained when the FGD powder was subjected to a heating process at 180 ° C for 6 hours.
- The life cycle analysis carried out showed that the use of recycled plaster compared to other commercial options can lead to up to almost 60% reduction of certain environmental impacts linked to the material's production process.

Section 4: Development of materials for interior cladding with a matrix of recycled plaster and plastic waste

In this last section, it has been chosen to combine polycarbonate waste with recycled plaster waste for the generation of new plaster compounds, with the development of 100% recycled pastes with improved properties compared to the reference materials. Thus, new lightweight and eco-efficient plasters were developed, completely recycled, with greater resistance to bending (up to 14.8%), compressive strength (up to 26.8%) and thermal conductivity (up to 42, 8% less), relative to the reference material. This means that the new materials developed contribute to significantly reduce the amounts of this waste that end up in landfills, contributing to a circular economy, while achieving a notable improvement in their physical and mechanical properties.

Future lines of research

In view of the results obtained in this Thesis, it is proposed, as future lines of work, the analysis of the properties against fire of the different materials and products developed. Likewise, they are working on the production of pasta with a matrix of recycled plaster and with the incorporation of wood aggregate.

REFERENCIAS

- Ahmed, A., Ugai, K., Kamei, T. (2011). Investigation of recycled gypsum in conjunction with waste plastic trays for ground improvement. *Construction and Building Materials*, 25(1), 208-217.
- Alameda, L., Calderón, V., Junco, C., Rodríguez, A., Gadea, J., Gutiérrez-González, S. (2016). Characterization of gypsum plasterboard with polyurethane foam waste reinforced with polypropylene fibers. *Materiales de Construcción*, 66(324), 100.
- Bederina, M., Laidoudi, B., Goullieux, A., Khenfer, M. M., Bali, A., Quéneudec, M. (2009). Effect of the treatment of wood shavings on the physico-mechanical characteristics of wood sand concretes. *Construction and Building Materials*, 23(3), 1311-1315.
- Begliardo, H., Sanchez, M., Cecilia Panigatti, M., Garrappa, S. (2013). Reuse of recovered construction gypsum plaster: a study based on aptitude requirements of Argentine and Chilean standards. *Revista de la Construcción*, 12(3), 27-35.
- Bravo, M., de Brito, J., Pontes, J., & Evangelista, L. (2015). Mechanical performance of concrete made with aggregates from construction and demolition waste recycling plants. *Journal of Cleaner Production*, 99, 59-74.
- Bulut, H. A., Şahin, R. (2017). A study on mechanical properties of polymer concrete containing electronic plastic waste. *Composite Structures*, 178, 50-62.
- Carro-López, D., González-Fonteboa, B., de Brito, J., Martínez-Abella, F., González-Taboada, I., Silva, P. (2015). Study of the rheology of self-compacting concrete with fine recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, 96, 491-501.
- Cheah, C. B., Ramli, M. (2011). The implementation of wood waste ash as a partial cement replacement material in the production of structural grade concrete and mortar: An overview. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(7), 669-685.
- Coatanlem, P., Jauberthie, R., Rendell, F. (2006). Lightweight wood chipping concrete durability. *Construction and Building Materials*, 20(9), 776-781.
- CONAMA 2010. *Congreso Nacional de Medioambiente*. 22-26 Noviembre 2010. Madrid.
- Corinaldesi, V., Mazzoli, A., Siddique, R. (2016). Characterization of lightweight mortars containing wood processing by-products waste. *Construction and Building Materials*, 123, 281-289.
- Da Silva, A. M., de Brito, J., Veiga, R. (2014). Incorporation of fine plastic aggregates in rendering mortars. *Construction and Building Materials*, 71, 226-236.
- Dai, D., Fan, M. (2015). Preparation of bio-composite from wood sawdust and gypsum. *Industrial Crops and Products*, 74, 417-424.
- Del Río Merino, M., Santa Cruz, J., Hernández Olivares, F. (1999). *Yeso aligerado con corcho y su aplicación en paneles para construcción*. Patente. OTRI P, 9902034.
- Directive 2002/91/EC of the European Parliament and of the Council of 16 December 2002 on the energy performance of buildings.

Directive 2008/98/CE of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste.

Elinwa, A. U., Mahmood, Y. A. (2002). Ash from timber waste as cement replacement material. *Cement and Concrete Composites*, 24(2), 219-222.

Erbs, A., Nagalli, A., de Carvalho, K. Q., Mymrin, V., Passig, F. H., Mazer, W. (2018). Properties of recycled gypsum from gypsum plasterboards and commercial gypsum throughout recycling cycles. *Journal of Cleaner Production*, 183, 1314-1322.

Erbs, A., Nagalli, A., Mymrine, V., Carvalho, K. Q. (2015). Determination of physical and mechanical proper-ties of recycled gypsum from the plasterboard sheets. *Cerâmica*, 61(360), 482-487.

Eriksen, M., Lebreton, L. C., Carson, H. S., Thiel, M., Moore, C. J., Borerro, J. C., Reisser, J. (2014). Plastic pollution in the world's oceans: more than 5 trillion plastic pieces weighing over 250,000 tons afloat at sea. *PloS one*, 9(12), e111913.

Eurogypsum. <http://www.eurogypsum.org/> FGD Gypsum: quality criteria and analysis methods. [Accessed in August 2018].

Fernández Casado, S. (2010). Reciclaje interno de los residuos en las fábricas. Reutilización del yeso recicla-do para la fabricación de placas de yeso laminado. *Congreso Nacional del Medio Ambiente*. Madrid.

Fořt, J., Černý, R. (2018). Carbon footprint analysis of calcined gypsum production in the Czech Republic. *Journal of Cleaner Production*, 177, 795-802.

Gartner, E. M. (2009). Cohesion and expansion in polycrystalline solids formed by hydration reactions—the case of gypsum plasters. *Cement and Concrete Research*, 39(4), 289-295.

Ge, Z., Huang, D., Sun, R., Gao, Z. (2014). Properties of plastic mortar made with recycled polyethylene terephthalate. *Construction and Building Materials*, 73, 682-687.

Gencel, O., del Coz Diaz, J. J., Sutcu, M., Koksall, F., Álvarez Rabanal, F. P., Martínez-Barrera, G. (2016). A novel lightweight gypsum composite with diatomite and polypropylene fibers. *Construction and Building Materials*, 113, 732-740.

Geraldo, R. H., Pinheiro, S. M., Silva, J. S., Andrade, H. M., Dweck, J., Gonçalves, J. P., Camarini, G. (2017). Gypsum plaster waste recycling: A potential environmental and industrial solution. *Journal of Cleaner Production*, 164, 288-300.

Ghernouti, Y., Rabehi, B. (2012). Strength and durability of mortar made with plastics bag waste (MPBW). *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 6(3), 145-153.

Gomes M., de Brito J (2009). Structural concrete with incorporation of coarse recycled concrete and ceramic aggregates: durability performance. *Material and Structures*, 42 (5), 663–675.

González Madariaga, F. J. (2008). Mezclas de residuos de poliestireno expandido (EPS) conglomerados con yeso o escayola para su uso en la construcción. *Informes de la Construcción*, 60(509), 35-43.

Gu, L., Ozbakkaloglu, T. (2016). Use of recycled plastics in concrete: A critical review. *Waste Manage*, 51, 19-42.

- Gutiérrez-González, S., Gadea, J., Rodríguez, A., Junco, C., Calderón, V. (2012). Lightweight plaster materials with enhanced thermal properties made with polyurethane foam wastes. *Construction and Building Materials*, 28(1), 653-658.
- Hannawi, K., Kamali-Bernard, S., Prince, W. (2010). Physical and mechanical properties of mortars containing PET and PC waste aggregates. *Waste Management*, 30(11), 2312-2320.
- Ismail, Z. Z., Al-Hashmi, E. A. (2008). Use of waste plastic in concrete mixture as aggregate replacement. *Waste Manage.*, 28(11), 2041-2047.
- Jambeck, J. R., Geyer, R., Wilcox, C., Siegler, T. R., Perryman, M., Andrady, A., Law, K. L. (2015). Plastic waste inputs from land into the ocean. *Science*, 347(6223), 768-771.
- Jassim, A. K. (2017). Recycling of Polyethylene Waste to Produce Plastic Cement. *Procedia Manufacturing*, 8, 635-642.
- Jiménez-Rivero, A., García-Navarro, J. (2016). Indicators to measure the management performance of end-of-life gypsum: from deconstruction to production of recycled gypsum. *Waste and Biomass Valorization*, 7(4), 913-927.
- Jiménez-Rivero, A., García-Navarro, J. (2017). Best practices for the management of end-of-life gypsum in a circular economy. *Journal of Cleaner Production*, 167, 1335-1344.
- Jiménez-Rivero, A., García-Navarro, J. (2017). Characterization of quality recycled gypsum and plasterboard with maximized recycled content. *Materiales de Construcción*, 67(328), 137.
- Jiménez-Rivero, A., García-Navarro, J. (2017). Exploring factors influencing post-consumer gypsum recycling and landfilling in the European Union. *Resources, Conservation and Recycling*, 116, 116-123.
- Jiménez-Rivero, A., Sathre, R., García-Navarro, J. (2016). Life cycle energy and material flow implications of gypsum plasterboard recycling in the European Union. *Resources, Conservation and Recycling*, 108, 171-181.
- Jorge, F. C., Pereira, C., Ferreira, J. M. F. (2004). Wood-cement composites: a review. *Holz als Roh-und Werkstoff*, 62(5), 370-377.
- Karaman, S., Sahin, S., Gunal, H., Orung, I. (2006). Stabilization of waste pet bottles with Gypsum. *Journal of Applied Sciences*, 6, 1119-1122.
- Kou, S. C., Lee, G., Poon, C. S., Lai, W. L. (2009). Properties of lightweight aggregate concrete prepared with PVC granules derived from scraped PVC pipes. *Waste Management*, 29(2), 621-628.
- Ledesma, E. F., Jiménez, J. R., Ayuso, J., Fernández, J. M., & de Brito, J. (2015). Maximum feasible use of recycled sand from construction and demolition waste for eco-mortar production—Part-I: ceramic masonry waste. *Journal of Cleaner Production*, 87, 692-706.
- Lee, J. C., Bradshaw, S. L., Edil, T. B., Benson, C. H. (2012). Quantifying the benefits of flue gas desulfurization gypsum in sustainable wallboard production. *Coal Combustion and Gasification Products*, 4, 17-20.
- Lei, D. Y., Guo, L. P., Sun, W., Liu, J. P., Miao, C. W. (2017). Study on properties of untreated FGD gypsum-based high-strength building materials. *Construction and Building Materials*, 153, 765-773.

- Leiva, C., Arenas, C. G., Vilches, L. F., Vale, J., Gimenez, A., Ballesteros, J. C., Fernández-Pereira, C. (2010). Use of FGD gypsum in fire resistant panels. *Waste Management*, 30(6), 1123-1129.
- Lima, P. R. L., Leite, M. B., Santiago, E. Q. R. (2010). Recycled lightweight concrete made from footwear industry waste and CDW. *Waste Management*, 30(6), 1107-1113.
- Lushnikova, N., Dvorkin, L. (2016). Sustainability of gypsum products as a construction material. *Sustainability of Construction Materials* (pp. 643-681).
- Meawad, A. S., Bojinova, D. Y., Pelovski, Y. G. (2010). An overview of metals recovery from thermal power plant solid wastes. *Waste Management*, 30(12), 2548-2559.
- Mohammed, B.S.; Abdullahi, M.; Hoong, C.K. (2014), Statistical models for concrete containing wood chipping as partial replacement to fine aggregate. *Construction and Building Materials*., 55, 13–19.
- Montoya, P. J., Meseguer, Á. G., Cabré, F. M., Portero, J. C. A. (2009). *Hormigón armado*. Gustavo Gili.
- Mounanga, P., Gbongbon, W., Poullain, P., Turcry, P. (2008). Proportioning and characterization of lightweight concrete mixtures made with rigid polyurethane foam wastes. *Cement and Concrete Composites*, 30(9), 806-814.
- Nacéri A., Hamina M. (2009). Use of waste brick as partial replacement of cement in mortar. *Waste Management*, vol. 29, 2378–2384.
- Pacheco-Torgal, F. (2014). Eco-efficient construction and building materials research under the EU Frame-work Programme Horizon 2020. *Construction and Building Materials*, 51, 151-162.
- Papailiopoulos, N., Grigoropoulos, H., Founti, M. (2017). Energy analysis of the effects of high-level reincorporation of post-consumer recycled gypsum in plasterboard manufacturing. *Waste and Biomass Valorization*, 8(5), 1829-1839.
- Pedro, D., De Brito, J., & Evangelista, L. (2014). Influence of the use of recycled concrete aggregates from different sources on structural concrete. *Construction and Building Materials*, 71, 141-151.
- Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos (PEMAR) 2016/2022*. 2016, Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.
- Plan Nacional Integral de Residuos (PNIR) 2008/2015*. 2008, Ministerio de Agricultura y Medio Ambiente.
- Plastics Europe (2019). *Plastics the Facts 2019. An analysis of European plastics production, demand and waste data*.
- Poon, C. S., Chan, D. (2006). Paving blocks made with recycled concrete aggregate and crushed clay brick. *Construction and Building Materials*, 20(8), 569-577.
- Poon, C. S., Kou, S. C., Wan, H. W., & Etxeberria, M. (2009). Properties of concrete blocks prepared with low grade recycled aggregates. *Waste Management*, 29(8), 2369-2377.
- Puertas F., García-Díaz I., Barba A., Gazulla M., Palacios M., Gómez M., et al (2008). Ceramic wastes as alternative raw materials for Portland cement clinker production. *Cement and Concrete Composites*, 29, 798–805.

- Real Decreto 105/2008, de 1 de febrero, por el que se regula la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición.
- Ricciardi, P., Belloni, E., Cotana, F. (2014). Innovative panels with recycled materials: Thermal and acoustic performance and Life Cycle Assessment. *Applied Energy*, 134, 150-162.
- Saikia, N., de Brito, J. (2012). Use of plastic waste as aggregate in cement mortar and concrete preparation: A review. *Construction and Building Materials*, 34, 385-401.
- Saikia, N., de Brito, J. (2014). Mechanical properties and abrasion behaviour of concrete containing shredded PET bottle waste as a partial substitution of natural aggregate. *Construction and Building Materials*, 52, 236-244.
- San-Antonio-González, A., Del Río-Merino, M., Viñas-Arrebola, C., Villoria-Sáez, P. (2015). Lightweight material made with gypsum and extruded polystyrene waste with enhanced thermal behaviour. *Construction and Building Materials*, 93, 57-63.
- Sánchez de Rojas, F., Marín J., Rivera M., Frías M (2006). Morphology and properties in blended cements with ceramic wastes as a pozzolanic material. *Journal American Ceramic Society*, 89, 3701–3705.
- Sharma, R., Bansal, P. P. (2016). Use of different forms of waste plastic in concrete—a review. *Journal of Cleaner Production*, 112, 473-482.
- Siddique, R. (2012). Utilization of wood ash in concrete manufacturing. *Resources, Conservation and Recycling*, 67, 27-33.
- Siddique, R., Khatib, J., Kaur, I. (2008). Use of recycled plastic in concrete: a review. *Waste Management*, 28(10), 1835-1852.
- Silva J., de Brito J., Veiga R (2010). Recycled red-clay ceramic construction and demolition waste for mortars production. *Journal of Materials of Civil Engineering*, 22 (3), 236–244.
- Silva J., de Brito J., Veiga R. (2008). Fine ceramics replacing cement in mortars. Partial replacement with fine ceramics in rendering mortar. *Materials and Structures*, 41 (8), 1333–1344.
- Silva J., de Brito J., Veiga R. (2009). Incorporation of fine ceramics in mortars. *Construction and Building Materials*, 23, 556–564.
- Silva, R. V., De Brito, J., Dhir, R. K. (2014). Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production. *Construction and Building Materials*, 65, 201-217.
- Soutsos, M. N., Tang, K., & Millard, S. G. (2011). Concrete building blocks made with recycled demolition aggregate. *Construction and Building Materials*, 25(2), 726-735.
- Suárez, S., Roca, X., Gasso, S. (2016). Product-specific life cycle assessment of recycled gypsum as a replacement for natural gypsum in ordinary Portland cement: application to the Spanish context. *Journal of Cleaner Production*, 117, 150-159.
- Tesarek, P., Drchalova, J., Kolísko, J., Rovnaníková, P., Černý, R. (2007). Flue gas desulfurization gypsum: study of basic mechanical, hydric and thermal properties. *Construction and Building Materials*, 21(7), 1500-1509.
- Turgut, P., Algin, H. M. (2007). Limestone dust and wood sawdust as brick material. *Building and Environment*, 42(9), 3399-3403.

Wang, L., Chen, S. S., Tsang, D. C., Poon, C. S., Shih, K. (2016). Recycling contaminated wood into eco-friendly particleboard using green cement and carbon dioxide curing. *Journal of Cleaner Production*, 137, 861-870.

Watts, D. B., Dick, W. A. (2014). Sustainable uses of FGD gypsum in agricultural systems: Introduction. *Journal of Environmental Quality*, 43(1), 246-252.

Wirsching, F., Hüller, R., Olejnik, R. (1994). FGD gypsum definitions and legislation in the European Communities, in the OECD and in Germany. *Studies in Environmental Science*, 60, 205-216.

Zhang, Y. C., Dai, S. B., Huang, J., Duan, S. G., Zhi, Z. Z. (2016). Preparation of thermal insulation plaster with FGD. *Kemija u industriji: Časopis kemičara i kemijskih inženjera Hrvatske*, 65(5-6), 283-288.

LISTADO DE FIGURAS Y TABLAS

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama resumen de la Tesis Doctoral. Fuente: Elaboración propia.

Figura 2. Residuos de madera (serrín y virutas) empleados en la investigación. Fuente: Elaboración propia.

Figura 3. Granulometría de ambos tipos de residuo de madera. Fuente: Elaboración propia.

Figura 4. Resultados obtenidos para la densidad de los compuestos yeso-madera. Fuente: Elaboración propia.

Figura 5. Resultados obtenidos para la resistencia a flexión de los compuestos yeso-madera. Fuente: Elaboración propia.

Figura 6. Resultados obtenidos para la resistencia a compresión de los compuestos yeso-madera. Fuente: Elaboración propia.

Figura 7. Imágenes obtenidas de la microscopía electrónica de barrido realizada a compuestos con un 20% de residuo de madera. **A)** S20. **B)** WS20. Fuente: Elaboración propia.

Figura 8. Comparación entre los resultados de resistencia a tracción de laboratorio obtenidos para los compuestos yeso-madera y la tensión máxima a la que se vería sometida la placa según la simulación en software de elementos finitos. Fuente: Elaboración propia.

Figura 9. Ensayo de rotura de las placas yeso-madera en laboratorio según norma UNE-EN 14246. Fuente: Elaboración propia.

Figura 10. Comportamiento térmico de las placas yeso-madera. Comparación con UNE-EN 14246 y valores de referencia de productos comercializados. Fuente: Elaboración propia.

Figura 11. Comparación de los coeficientes de absorción sonora de las placas yeso-madera. Fuente: Elaboración propia.

Figura 12. Pequeñas manchas de moho en probetas yeso-virutas después de 15 ciclos de humectación-secado. **A)** WS10; **B)** WS20. Fuente: Elaboración propia.

Figura 13. Densidad de los compuestos yeso-madera después de 0, 5, 10, y 15 ciclos de humectación-secado. Fuente: Elaboración propia.

Figura 14. Resistencia a flexión de los compuestos yeso-madera después de 0, 5, 10, y 15 ciclos de humectación-secado. Fuente: Elaboración propia.

Figura 15. Resistencia a compresión de los compuestos yeso-madera después de 0, 5, 10, y 15 ciclos de humectación-secado. Fuente: Elaboración propia.

Figura 16. Desechos de CDs y DVDs, triturados y listos para ser usados como agregados en las mezclas. **A)** Partículas de hasta 10 mm (BPS). **B)** Partículas de hasta 4 mm (SPS). Fuente: Elaboración propia.

Figura 17. Granulometría de los CDs y DVDs triturados empleados en este trabajo. Fuente: Elaboración propia.

Figura 18. Resultados obtenidos para la densidad aparente en estado seco de los compuestos yeso-policarbonato. Fuente: Elaboración propia.

Figura 19. Resultados obtenidos para la resistencia a flexión de los compuestos yeso-policarbonato. Fuente: Elaboración propia.

Figura 20. Resultados obtenidos para la resistencia a compresión de los compuestos yeso-policarbonato. Fuente: Elaboración propia.

Figura 21. Imágenes obtenidas de la microscopía electrónica de barrido realizada a compuestos con un 50% de residuo de policarbonato. **A)** BPS 50. **B)** SPS 50. Fuente: Elaboración propia.

Figura 22. Imágenes obtenidas de la tomografía computarizada de rayos-x realizada a compuestos con un 50% de residuo de policarbonato. **A)** BPS 50. **B)** SPS 50. Fuente: Elaboración propia.

Figura 23. Combinaciones de refuerzo interno de las placas con CDs analizadas en el Escenario 2. Fuente: Elaboración propia.

Figura 24. Carga de rotura obtenida para cada uno de los escenarios (placas) desarrollados. Fuente: Elaboración propia.

Figura 25. Conductividad térmica obtenida para cada uno de los escenarios (placas) desarrollados. Fuente: Elaboración propia.

Figura 26. Difractogramas obtenidos para el yeso FGD tras los distintos procesos de calentamiento. Fuente: Elaboración propia.

Figura 27. Difractogramas obtenidos para el yeso GPW tras los distintos procesos de calentamiento. Fuente: Elaboración propia.

Figura 28. Relación agua/yeso requerida para las diferentes mezclas realizadas con yeso FGD. Fuente: Elaboración propia.

Figura 29. Relación agua/yeso requerida para las diferentes mezclas realizadas con yeso GPW. Fuente: Elaboración propia.

Figura 30. Densidad aparente en estado seco para las diferentes mezclas realizadas con yeso GPW. Fuente: Elaboración propia.

Figura 31. Resistencia a flexión para las diferentes mezclas realizadas con yeso GPW. Fuente: Elaboración propia.

Figura 32. Resistencia a compresión para las diferentes mezclas realizadas con yeso GPW. Fuente: Elaboración propia.

Figura 33. Imágenes SEM de yesos GPW (2400x). **A)** GPW100 WH. **B)** GPW100 150-6. Fuente: Elaboración propia.

Figura 34. Límites del sistema para la producción de cada uno de los tipos de yeso estudiados. Fuente: Elaboración propia.

Figura 35. Resultados para los indicadores MidPoint. Comparación entre los diferentes tipos de yeso estudiados. Fuente: Elaboración propia.

Figura 36. Resultados para los indicadores EndPoint. Comparación entre los diferentes tipos de yeso estudiados. Fuente: Elaboración propia.

Figura 37. Materiales empleados para el desarrollo de los nuevos compuestos de yeso reciclado con agregado plástico. **A)** CG, **B)** GPW. **C)** PC. Fuente: Elaboración propia.

Figura 38. Densidad aparente en estado seco para las diferentes mezclas realizadas con yeso GPW y agregado de PC. Fuente: Elaboración propia.

Figura 39. Resistencia a flexión para las diferentes mezclas realizadas con yeso GPW y agregado de PC. Fuente: Elaboración propia.

Figura 40. Resistencia a compresión para las diferentes mezclas realizadas con yeso GPW y agregado de PC. Fuente: Elaboración propia.

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Resultados del test de resistencia a flexión de las placas yeso-madera.

Tabla 2. Descripción de los diferentes procesos de calentamiento realizados.

BLOQUE B

I. Publicaciones en revistas indexadas

SECCIÓN 1

Artículo 1: Physical and mechanical properties of wood-gypsum composites from demolition material in rehabilitation works.

Artículo 2: Eco-efficient acoustic and thermal conditioning using false ceiling plates made from plaster and wood waste.

Artículo 3: Impact of wetting-drying cycles on the mechanical properties and microstructure of wood waste-gypsum composites.

SECCIÓN 2

Artículo 4: Influence of polycarbonate waste on gypsum composites: Mechanical and environmental study.

Artículo 5: Reuse of CD and DVD wastes as reinforcement in gypsum plaster plates.

SECCIÓN 3

Artículo 6: Influence of the heating process on the use of gypsum wastes in plasters: Mechanical, thermal and environmental analysis.

Artículo 7: Influence of gypsum wastes on the workability of plasters: Heating process and microstructural analysis.

Artículo 8: Life cycle assessment of natural and recycled gypsum production in the Spanish context.

SECCIÓN 4

Artículo 9: Use of polycarbonate waste as aggregate in recycled gypsum plasters.

II. Comunicaciones publicadas en actas de congresos

Comunicación 1: Complementary techniques for the characterization of new construction materials: analysis and review.

Comunicación 2: Influencia de la incorporación de residuos de madera en el comportamiento térmico de compuestos de mortero y yeso. Aplicaciones en la rehabilitación de edificios.

Comunicación 3: Influence of wood and plastic waste as aggregates in gypsum plasters.

Comunicación 4: Eco-efficient false ceiling plates made from plaster with wood and plastic residues.

I. PUBLICACIONES EN REVISTAS INDEXADAS

SECCIÓN 1

ARTÍCULO 1

Physical and mechanical properties of wood-gypsum composites from demolition material in rehabilitation works.

Morales-Conde, M.J.; Rodríguez-Liñán, C.; **Pedreño-Rojas, M.A.** (2016)

Construction and Building Materials, 114, pp. 6-14.

<https://doi.org/10.16/j.conbuildmat.2016.03.137>

SECCIÓN 1

ARTÍCULO 2

Eco-efficient acoustic and thermal conditioning using false ceiling plates made from plaster and wood waste.

Pedreño-Rojas, M.A.; Morales-Conde, M.J.; Pérez-Gálvez, F.; Rodríguez-Liñán, C. (2017)

Journal of Cleaner Production, 166, pp. 690-705.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.077>

SECCIÓN 1

ARTÍCULO 3

Impact of Wetting-Drying Cycles on the Mechanical Properties and Microstructure of Wood Waste-Gypsum Composites.

Pedreño-Rojas, M.A.; Morales-Conde, M.J.; Rubio-de-Hita, P.; Pérez-Gálvez, F. (2019)

Materials, 12(11), Núm. 1829.

<https://doi.org/10.3390/ma12111829>

SECCIÓN 2

ARTÍCULO 4

Influence of polycarbonate waste on gypsum composites: Mechanical and environmental study.

Pedreño-Rojas, M.A.; Morales-Conde, M.J.; Pérez-Gálvez, F.; Rubio-de-Hita, P. (2019)

Journal of Cleaner Production, 218, pp. 21-37.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.200>

SECCIÓN 2

ARTÍCULO 5

Reuse of CD and DVD Wastes as Reinforcement in Gypsum Plaster Plates.

Pedreño-Rojas, M.A.; Morales-Conde, M.J.; Pérez-Gálvez, F.; Rubio-de-Hita, P. (2020)

Materials, 13(4), Núm. 989.

<https://doi.org/10.3390/ma13040989>

SECCIÓN 3

ARTÍCULO 6

Influence of the heating process on the use of gypsum wastes in plasters: Mechanical, thermal and environmental analysis.

Pedreño-Rojas, M.A.; Flores-Colen, I.; De Brito, J.; Rodríguez-Liñán, C. (2019)

Journal of Cleaner Production, 215, pp. 444-457.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.053>

SECCIÓN 3

ARTÍCULO 7

Influence of gypsum wastes on the workability of plasters: Heating process and microstructural analysis.

Pedreño-Rojas, M.A.; De Brito, J.; Flores-Colen, I.; Pereira, M.F.; Rubio-de-Hita, P. (2020)

Journal of Building Engineering, 29, Núm. 101143.

<https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.101143>

SECCIÓN 3

ARTÍCULO 8

Life cycle assessment of natural and recycled gypsum production in the Spanish context.

Pedreño-Rojas, M.A.; Fořt, J.; Černý, R.; Rubio-de-Hita, P. (2020)

Journal of Cleaner Production, 253, Núm. 120056.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120056>

SECCIÓN 4

ARTÍCULO 9

Use of Polycarbonate Waste as Aggregate in Recycled Gypsum Plasters.

Pedreño-Rojas, M.A.; Rodríguez-Liñán, C.; Flores-Colen, I.; De Brito, J. (2020)

Materials, 13(14), Núm. 3042.

<https://doi.org/10.3390/ma13143042>

II. COMUNICACIONES EN ACTAS DE CONGRESOS

COMUNICACIÓN 1

Complementary techniques for the characterization of new construction materials: analysis and review.

Pedreño-Rojas, M.A.; Morales-Conde, M.J.; Rodríguez-Liñán, C.; Pérez-Gálvez, F.; Rubio-de-Hita, P.

En: *IDA: Advanced Doctoral Research in Architecture*, pp. 153-160. E.T.S. Arquitectura. Universidad de Sevilla. Sevilla. 2017. ISBN: 978-84-16784-99-8.

COMUNICACIÓN 2

Influencia de la Incorporación de Residuos de Madera en el Comportamiento Térmico de Compuestos de Mortero y Yeso. Aplicaciones en la Rehabilitación de Edificios.

Pedreño-Rojas, M.A.; Morales-Conde, M.J.; Pérez-Gálvez, F.; Rodríguez-Liñán, C.; Rubio-de-Hita, P.

En: *Congreso Euro-Americano REHABEND 2018*. Universidad de Cantabria y Universidad de Extremadura. Cáceres. 2018. ISBN: 2386-8198.

COMUNICACIÓN 3

Influence of wood and plastic waste as aggregates in gypsum plasters.

Pedreño-Rojas, M.A.; Rodríguez-Liñán, C.; Morales-Conde, M.J.; Pérez-Gálvez, F.; Rubio-de-Hita, P.; Romero-Gómez, M.I. (2019)

IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 603, Núm. 3.

<https://doi.org/10.1088/1757-899X/603/3/032032>

COMUNICACIÓN 4

Eco-efficient false ceiling plates made from plaster with wood and plastic residues.

Pedreño-Rojas, M.A.; Morales-Conde, M.J.; Pérez-Gálvez, F.; Romero-Gómez, M.I.; Rubio-de-Hita, P.

IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 960, Núm. 3, 032055.

<https://doi.org/10.1088/1757-899X/960/3/032055>

ANEXOS

A. Bibliografía

B. Relevancia científica de las revistas indexadas

A. BIBLIOGRAFÍA

- Ahmed, A., Ugai, K., Kamei, T. (2011). Investigation of recycled gypsum in conjunction with waste plastic trays for ground improvement. *Construction and Building Materials*, 25(1), 208-217.
- Alameda, L., Calderón, V., Junco, C., Rodríguez, A., Gadea, J., Gutiérrez-González, S. (2016). Characterization of gypsum plasterboard with polyurethane foam waste reinforced with polypropylene fibers. *Materiales de Construcción*, 66(324), 100.
- Aldood, A.; Bouasker, M.; Al-Mukhtar, M. (2014) Impact of wetting–drying cycles on the microstructure and mechanical properties of lime-stabilized gypseous soils. *Engineering Geology*, 174, 11–21.
- Álvarez, S., Salmerón, J. M. (2008). Catálogo de Elementos Constructivos de CTE. Puentes térmicos, IETCC.
- Americal Coal Ash Association. <https://www.aaaa-usa.org/> [Accessed in August 2018].
- ASTM D5930-09. (2009). Thermal conductivity of plastics by means of a transient line-source technique. *American Society for Testing Materials*, Philadelphia.
- ASTM E 1876. (2009). Standard test method for dynamic Young's modulus, shear modulus, and Poisson's ratio by impulse excitation of vibration. *American Society for Testing Materials*, Philadelphia.
- Bardella, P. S., Camarini, G. (2012). Recycled plaster: physical and mechanical properties. *Advanced Materials Research*, 374, 1307-1310.
- Başpınar, M. S., Kahraman, E. (2011). Modifications in the properties of gypsum construction element via addition of expanded macroporous silica granules. *Construction and Building Materials*, 25(8), 3327-3333.
- Bederina, M., Laidoudi, B., Goullieux, A., Khenfer, M. M., Bali, A., Quéneudec, M. (2009). Effect of the treatment of wood shavings on the physico-mechanical characteristics of wood sand concretes. *Construction and Building Materials*, 23(3), 1311-1315.
- Begliardo, H., Sanchez, M., Cecilia Panigatti, M., Garrappa, S. (2013). Reuse of recovered construction gypsum plaster: a study based on aptitude requirements of argentine and Chilean standards. *Revista de la Construcción*, 12(3), 27-35.
- Behloul, M., Chanvillard, G., Pimienta, P., Pineaud, A., Rivillon, P. (2005). Fatigue Flexural Behavior of Pre-cracked Specimens of Special UHPFRC, in: *Seventh International Symposium on the Utilization of High Strength/High-Performance Concrete*. pp. 1253–1268.
- Belayachi, N.; Hoxha, D.; Slaimia, M. (2016) Impact of accelerated climatic aging on the behavior of gypsum plaster-straw material for building thermal insulation. *Construction and Building Materials*, 125, 912–918.
- Bigerna, S., Bollino, C. A., Micheli, S., Polinori, P. (2017). Revealed and stated preferences for CO2 emissions reduction: the missing link. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68, 1213-1221.
- Bowyer, J. (1995). Wood and other raw materials for the 21st century. *Forest Products Journal*, 45(2), 17.

- Bravo, M., de Brito, J., Pontes, J., Evangelista, L. (2015). Mechanical performance of concrete made with aggregates from construction and demolition waste recycling plants. *Journal of Cleaner Production*, 99, 59-74.
- Camarini, G., dos Santos Lima, K. D., Pinheiro, S. M. (2016). Investigation on gypsum plaster waste recycling: an eco-friendly material. *Green Materials*, 3(4), 104-112.
- Camarini, G., Pinheiro, S. M., Tannous, K. (2013). Thermal analysis of recycled gypsum from construction and demolition waste. *Applied Mechanics and Materials*, 260, 977-980.
- Camarini, G., Pinto, M. C. C., de Moura, A. G., Manzo, N. R. (2016). Effect of citric acid on properties of recycled gypsum plaster to building components. *Construction and Building Materials*, 124, 383-390.
- Campagna, D., Kathman, S. J., Pierson, R., Inserra, S. G., Phifer, B. L., Middleton, D. C., White, M. C. (2004). Ambient hydrogen sulfide, total reduced sulfur, and hospital visits for respiratory diseases in northeast Nebraska, 1998–2000. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, 14(2), 180.
- Carrión, A. (1998). *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*. Edicions UPC.
- Carro-López, D., González-Fonteboa, B., de Brito, J., Martínez-Abella, F., González-Taboada, I., Silva, P. (2015). Study of the rheology of self-compacting concrete with fine recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, 96, 491-501.
- Çavdar, A. (2014) Investigation of freeze–thaw effects on mechanical properties of fiber reinforced cement mortars. *Composites. Part B-Eng.* 58, 463–472.
- Cheah, C. B., Ramli, M. (2011). The implementation of wood waste ash as a partial cement replacement material in the production of structural grade concrete and mortar: An overview. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(7), 669-685.
- Chen, C., Habert, G., Bouzidi, Y., Jullien, A. (2010). Environmental impact of cement production: detail of the different processes and cement plant variability evaluation. *Journal of Cleaner Production*, 18(5), 478-485.
- Chen, W., Jin, R., Xu, Y., Wanatowski, D., Li, B., Yan, L., Yang, Y. (2019). Adopting recycled aggregates as sustainable construction materials: a review of the scientific literature. *Construction and Building Materials*, 218, 483-496.
- Cherki, A. B., Remy, B., Khabbazi, A., Jannot, Y., Baillis, D. (2014). Experimental thermal properties characterization of insulating cork–gypsum composite. *Construction and Building Materials*, 54, 202-209.
- Cholake, S. T., Pahlevani, F., Gaikwad, V., Millicer, H., Sahajwalla, V. (2018). Cost-effective and sustainable approach to transform end-of-life vinyl banner to value added product. *Resources Conservation and Recycling*, 136, 9-21.
- Cicloplast: Reciclaje de los plásticos. www.cicloplast.com [Accessed 2017].
- Coatanlem, P., Jauberthie, R., Rendell, F. (2006). Lightweight wood chipping concrete durability. *Construction and Building Materials*, 20(9), 776-781.
- CONAMA 2010. *Congreso Nacional de Medioambiente* (2010). Madrid.

Corinaldesi, V., Mazzoli, A., Siddique, R. (2016). Characterization of lightweight mortars containing wood processing by-products waste. *Construction and Building Materials*, 123, 281-289.

Council Directive 94/62/CE, (1994). Council Directive 94/62/CE of 20 December 1994, *Official Journal L 365*, 31/12/1994.

Da Silva, A. M., de Brito, J., Veiga, R. (2014). Incorporation of fine plastic aggregates in rendering mortars. *Construction and Building Materials*, 71, 226-236.

Dai, D., Fan, M. (2015). Preparation of bio-composite from wood sawdust and gypsum. *Industrial Crops and Products*, 74, 417-424.

De Almeida Melo Filho, J.; de Andrade Silva, F.; Toledo Filho, R.D. (2013). Degradation kinetics and aging mechanisms on sisal fiber cement composite systems. *Cement and Concrete Composites*, 40, 30–39.

De Brito, J., Flores-Colen, I. (2015). Gypsum plasters. *Materials for Construction and Civil Engineering* (pp. 123-184). Springer, Cham.

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* (Doctoral dissertation, Architecture).

Del Río Merino, M. R., Astorqui, J. S. C., Olivares, F. H. (2005). New prefabricated elements of lightened plaster used for partitions and extrados. *Construction and Building Materials*, 19(6), 487-492.

Del Río Merino, M., Comino, P. (2001). Dispersebility degree influence of glass fibre E in the mechanical behaviour and workability of plaster. *Materiales de construcción*, (261), 33-44.

Del Río Merino, M., Domínguez, J. D., Hernández Olivares, F. (1998). Escayola aligerada con sólidos celulares. *Informes de la construcción*, 50(458), 43-60.

Del Río Merino, M., Hernández Olivares, F., Comino Almenara, P. (2004). Estado del arte sobre el comportamiento físico-mecánico de la escayola reforzada con fibras de vidrio E. *Informes de la Construcción*, 56(493), 33-37.

Del Río Merino, M., Pérez García, C., Romaniega Piñeiro, S. (2013). Refuerzo de las escayolas mediante fibras de lana mineral procedentes del reciclaje de RCD. *Actas del I Congreso Internacional de Construcción Sostenible y Soluciones Ecoeficientes: Sevilla 20 - 22 May 2013* (pp. 136-145).

Del Río Merino, M., Santa Cruz Astorqui, J., Villoria Sáez, P., Santos Jiménez, R., González Cortina, M. (2018). Eco plaster mortars with addition of waste for high hardness coatings. *Construction and Building Materials*, 158, 649-656.

Del Río Merino, M., Santa Cruz, J., Hernández Olivares, F. (1999). Yeso aligerado con corcho y su aplicación en paneles para construcción. *Patent. OTRI P*, 9902034.

Di Maria, A., Eyckmans, J., Van Acker, K., (2018). Downcycling versus recycling of construction and demolition waste: Combining LCA and LCC to support sustainable policy making. *Waste Management*, 75, 3-21.

Directive 2002/91/EC of the European Parliament and of the Council of 16 December 2002 on the energy performance of buildings.

Directive 2008/98/CE of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste.

Dolter, B., Rivers, N. (2018). The cost of decarbonizing the Canadian electricity system. *Energy Policy*, 113, 135-148.

Dominković, D. F., Bačeković, I., Čosić, B., Krajačić, G., Pukšec, T., Duić, N., Markovska, N. (2016). Zero carbon energy system of South East Europe in 2050. *Applied Energy*, 184, 1517-1528.

Ecoinvent Association Ecoinvent Database v3. Available online: <http://www.ecoinvent.org/database/database.html> [Accessed 2018].

Elinwa, A. U., Mahmood, Y. A. (2002). Ash from timber waste as cement replacement material. *Cement and Concrete Composites*, 24(2), 219-222.

Erbs, A., Nagalli, A., de Carvalho, K. Q., Mymrin, V., Passig, F. H., Mazer, W. (2018). Properties of recycled gypsum from gypsum plasterboards and commercial gypsum throughout recycling cycles. *Journal of Cleaner Production*, 183, 1314-1322.

Erbs, A., Nagalli, A., Mymrine, V., Carvalho, K. Q. (2015). Determination of physical and mechanical properties of recycled gypsum from the plasterboard sheets. *Cerâmica*, 61(360), 482-487.

Escavy, J. I., Herrero, M. J., Arribas, M. E. (2012). Gypsum resources of Spain: Temporal and spatial distribution. *Ore Geology Reviews*, 49, 72-84.

Eurogypsum. <http://www.eurogypsum.org/> FGD Gypsum: quality criteria and analysis methods. [Accessed in August 2018].

Eurostat (2017), <http://ec.europa.eu/eurostat> . [Accessed in November 2018].

F. Mahdi, H. Abbas, A.A. Khan (2010). Strength characteristics of polymer mortar and concrete using different compositions of resins derived from post-consumer PET bottles. *Construction and Building Materials*, 24 25–36.

Farinha, C., de Brito, J., Veiga, R. (2015). Incorporation of fine sanitary ware aggregates in coating mortars. *Construction and Building Materials*, 83, 194-206.

FERCD (2017). Informe de Producción y Gestión de los Residuos de Construcción y Demolición (RCD) en España, 2015.

Fernández Casado, S. (2010). Reciclaje interno de los residuos en las fábricas. Reutilización del yeso reciclado para la fabricación de placas de yeso laminado. *Congreso Nacional del Medio Ambiente*. Madrid.

Figueiredo, R., Nunes, P., Meireles, M., Madaleno, M., Brito, M. C. (2019). Replacing coal-fired power plants by photovoltaics in the Portuguese electricity system. *Journal of Cleaner Production*, 222, 129-142.

Fořt, J., Černý, R. (2018). Carbon footprint analysis of calcined gypsum production in the Czech Republic. *Journal of Cleaner Production*, 177, 795-802.

Galán, B., Viguri, J. R., Cifrian, E., Dosal, E., Andres, A. (2019). Influence of input streams on the construction and demolition waste (CDW) recycling performance of basic and advanced treatment plants. *Journal of Cleaner Production*, 236, 117523.

- García Santos, A. (2009). PPF-reinforced, ESP-lightened gypsum plaster. *Materiales de construcción*, 59(293), 105-124.
- García-Martínez, A. (2010). *Análisis del ciclo de vida (ACV) de edificios. Propuesta metodológica para la elaboración de Declaraciones Ambientales de Viviendas en Andalucía*. [Ph.D. Tesis], E.T.S. Arquitectura, Universidad de Sevilla, Sevilla, Spain.
- Gartner, E. M. (2009). Cohesion and expansion in polycrystalline solids formed by hydration reactions—the case of gypsum plasters. *Cement and Concrete Research*, 39(4), 289-295.
- Ge, Z., Huang, D., Sun, R., Gao, Z. (2014). Properties of plastic mortar made with recycled polyethylene terephthalate. *Construction and Building Materials*, 73, 682-687.
- Gencil, O., del Coz Diaz, J. J., Sutcu, M., Koksall, F., Álvarez Rabanal, F. P., Martínez-Barrera, G. (2016). A novel lightweight gypsum composite with diatomite and polypropylene fibers. *Construction and Building Materials*, 113, 732-740.
- Geraldo, R. H., Pinheiro, S. M., Silva, J. S., Andrade, H. M., Dweck, J., Gonçalves, J. P., Camarini, G. (2017). Gypsum plaster waste recycling: A potential environmental and industrial solution. *Journal of Cleaner Production*, 164, 288-300.
- Ghaffar, S. H., Burman, M., Braimah, N. (2020). Pathways to circular construction: An integrated management of construction and demolition waste for resource recovery. *Journal of Cleaner Production*, 244, 118710.
- Ghernouti, Y., Rabehi, B. (2012). Strength and durability of mortar made with plastics bag waste (MPBW). *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 6(3), 145-153.
- Giovanella, J., Janczkowski, R., Soares, G. C., Serafim, et al. (2008). Reciclagem de materiais: estudo das propriedades mecânicas de policarbonato reciclado de discos compactos. *Revista Matéria*, 13(4), 643-649.
- González Madariaga, F. J. (2008). Mezclas de residuos de poliestireno expandido (EPS) conglomerados con yeso o escayola para su uso en la construcción. *Informes de la Construcción*, 60(509), 35-43.
- Grandclerc, A.; Gueguen-Minerbe, M.; Nour, I.; Dangla, P.; Chaussadent, T. Accelerated (2016), Biodeterioration Test for the Study of Cementitious Materials in Sewer Networks: Experimental and Modeling. *Key Engineering Materials*; Trans Tech Publications: Zurich, Switzerland; Volume 711, pp. 1069–1075.
- GtoG Project. <http://gypsumtogypsum.org/> [Accessed in August 2018].
- Gu, L., Ozbakkaloglu, T. (2016). Use of recycled plastics in concrete: A critical review. *Waste Manage*, 51, 19-42.
- Guan, B., Yang, L., Fu, H., Kong, B., Li, T., Yang, L. (2011). α -calcium sulfate hemihydrate preparation from FGD gypsum in recycling mixed salt solutions. *Chemical Engineering Journal*, 174(1), 296-303.
- Guinée, J. B. (2002). Handbook on life cycle assessment - operational guide to the ISO standards. *The international journal of life cycle assessment*, 7(5), 311-313.
- Gutiérrez-González, S., Gadea, J., Rodríguez, A., Junco, C., Calderón, V. (2012). Lightweight plaster materials with enhanced thermal properties made with polyurethane foam wastes. *Construction and Building Materials*, 28(1), 653-658.

Gyptec. www.gyptec.eu/ [Accessed in August 2018].

Hanif, A., Diao, S., Lu, Z., Fan, T., Li, Z. (2016). Green lightweight cementitious composite incorporating aerogels and fly ash cenospheres–Mechanical and thermal insulating properties. *Construction and Building Materials*, 116, 422-430.

Hanif, A., Lu, Z., Sun, M., Parthasarathy, P., Li, Z. (2017). Green lightweight ferrocement incorporating fly ash cenosphere based fibrous mortar matrix. *Journal of Cleaner Production*, 159, 326-335.

Hannawi, K., Kamali-Bernard, S., Prince, W. (2010). Physical and mechanical properties of mortars containing PET and PC waste aggregates. *Waste Manage.*, 30(11), 2312-2320.

Heraklith (2014), <http://www.heraklith.es/>.

Hernández-Olivares, F., Oteiza, I., De Villanueva, L. (1992). Experimental analysis of toughness and modulus of rupture increase of sisal short fiber reinforced hemihydrated gypsum. *Composite Structures*, 22(3), 123-137.

Herrero, M. J., Escavy, J. I., Bustillo, M. (2013). The Spanish building crisis and its effect in the gypsum quarry production (1998–2012). *Resources Policy*, 38(2), 123-129.

Hossain, M. U., Ng, S. T. (2018). Critical consideration of buildings' environmental impact assessment towards adoption of circular economy: An analytical review. *Journal of Cleaner Production*, 205, 763-780.

Hossain, M.U., Ng, S.T., (2019). Influence of waste materials on buildings' life cycle environmental impacts: Adopting resource recovery principle. *Resources Conservation and Recycling*, 142, 10-23.

Ibrahim, S., Abdelfattah, I., Soliman, O. (2016). Environmental recycling of compact disc using industrial wastewater. *Der Pharmacia Lettre*, 8(17), 207-214.

IGME (2018). Yeso y alabastro (2016). *Panorama Minero 2017* (pp. 435-458).

Imteaz, M. A., Arulrajah, A., Maghool, F. (2019). Environmental and geotechnical suitability of recycling waste materials from plasterboard manufacturing. *Waste Management & Research*, 0734242X19881213.

Ismail, Z. Z., Al-Hashmi, E. A. (2008). Use of waste plastic in concrete mixture as aggregate replacement. *Waste Manage.*, 28(11), 2041-2047.

ITEC Database. <https://metabase.itec.cat/vid/e/es/bedec> [Accessed in August 2018].

Jassim, A. K. (2017). Recycling of Polyethylene Waste to Produce Plastic Cement. *Procedia Manufacturing*, 8, 635-642.

Jaya, R.P.; Bakar, B.H.A.; Johari, M.A.M.; Ibrahim, M.H.W.; Hainin, M.R.; Jayanti, D.S. (2014), Strength and microstructure analysis of concrete containing rice husk ash under seawater attack by wetting and drying cycles. *Advances in Cement Reserch*, 26, 145–154.

Jiménez, J. R., Ayuso, J., López, M., Fernández, J. M., De Brito, J. (2013). Use of fine recycled aggregates from ceramic waste in masonry mortar manufacturing. *Construction and Building Materials*, 40, 679-690.

Jiménez-Rivero, A., García-Navarro, J. (2016). Indicators to measure the management performance of end-of-life gypsum: from deconstruction to production of recycled gypsum. *Waste and Biomass Valorization*, 7(4), 913-927.

- Jiménez-Rivero, A., García-Navarro, J. (2017). Best practices for the management of end-of-life gypsum in a circular economy. *Journal of Cleaner Production*, 167, 1335-1344.
- Jiménez-Rivero, A., García-Navarro, J. (2017). Characterization of quality recycled gypsum and plasterboard with maximized recycled content. *Materiales de Construcción*, 67(328), 137.
- Jiménez-Rivero, A., García-Navarro, J. (2017). Exploring factors influencing post-consumer gypsum recycling and landfilling in the European Union. *Resources, Conservation and Recycling*, 116, 116-123.
- Jiménez-Rivero, A., Sathre, R., García-Navarro, J. (2016). Life cycle energy and material flow implications of gypsum plasterboard recycling in the European Union. *Resources, Conservation and Recycling*, 108, 171-181.
- Jolliet, O., Margni, M., Charles, R., Humbert, S., Payet, J., Rebitzer, G., Rosenbaum, R. (2003). IMPACT 2002: a new life cycle impact assessment methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 8(6), 324.
- Jorge, F. C., Pereira, C., Ferreira, J. M. F. (2004). Wood-cement composites: a review. *Holz als Roh-und Werkstoff*, 62(5), 370-377.
- Karaman, S., Sahin, S., Gunal, H., & Orung, I. (2006). Stabilization of waste pet bottles with Gypsum. *Journal of Applied Sciences*, 6, 1119-1122.
- Klöpffer, W., Grahl, B. (2014). *Life cycle assessment (LCA): a guide to best practice*.
- Kou, S. C., Lee, G., Poon, C. S., Lai, W. L. (2009). Properties of lightweight aggregate concrete prepared with PVC granules derived from scraped PVC pipes. *Waste Manage.*, 29(2), 621-628.
- Ledesma, E. F., Jiménez, J. R., Ayuso, J., Fernández, J. M., de Brito, J. (2015). Maximum feasible use of recycled sand from construction and demolition waste for eco-mortar production—Part-I: ceramic masonry waste. *Journal of Cleaner Production*, 87, 692-706.
- Lee, J. C., Bradshaw, S. L., Edil, T. B., Benson, C. H. (2012). Quantifying the benefits of flue gas desulfurization gypsum in sustainable wallboard production. *Coal Combustion and Gasification Products*, 4, 17-20.
- Lei, D. Y., Guo, L. P., Sun, W., Liu, J. P., Miao, C. W. (2017). Study on properties of untreated FGD gypsum-based high-strength building materials. *Construction and Building Materials*, 153, 765-773.
- Leiva Aguilera, M. & del Río Merino, M. (2013). Escayola aditivada con residuos agrícolas: cáscara de arroz y cáscara triturada. *Actas del I Congreso Internacional de Construcción Sostenible y Soluciones Ecoeficientes*. Sevilla 20-22 May 2013 (pp. 118-127).
- Leiva, C., Arenas, C. G., Vilches, L. F., Vale, J., Gimenez, A., Ballesteros, J. C., Fernández-Pereira, C. (2010). Use of FGD gypsum in fire resistant panels. *Waste Management*, 30(6), 1123-1129.
- Leiva, C., Arenas, C. G., Vilches, L. F., Vale, J., Gimenez, A., Ballesteros, J. C., Fernández-Pereira, C. (2010). Use of FGD in fire resistant panels. *Waste Management*, 30(6), 1123-1129.
- Leone, C., Genna, S., Caggiano, A. (2013). Compact disc laser cleaning for polycarbonate recovering. *Procedia Cirp*, 9, 73-78.

- Liguori, F. Iucolano, I. Capasso, M. Lavorgna, L. Verdolotti (2014), The effect of recycled plastic aggregate on chemico-physical and functional properties of composite mortars. *Materials and Design*, 57 578–584.
- Lima, P. R. L., Leite, M. B., Santiago, E. Q. R. (2010). Recycled lightweight concrete made from footwear industry waste and CDW. *Waste management*, 30(6), 1107-1113.
- Lucas, J., de Brito, J., Veiga, R., Farinha, C. (2016). The effect of using sanitary ware as aggregates on rendering mortars' performance. *Materials & Design*, 91, 155-164.
- Lushnikova, N., Dvorkin, L. (2016). Sustainability of gypsum products as a construction material. *Sustain-ability of Construction Materials* (pp. 643-681).
- Mália, M., de Brito, J., Pinheiro, M. D., Bravo, M. (2013). Construction and demolition waste indicators. *Waste Management & Research*, 31(3), 241-255.
- Martín-Morales, M., Zamorano, M., Ruiz-Moyano, A., Valverde-Espinosa, I. (2011). Characterization of recycled aggregates construction and demolition waste for concrete production following the Spanish Structural Concrete Code EHE-08. *Construction and Building Materials*, 25(2), 742-748.
- Meawad, A. S., Bojinova, D. Y., Pelovski, Y. G. (2010). An overview of metals recovery from thermal power plant solid wastes. *Waste Management*, 30(12), 2548-2559.
- Mikova, N., Eichhammer, W., Pfluger, B. (2019). Low-carbon energy scenarios 2050 in north-west European countries: Towards a more harmonised approach to achieve the EU targets. *Energy Policy*, 130, 448-460.
- Mikulčić, H., Klemeš, J. J., Vujanović, M., Urbaniec, K., Duić, N. (2016). Reducing greenhouse gasses emissions by fostering the deployment of alternative raw materials and energy sources in the cleaner cement manufacturing process. *Journal of Cleaner Production*, 136, 119-132.
- Mohammed, B.S.; Abdullahi, M.; Hoong, C.K. (2014), Statistical models for concrete containing wood chipping as partial replacement to fine aggregate. *Construction and Building Materials*., 55, 13–19.
- Mohr, B.J.; Nanko, H.; Kurtis, K.E. (2005), Durability of kraft pulp fiber–cement composites to wet/dry cycling. *Cement and Concrete Composites*, 27, 435–448.
- Monahan, J., Powell, J. C. (2011). An embodied carbon and energy analysis of modern methods of construction in housing: A case study using a lifecycle assessment framework. *Energy and Buildings*, 43(1), 179-188.
- Morales-Conde, M.J.; Rubio-de-Hita, P.; Pérez-Gálvez, F. (2017), Composite Mortars Produced with Wood Waste from Demolition: Assessment of New Compounds with Enhanced Thermal Properties. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30, 04017273.
- Mounanga, P., Gbongbon, W., Poullain, P., Turcry, P. (2008). Proportioning and characterization of lightweight concrete mixtures made with rigid polyurethane foam wastes. *Cement Concrete Composites*, 30(9), 806-814.
- N. Saikia, J. de Brito (2012). Use of plastic waste as aggregate in cement mortar and concrete preparation: A review. *Construction and Building Materials*, 34 385–401.

- Newbery, D. M. (2016). Towards a green energy economy? The EU Energy Union's transition to a low-carbon zero subsidy electricity system—Lessons from the UK's Electricity Market Reform. *Applied Energy*, 179, 1321-1330.
- Oliver, J., Mora, D. F., Huespe, A. E., Weyler, R. (2012). A micromorphic model for steel fiber reinforced concrete. *International Journal of Solids and Structures*, 49(21), 2990-3007.
- Omar, W. M. S. W. (2018). A hybrid life cycle assessment of embodied energy and carbon emissions from conventional and industrialised building systems in Malaysia. *Energy and Buildings*, 167, 253-268.
- Pacheco-Torgal, F. (2014). Eco-efficient construction and building materials research under the EU Frame-work Programme Horizon 2020. *Construction and Building Materials*, 51, 151-162.
- Pacheco-Torgal, F. (2014). Eco-efficient construction and building materials research under the EU Framework Programme Horizon 2020. *Construction and Building Materials*, 51, 151-162.
- Papailiopolou, N., Grigoropoulou, H., Founti, M. (2017). Energy analysis of the effects of high-level reincorporation of post-consumer recycled gypsum in plasterboard manufacturing. *Waste and Biomass Valorization*, 8(5), 1829-1839.
- Parres, F., Crespo-Amorós, J. E., & Nadal-Gisbert, A. (2009). Mechanical properties analysis of plaster reinforced with fiber and microfiber obtained from shredded tires. *Construction and Building Materials*, 23(10), 3182-3188.
- Pedro, D., De Brito, J., Evangelista, L. (2014). Influence of the use of recycled concrete aggregates from different sources on structural concrete. *Construction and Building Materials*, 71, 141-151.
- Pérez-Gálvez, F., Rubio-de Hita, P., Ordoñez-Martín, M., Morales-Conde, M.J. Rodríguez-Liñán C (2013). Sustainable restoration of traditional building systems in the historical centre of Sevilla (Spain). *Energy and Buildings*, 62, 648-659.
- Pérez-Miñana, J. (1969). *Compendio práctico de acústica*. Labor.
- Plastics Europe (2017). *Plastics the Facts 2017. An analysis of European plastics production, demand and waste data*.
- Poon, C. S., Chan, D. (2006). Paving blocks made with recycled concrete aggregate and crushed clay brick. *Construction and Building Materials*, 20(8), 569-577.
- Poon, C. S., Kou, S. C., Wan, H. W., Etxeberria, M. (2009). Properties of concrete blocks prepared with low grade recycled aggregates. *Waste management*, 29(8), 2369-2377.
- PRé Sustainability SimaPro 8. 2016. Available online: <https://www.pre-sustainability.com/> [Accessed 2018].
- Prodi, V. (2013) *Report on a European strategy on plastic waste in the environment*.
- Real Decreto 105/2008, de 1 de febrero, por el que se regula la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición.
- Reichl, C., Schatz, M., Zsak, G. (2018). *World Mining Data 2018*, vol. 33. Vienna: Federal Ministry for Sustainability and Tourism.

- Ricciardi, P., Belloni, E., Cotana, F. (2014). Innovative panels with recycled materials: Thermal and acoustic performance and Life Cycle Assessment. *Applied Energy*, 134, 150-162.
- Rivela, B., Moreira, M. T., Muñoz, I., Rieradevall, J., Feijoo, G. (2006). Life cycle assessment of wood wastes: a case study of ephemeral architecture. *Science of the Total Environment*, 357(1), 1-11.
- Rodríguez- Liñán, C., Morales-Conde, M. J., Pérez-Gálvez, F. (2014). Rehabilitation of domestic architecture in Sevilla. A study of building systems and characterization of the horizontal structure. *REHAB 2014: Proceedings of the International Conference on Preservation, Maintenance and Rehabilitation of Historical Buildings and Structures* (Tomar (Portugal) 19-21 June 2014).
- Rogelj, J., Den Elzen, M., Höhne, N., Fransen, T., Fekete, H., Winkler, H., Meinshausen, M. (2016). Paris Agreement climate proposals need a boost to keep warming well below 2 C. *Nature*, 534(7609), 631-639.
- Rossetto, J. R., Santos Correia, L., Henrique Geraldo, R., Camarini, G. (2016). Gypsum plaster waste recy-cling: Analysis of calcination time. *Key Engineering Materials*, 668.
- Rossetto, J. R., Santos Correia, L., Henrique Geraldo, R., Camarini, G. (2016). Gypsum plaster waste recycling: Analysis of calcination time. *Key Engineering Materials*, 668.
- Rubio-de Hita, P., Pérez-Gálvez, F., Morales-Conde, M. J., Pedreño-Rojas, M. A. (2018). Reuse of plastic waste of mixed polypropylene as aggregate in mortars for the manufacture of pieces for restoring jack arch floors with timber beams. *Journal of Cleaner Production*, 198, 1515-1525.
- Saikia, N., de Brito, J. (2012). Use of plastic waste as aggregate in cement mortar and concrete preparation: A review. *Construction and Building Materials*, 34, 385-401.
- Saikia, N., de Brito, J. (2014). Mechanical properties and abrasion behaviour of concrete containing shredded PET bottle waste as a partial substitution of natural aggregate. *Construction and Building Materials*, 52, 236-244.
- Saint-Gobain Construction Products UK Limited (2017). GYPTONE. Patent, M 0314667 (7).
- San Antonio González, A., Del Río Merino, M., Viñas Arrebola, C., Villoria Sáez, P. (2015). Lightweight Material Made with Gypsum and EPS Waste with Enhanced Mechanical Strength. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(2), 04015101.
- San-Antonio-González, A., Del Río-Merino, M., Arrebola, C. V., Villoria-Sáez, P. (2015). Lightweight material made with gypsum and extruded polystyrene waste with enhanced thermal behaviour. *Construction and Building Materials*, 93, 57-63.
- Sengul, O., Azizi, S., Karaosmanoglu, F., Tasdemir, M. A. (2011). Effect of expanded perlite on the mechanical properties and thermal conductivity of lightweight concrete. *Energy and Buildings*, 43(2), 671-676.
- Serna, Á., del Río, M., Palomo, J. G., González, M. (2012). Improvement of gypsum plaster strain capacity by the addition of rubber particles from recycled tyres. *Construction and Building Materials*, 35, 633-641.
- Sharma, R., Bansal, P. P. (2016). Use of different forms of waste plastic in concrete—a review. *Journal of Cleaner Production*, 112, 473-482.

- Sharman, W.R. Accelerated Durability Testing of Autoclaved Wood-Fiber Reinforced Cement Sheet Composites. *Durability and Building Materials*, 1986, 3, 255–275.
- Siddique, R. (2012). Utilization of wood ash in concrete manufacturing. *Resources, Conservation and Recycling*, 67, 27-33.
- Siddique, R., Khatib, J., Kaur, I. (2008). Use of recycled plastic in concrete: a review. *Waste Management*, 28(10), 1835-1852.
- Silva, R. V., De Brito, J., Dhir, R. K. (2014). Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production. *Construction and Building Materials*, 65, 201-217.
- Silva, R. V., de Brito, J., Dhir, R. K. (2019). Use of recycled aggregates arising from construction and demolition waste in new construction applications. *Journal of Cleaner Production*, 117629.
- Simion, I. M., Fortuna, M. E., Bonoli, A., Gavrilescu, M. (2013). Comparing environmental impacts of natural inert and recycled construction and demolition waste processing using LCA. *Journal of environmental engineering and landscape management*, 21(4), 273-287.
- Soroushian, P.; Marikunte, S.; Won, J.P. (1994), Wood fiber reinforced cement composites under wetting-drying and freezing-thawing cycles. *Journal of Material in Civil Engineering*, 6, 595–611.
- Soutsos, M. N., Tang, K., Millard, S. G. (2011). Concrete building blocks made with recycled demolition aggregate. *Construction and Building Materials*, 25(2), 726-735.
- Spanish Ministry of Development (2006). CTE DB-HE. Documento Básico DB-HE Ahorro Energético. Código Técnico de la Edificación.
- Spanish Ministry of Development (2009). CTE DB-HR. Documento Básico DB-HR Protección frente al Ruido. Código Técnico de la Edificación.
- Suárez, S., Calderón, L. J., Gassó, S., Roca, X. (2018). Multi-criteria decision analysis to assess the environmental and economic performance of using recycled gypsum cement and recycled aggregate to produce concrete: the case of Catalonia (Spain). *Resources, Conservation and Recycling*, 133, 120-131.
- Suárez, S., Roca, X., Gasso, S. (2016). Product-specific life cycle assessment of recycled gypsum as a replacement for natural gypsum in ordinary Portland cement: application to the Spanish context. *Journal of Cleaner Production*, 117, 150-159.
- Suwannakarn, S. W. (2009). *Post-cracking characteristics of high performance fiber reinforced cementitious composites* (Doctoral dissertation, University of Michigan).
- Tekin, I., Birgul, R., Yaman, I. O., Gencil, O., Aruntas, H. Y. (2015). Monitoring macro voids in mortars by computerized tomography method. *Measurement*, 63, 299-308.
- Tesarek, P., Drchalova, J., Kolísko, J., Rovnaníková, P., Černý, R. (2007). Flue gas desulfurization gypsum: study of basic mechanical, hydric and thermal properties. *Construction and Building Materials*, 21(7), 1500-1509.
- Toledo Filho, R.D.; Ghavami, K.; England, G.L.; Scrivener, K. (2003), Development of vegetable fibre–mortar composites of improved durability. *Cement Concrete Composites*, 25, 185–196.

Turgut, P., Algin, H. M. (2007). Limestone dust and wood sawdust as brick material. *Building and Environment*, 42(9), 3399-3403.

UNE-EN 102042: 2013. Gypsum plasters. Other test methods.

UNE-EN 10534-2: 2002. Acoustics—determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tube: Part 2.

UNE-EN 13279-1: 2006. Gypsum binders and gypsum plasters - Part 1: Definitions and requirements.

UNE-EN 13279-2: 2006. Gypsum binders and gypsum plasters - Part 2: Test methods.

UNE-EN 13914-2: 2005. Design, preparation and application of external rendering and internal plastering - Part 2: Design considerations and essential principles for internal plastering.

UNE-EN 14040: 2007. Environmental Management—Life Cycle Assessment—Principles and Framework.

UNE-EN 14246: 2006. Gypsum elements for suspended ceilings. Definitions, requirements and test methods.

UNE-EN 354: 2004. Acoustics, Measurement of sound absorption in a reverberation room.

Vidales Barriguete, A., del Río Merino, M., Atanes Sánchez, E., Piña Ramírez, C., Viñas Arrebola, C. (2018). Analysis of the feasibility of the use of CDW as a low-environmental-impact aggregate in conglomerates. *Construction and Building Materials*, 178, 83-91.

Wang, L., Chen, S. S., Tsang, D. C., Poon, C. S., Shih, K. (2016). Recycling contaminated wood into eco-friendly particleboard using green cement and carbon dioxide curing. *Journal of Cleaner Production*, 137, 861-870.

Watts, D. B., Dick, W. A. (2014). Sustainable uses of FGD gypsum in agricultural systems: Introduction. *Journal of Environmental Quality*, 43(1), 246-252.

Watts, D. B., Dick, W. A. (2014). Sustainable uses of FGD in agricultural systems: Introduction. *Journal of Environmental Quality*, 43(1), 246-252.

Wei, J.; Meyer, C. Degradation mechanisms of natural fiber in the matrix of cement composites. *Cement Concrete Composites*, 2015, 73, 1–16.

Wei, J.; Meyer, C. (2014), Degradation rate of natural fiber in cement composites exposed to various accelerated aging environment conditions. *Corrosion Science*, 88, 118–132.

Wei, J.; Meyer, C. (2016), Utilization of rice husk ash in green natural fiber-reinforced cement composites: Mitigating degradation of sisal fiber. *Cement Concrete Composites*, 81, 94–111.

Williams, D. W., Mould, A. E. (1975). Flexural strength of glassfibre reinforced gypsum and plasterboard. *Building Science*, 10(1), 79-83.

Wirsching, F., Hüller, R., Olejnik, R. (1994). FGD definitions and legislation in the European Communities, in the OECD and in Germany. *Studies in Environmental Science* (Vol. 60, pp. 205-216). Elsevier.

Wirsching, F., Hüller, R., Olejnik, R. (1994). FGD gypsum definitions and legislation in the European Communities, in the OECD and in Germany. *Studies in Environmental Science*, 60, 205-216.

- Wolfe, R.W.; Gjinolli, A. (1999) Durability and strength of cement-bonded wood particle composites made from construction waste. *Forest Product Journal*, 49, 24–31.
- Wynn, G., Coghe, P. (2017). *Europe's Coal-Fired Power Plants: Rough Times Ahead Analysis of the Impact of a New Round of Pollution Controls*. Institute for Energy Economics and Financial Analysis, Cleveland.
- Yang, K., Xu, Q., Townsend, T. G., Chadik, P., Bitton, G., Booth, M. (2006). Hydrogen sulfide generation in simulated construction and demolition debris landfills: Impact of waste composition. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 56(8), 1130-1138.
- Yañez, A., Edgar, E., Silva, L., Venturini, O. J., Ugaya, C. L. (2008). Sensibility analysis of the cogeneration using biomass on life cycle assessment for palm oil biodiesel. *Palmas* 29 (4), 10.
- Zabalza Bribián, I., Valero Capilla, A., Aranda Usón, A. (2011). Life cycle assessment of building materials: Comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential. *Building and Environment*, 46(5), 1133-1140.
- Zevenhoven, R., Saeed, L. (2003). *Automotive shredder residue (ASR) and compact disc (CD) waste: options for recovery of materials and energy*. Helsinki Univ. of Technology, Espoo (Finland), 74.
- Zhang, L.W., Sojobi, A.O., Kodur, V.K.R., Liew, K.M. (2019), Effective utilization and recycling of mixed recycled aggregates for a greener environment. *Journal of Cleaner Production*, 236, 27.
- Zhang, X., Wang, F. (2016). Assessment of embodied carbon emissions for building construction in China: Comparative case studies using alternative methods. *Energy and Buildings*, 130, 330-340.
- Zhang, Y. C., Dai, S. B., Huang, J., Duan, S. G., Zhi, Z. Z. (2016). Preparation of thermal insulation plaster with FGD. *Kemija u industriji: Časopis kemičara i kemijskih inženjera Hrvatske*, 65(5-6), 283-288.

B. RELEVANCIA CIENTÍFICA DE LAS REVISTAS INDEXADAS

Como ya se ha comentado, esta Tesis Doctoral se ha realizado siguiendo la modalidad de compendio de publicaciones recogida por la normativa que regula los estudios de Doctorado en la Universidad de Sevilla. En este sentido, en este trabajo se recogen 9 artículos científicos publicados en las siguientes revistas indexadas en Web of Science (Journal Citation Reports_ JCR): *Construction and Building Materials*, *Journal of Cleaner Production*, *Materials* y *Journal of Building Engineering*.

La Tabla recoge, para cada uno de los años de publicación, los factores de impacto de cada revista, así como su posición en el ranking de la categoría temática en cuestión:

ISSN	Revista	Categoría Temática	Año	Factor de Impacto	Ranking
0950-0618	Construction and Building Materials	Construction and Building Technology	2016	3.169	8/61 (Q1)
			2017	5.651	21/242 (Q1)
0959-6526	Journal of Cleaner Production	Environmental Sciences	2019	7.246	19/265 (Q1)
			2020*	7.246	19/265 (Q1)
			2019	3.057	132/314 (Q2)
1996-1944	Materials	Materials Science, Multidisciplinary	2020*	3.057	132/314 (Q2)
			2020*	3.379	15/63 (Q1)
2352-7102	Journal of Building Engineering	Construction and Building Technology	2020*	3.379	15/63 (Q1)

*Al no disponerse datos de métricas del año 2020 en el momento del depósito de este trabajo, se toman los últimos índices publicados hasta la fecha.