

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID**  
Escuela Técnica Superior de Edificación



**Mejora y caracterización de morteros de yeso y escayola mediante la adición de fibras de polímeros procedentes del reciclaje de eslingas de un solo uso de RCD con criterios de economía circular**

## **TESIS DOCTORAL**

Presentada para optar al título de Doctor por:

**Dany Marcelo Tasán Cruz**

Máster en Innovación Tecnológica en Edificación

Madrid, 2024



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

Escuela Técnica Superior de Edificación

**Doctorado en Innovación Tecnológica en Edificación**

**Mejora y caracterización de morteros de yeso y escayola mediante la adición de fibras de polímeros procedentes del reciclaje de eslingas de un solo uso de RCD con criterios de economía circular**

## **TESIS DOCTORAL**

Presentada para optar al título de Doctor por:

**Dany Marcelo Tasán Cruz**

Máster en Innovación Tecnológica en Edificación

Bajo la dirección de:

Dra. Paola Villoria Sáez

Dr. Mariano González Cortina

Madrid, 2024

Título: Mejora y caracterización de morteros de yeso y escayola mediante la adición de fibras de polímeros procedentes del reciclaje de eslingas de un solo uso de RCD con criterios de economía circular

Autor: Dany Marcelo Tasán Cruz

Programa de Doctorado: Doctorado en Innovación Tecnológica en Edificación

Dirección de tesis:

Dra. Paola Villoria Sáez, Profesora Titular de Universidad, Universidad Politécnica de Madrid (Co-directora)

Dr. Mariano González Cortina. Profesor Catedrático de Escuela Universitaria. Universidad Politécnica de Madrid (Co-director)

Revisores externos:

Tribunal de tesis:

Fecha de defensa:





Los resultados de esta Tesis Doctoral es parte del proyecto de I+D+i PID2022-138002OA-I00, financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033/ y “FEDER Una manera de hacer Europa”.

## Dedicatoria

A Manuel y Evangelina mucho de mi ser es gracias a ustedes.

A mis padres Marcelo y Gloria, este paso no podría haberlo dado sin su ayuda. Por ser el amor incondicional y pilar fundamental en todas las actividades que he realizado y han estado presentes siempre.

A mis hijos Nicolás y Martín, fuente de inspiración constante en mejorar como persona.

# Agradecimientos

En la redacción de esta tesis me han apoyado de manera técnica o anímica muchísimas personas, de las cuales de manera muy especial me gustaría agradecer a:

Mariano, mi profesor desde el año uno de universidad y codirector de esta tesis, que ha guiado y acompañado en toda mi formación superior con su sabiduría y paciencia infinita.

Paola, codirectora de tesis por estar presente desde el día uno corrigiendo y mejorando esta tesis y que sin duda demuestra el conocimiento amplio en la investigación.

Evangelina, profesora de Ingeniería industrial que junto al personal de laboratorio guiaron y enseñaron de manera altruista en el análisis térmico y microscópico de los materiales.

Sin duda alguna, mi agradecimiento infinito a mis padres quienes siempre han estado al lado en todas mis actividades y han apoyado de todas las formas posibles mis decisiones tomadas, por más atrevidas que éstas sean.

A mis hijos Nicolás y Martín, por comprender desde muy pequeños que esta tesis no era fácil y que quitaría tiempo de compañía y guía.

A Fernanda, por estar siempre a mi lado y ser el apoyo necesario en todas las acciones que realizo.

# Abstract

The construction sector is the industry with the highest generation of waste compared to other economic sectors. The construction and demolition waste (CDW) generated at construction sites pose an environmental problem due to their quantity and management, which requires solutions to prevent increasing the planet's pollution. For this reason, many professionals and academics have worked on finding solutions to mitigate the impact caused by the sector, specifically by improving the waste management system through a circular economy.

In this regard, numerous studies have designed new materials and products to reduce environmental impact, analysed the incorporation of CDW in the manufacture of new alternative construction materials, such as plasters, mortars, and concretes with various percentages of CDW. One of the materials used on site to facilitate and optimize the transport and unloading of reinforcement steel is single-use slings, which are a common waste in construction sites and could be used as an alternative raw material for manufacturing construction materials. This would reduce waste that would otherwise be sent to landfills or incinerators, with the consequent emission of greenhouse gases into the atmosphere.

Therefore, this doctoral thesis analyses the incorporation of polypropylene fiber CDW, from single-use slings, into a gypsum and plaster matrix. The studied samples include polypropylene fibers in the range of 1% to 4%, and the compounds were tested to determine their physical, mechanical, thermal, and microscopic behaviour. The results obtained from the various tests indicate that the maximum amount of fibers that can be incorporated into gypsum and plaster pastes is 3%, and the series with 4% incorporation can only be used for laboratory studies due to their higher care requirements and lower performance in production.

The incorporation of recovered polymeric fibers into gypsum and plaster mortars shows an improvement in mechanical and physical properties, confirming the suitability of applying these fibers in construction elements used in building construction.

# Resumen

El sector de la construcción es la industria con mayor generación de residuos con respecto a los demás sectores económicos, estos residuos de construcción y demolición (RCD) generados en las obras son un problema para el medioambiente, por su cantidad y gestión, lo que obliga a dar soluciones para que estos RCD no incrementen la contaminación del planeta. Por este motivo, han sido muchos los profesionales y académicos que han trabajado buscando soluciones para mitigar el impacto ocasionado por el sector y en concreto mejorar el sistema de gestión de sus residuos, a través de una economía circular.

En este sentido han sido muchas las investigaciones que han diseñado nuevos materiales y productos que generen un menor impacto ambiental, analizado la incorporación de RCD para la fabricación de nuevos materiales de construcción alternativos, como por ejemplo yesos, morteros y hormigones con distintos porcentajes de RCD. Uno de los materiales utilizados en obra para favorecer y optimizar el transporte y la descarga de ferralla en las obras, son las eslingas no reutilizables, por lo que suponen un residuo habitual en las obras de construcción y podría ser incorporado como materia prima alternativa para la fabricación de materiales de construcción, reduciendo así el vertido de residuos que de otra forma serían destinados a vertederos o incineradoras con la consiguiente emisión de gases de efecto invernadero a la atmósfera.

Por todo lo anterior, esta tesis doctoral analiza la incorporación de RCD de fibras polipropileno, procedentes de las eslingas de un solo uso, en una matriz de escayola y yeso. Las muestras estudiadas incorporan fibras de polipropileno en el rango del 1% al 4% y los compuestos se ensayaron para determinar su comportamiento físico, mecánico, térmico y microscópico. Los resultados obtenidos en los diferentes ensayos realizados determinan que la cantidad máxima de fibras que se pueden incorporar a los morteros de yeso y escayola es de 3% para mantener la trabajabilidad y comportamiento similar a los yesos y escayolas tradicionales

La incorporación de fibras poliméricas recuperadas en morteros de yeso y escayola presenta una mejora en las propiedades mecánicas y físicas que confirman la aptitud de la aplicación de estas fibras en elementos constructivos aplicables a la edificación.

# Tabla de Contenido

<i>Abstract</i> .....	<i>vi</i>
<i>Resumen</i> .....	<i>vii</i>
<i>Lista de Figuras</i> .....	<i>x</i>
<i>Lista de Tablas</i> .....	<i>xii</i>
<i>Lista de Imágenes</i> .....	<i>xIv</i>
<i>Abreviaturas y Acrónimos</i> .....	<i>xvi</i>
<b>1. Introducción</b> .....	<b>1</b>
1.1. Impacto medioambiental del sector de la construcción .....	1
1.2. Los residuos de construcción y demolición .....	2
1.2.1. Generación de residuos de construcción y demolición en España .....	5
1.2.2. Gestión de los residuos de construcción y demolición .....	7
1.2.3. Economía circular .....	10
1.3. Eslingas de un solo uso y su gestión .....	14
1.3.1. Composición de las eslingas de un solo uso: polipropileno .....	17
1.3.2. Gestión de los residuos procedentes de las eslingas de un solo uso .....	19
1.4. El yeso como material de construcción .....	20
1.4.1. Composición química y sus transformaciones .....	23
1.4.2. Transformaciones químicas en el proceso de deshidratación en función de la temperatura de cocción: 24	
1.4.3. Normativa de yesos para la construcción .....	27
1.4.4. Producción nacional de yeso .....	31
<b>2. Estado de la cuestión</b> .....	<b>33</b>
2.1. Estudios previos para disminuir la densidad de los yesos .....	33
2.2. Estudios previos para mejorar las propiedades mecánicas de los yesos mediante la adición de fibras .....	35
2.2.1. Estudios que incorporan fibras naturales .....	35
2.2.2. Incorporación de fibras de vidrio .....	38
2.2.3. Incorporación de fibras poliméricas .....	38
2.3. Estudios que promueven una economía circular a través de la incorporación de RCD en yeso .....	43
<b>3. Justificación del trabajo</b> .....	<b>47</b>
<b>4. Objetivos</b> .....	<b>49</b>
<b>5. Materiales y plan experimental</b> .....	<b>51</b>
5.1. Materiales y equipos utilizados .....	51

5.2. Plan experimental .....	55
5.2.1. Fase 1: Caracterización de los materiales utilizados.....	55
5.2.2. Fase 2: Confección de probetas con fibras de polipropileno y residuos de eslingas de un solo uso .....	60
5.2.3. Fase 3: Caracterización de los compuestos en estado fresco. ....	63
5.2.4. Fase 4: Caracterización de los compuestos en estado endurecido.....	65
5.2.5. Fase 5: Selección de los mejores compuestos y realización de imágenes con microscopio electrónico de barrido (SEM).....	77
<b>6. Resultados y discusión</b>	<b>79</b>
6.1. Caracterización de materiales utilizados .....	79
6.1.1. Densidad aparente.....	79
6.1.2. Densidad real .....	80
6.1.3. Análisis termogravimétrico. ....	81
6.1.4. Difracción de rayos X.....	86
6.2. Caracterización de los compuestos.....	87
6.2.1. Estado fresco.....	87
6.2.2. Estado endurecido .....	89
6.3. Selección de los mejores compuestos y su aplicación en edificación.....	109
6.3.1. Aplicaciones de los compuestos seleccionados de yeso con fibras. ....	113
<b>7. Conclusiones</b>	<b>115</b>
<b>8. Futuras líneas de investigación</b>	<b>119</b>
<b>Referencias</b>	<b>121</b>
<b>Publicaciones generadas</b>	<b>135</b>
<b>Anexos</b>	<b>136</b>
Anexo 1. Ficha técnica de yeso grueso YG .....	137
Anexo 2. Ficha técnica de escayola E-35 .....	139
Anexo 3. Ficha técnica de SIKAFIBER.....	141
Anexo 4. Ficha técnica eslingas de un solo uso .....	144
Anexo 5. Características del agua.....	147

# Lista de Figuras

Figura 1: Generación total de residuos (2020) [15].	3
Figura 2: Residuos generados según las distintas actividades económicas en Europa.[4]	4
Figura 3: Residuos generados durante el año 2020 en España según los distintos sectores [21]	5
Figura 4: Jerarquía de Residuos. Fuente: Elaboración propia en base del Artículo 4 de la Directiva 2008/98/CE [28]	7
Figura 5: Ejes de actuación de Estrategia Española de Economía Circular. Fuente: Elaboración propia	13
Figura 6: Estructura PP isotáctico. Fuente: Elaboración propia.	17
Figura 7: Estructura PP Atáctico. Fuente: Elaboración propia.	18
Figura 8: Estructura PP Sindiotáctico. Fuente: Elaboración propia	18
Figura 9: Familia de los yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso de la construcción. Fuente: UNE-EN 13279-1:2009 [48]	28
Figura 10: Producción mundial de yeso 2020 [68]	31
Figura 11: Producción de productos de cantera en el año 2019 [70]	32
Figura 12: Análisis termogravimétrico de YG.	81
Figura 14: Análisis termogravimétrico de E-35.	81
Figura 15: Análisis termogravimétrico de Fibras comerciales.	83
Figura 16: Análisis termogravimétrico de fibras recicladas RCD	84
Figura 17: Resultados de difracción de rayos X. (Elaboración propia)	86
Figura 18: Densidad de muestras desecadas. (Elaboración propia)	
Figura 19: Valores de la dureza Shore tipo C. (Elaboración propia)	91
Figura 20: Valores de la resistencia a flexión. (Elaboración propia)	93
Figura 21: Valores de la resistencia a compresión. (Elaboración propia)	95
Figura 22: Valores de la adherencia. (Elaboración propia)	97
Figura 23: Valores del coeficiente de conductividad térmica. (Elaboración propia)	99
Figura 24: Valores de ascensión por capilaridad. (Elaboración propia)	101
Figura 25: Valores de Dureza superficial de placas. (Elaboración propia)	103
Figura 26: Flexión de paneles. (Elaboración propia)	104

Figura 27: Distribución de tamaño de poros acumulado. Muestras con fibra recuperada. (Elaboración propia).....	108
Figura 28: Relación entre densidad y resistencia a flexión.....	109
Figura 29: Relación entre densidad y resistencia a flexión.....	110

# Lista de Tablas

Tabla 1 Porcentajes de RCD por familia de materiales. Fuente: [26].	6
Tabla 2: Colores de etiquetas en función del material. Fuente: Elaboración propia.	16
Tabla 3: Características mecánicas del PP. Fuente: elaboración propia.	19
Tabla 4: Procesos energéticos de transformación [63].	25
Tabla 5 Tipos de conglomerantes a base de yeso y de yesos para la construcción. Fuente: UNE-EN13279-1:2009 [48].	29
Tabla 6: Especificaciones para los yesos de construcción. Fuente: UNE-EN13279-1:2009 [48].	30
Tabla 7: Índice de pureza. Fuente: UNE 102011:2013 [67].	31
Tabla 8: Porcentaje de residuos en tamiz. Fuente: UNE 102011:2013 [67].	31
Tabla 9. Trabajos de investigación realizados para mejorar las propiedades del yeso. Fuente: Elaboración propia.	46
Tabla 10: Características técnicas de YG.	52
Tabla 11: Características técnicas de la E35.	52
Tabla 12: Características técnicas de la fibra comercial.	53
Tabla 13: Características técnicas de la fibra RCD.	53
Tabla 14. Nomenclatura de probetas. (Elaboración propia)	60
Tabla 15. Probetas elaboradas en función de los ensayos a realizar (Elaboración propia)	61
Tabla 16: Densidad aparente YG y E-35.	79
Tabla 17: Ensayo de picnometría de Helio.	80
Tabla 18. Fluidez de la pasta. Fuente: Elaboración propia.	87
Tabla 19. Valores de la densidad. (Elaboración propia)	89
Tabla 20. Valores de la dureza Shore tipo C. (Elaboración propia)	91
Tabla 21. Valores de la resistencia a flexión. (Elaboración propia)	93
Tabla 22. Valores de la resistencia a compresión. (Elaboración propia)	95
Tabla 23. Valores de la adherencia. Elaboración propia.	97
Tabla 24. Valores de conductividad térmica. (Elaboración propia)	99
Tabla 25. Valores de ascensión por capilaridad. (Elaboración propia)	101
Tabla 26. Valores de dureza superficial de placas. (Elaboración propia)	102
Tabla 27. Flexión de paneles. (Elaboración propia)	104

Tabla 28. Propiedades obtenidas por la porosimetría de mercurio en los compuestos seleccionados. (Elaboración propia) .....	106
--	-----

## Lista de Imágenes

Imagen 1: Estructura laminar [51].	22
Imagen 2: Estructura punta de lanza [52].	22
Imagen 3: Estructura ordinaria[53].	22
Imagen 4: Variedad de roca tipo alabastro [54]	22
Imagen 5: Variedad de roca selenita [55]	22
Imagen 6: Variedad de roca, rosa del desierto [56]	22
Imagen 7: Yeso Grueso utilizado en el estudio	52
Imagen 8: Escayola utilizada en el estudio	52
Imagen 9: Fibras comerciales de polipropileno.	53
Imagen 10: Fibras de polipropileno procedente de los residuos de eslingas (RCD)	53
Imagen 11: Medición de densidad bulk YG, E-35	55
Imagen 12: Medición de densidad real con picnómetro de helio.	56
Imagen 13: Análisis térmico gravimétrico. Equipo (izquierda) y brazos de termobalanza (derecha).	58
Imagen 14: Equipo de difracción de rayos X.	59
Imagen 15: Proceso de elaboración de probetas. (Elaboración propia).	62
Imagen 16: Medición de diámetros. (Elaboración propia)	65
Imagen 17: Autopore IV 9500.	67
Imagen 18: Medición dureza Shore tipo C. (Elaboración propia)	68
Imagen 19: Dispositivo de ensayo a flexión. (Elaboración propia)	69
Imagen 20: Dispositivo de ensayo a compresión (Elaboración propia).	70
Imagen 21: Máquina extractora de discos. (Elaboración propia)	71
Imagen 22: Ensayo de caja térmica (Elaboración propia).	72
Imagen 23: Medición de ascensión de agua por capilaridad (Elaboración propia)	74
Imagen 24: Ensayo de choque por impacto.	75
Imagen 25: Dispositivo de ensayo a flexión de placas (Elaboración propia)	76
Imagen 26: Ensayo SEM. (Elaboración propia)	78
Imagen 27: Microscopía de la muestra YG 3K 200 $\mu$ m (izquierda) 60 $\mu$ m(derecha)	110

Imagen 28: Microscopía de la muestra YG 3R 200 $\mu$ m (izquierda) 60 $\mu$ m(derecha). .....	111
Imagen 29: Microscopía de la muestra E3K 200 $\mu$ m (izquierda) 60 $\mu$ m(derecha).....	112
Imagen 30: Microscopía de la muestra E3R 200 $\mu$ m (izquierda) 60 $\mu$ m(derecha). .....	113

## Abreviaturas y Acrónimos

AENOR	Asociación Española De Normalización
AN	Anhidrita
CE	Comisión Europea
CFC	Clorofluorocarburos
CMU	Carga Máxima De Utilización
CO <sub>2</sub>	Dióxido De Carbono
CSAT	Consejo Superior De Arquitectura Técnica
DH	Dihidrato
DMR	Directiva Marco De Residuos
E	Escayola
ETSEM	Escuela Técnica Superior De Edificación Madrid
GEI	Gases De Efecto Invernadero
GWP	Potencial de Calentamiento Global
IP	Índice De Pureza
LAQETSIDI,	Laboratorio de Análisis Químico de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Diseño Industrial de la Universidad Politécnica de Madrid
LER	Lista Europea De Residuos
LMETSEMUPM	Laboratorio de materiales de la Escuela Técnica Superior de Edificación de la Universidad Politécnica de Madrid
PA	Poliamida
PEMAR	Plan Estatal Marco De Gestión De Gestión De Residuos
PES	Poliéster
PP	Polipropileno
RAE	Real Academia Española

RCD	Residuos de construcción y demolición
RILEM	Reunion internationale des laboratoires et experts des matériaux
SEM	Microscopio Electrónico De Barrido
SH	Hemihidrato
UPM	Universidad Politécnica De Madrid
UNE	Una Norma Europea
VPU	Velocidad De Pulso Ultrasónico
XPS	Poliestireno Extruido
YG	Yeso Grueso



# 1. Introducción

## 1.1. Impacto medioambiental del sector de la construcción

El desarrollo económico de la sociedad y los países está basado en el aporte muy importante del sector de la construcción [1], ya que éste hace realidad las necesidades tanto de los ciudadanos como de las entidades públicas que requieren vivienda, urbanismo y los diferentes servicios públicos y privados necesarios para los requerimientos actuales que la sociedad demanda. Es así como el sector de la construcción tiene enorme influencia sobre la actividad económica, empleo y tasas de crecimiento [2]. Este desarrollo económico, urbanístico y de servicios convierte a la construcción en un foco de contaminación del medio ambiente [3], dado que consume múltiples recursos naturales y genera una gran cantidad de residuos de construcción y demolición [4] y emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) [5]: dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO), metano (CH<sub>4</sub>), óxidos de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), ozono (O<sub>3</sub>), dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) y clorofluorocarburos (CFC).

Los indicadores más relevantes en la cuantificación del impacto ambiental son las emisiones de CO<sub>2</sub> [6] producidas en la fabricación de materiales y su transporte, así como el consumo energético desde la extracción de la materia prima hasta la puesta en obra que rondan el 50% de la energía de la Unión Europea [7].

La cuantificación de los distintos gases emitidos y medidos en kg equivalentes nos da una idea del potencial de calentamiento global (PCG) debido a los diversos gases emitidos durante la producción y puesta en obra de los materiales de construcción. Estos gases son componentes determinantes del equilibrio térmico del planeta ya que controlan los flujos de energía en la atmósfera al absorber la radiación infrarroja emitida por la Tierra, lo que conlleva a las alteraciones en el patrón del clima y trastornos del ecosistema y la salud humana [8].

El informe de inventario nacional de gases de efecto invernadero del año 2022 [9] incluye al sector de la construcción en el sector de la industria, para el cual cuantifica en 40,210.76 (kt) de CO<sub>2</sub> equivalente al 14.64% de las emisiones nacionales. Las cifras del 2020 representan un decremento del 0.12% con respecto al 2019 con previsión de mantener la tendencia de decrecimiento de estas emisiones [10]. El impacto ambiental de la construcción incluye también la

actividad del transporte por carretera de los materiales desde la fábrica hasta la obra, la misma que se diferencia por el tipo de combustible y es cuantificada en el año 2020 en 74,255.79 kt de CO<sub>2</sub> correspondiente al 27.03% un 2.17% menos que el año 2019.

La incorporación de fibras naturales en materiales de construcción ha sido practicada desde la antigüedad en varias regiones del mundo, con el objetivo de mejorar la resistencia a flexión de estos materiales lo que conllevó al desarrollo de la mejora de ésta[11]. La fibra principal que ha sido utilizada en estos refuerzos ha sido la fibra de sisal, la misma que su aptitud ha sido probada a lo largo del tiempo. Adicional a las fibras de sisal, las demás fibras orgánicas en función de la región donde nos encontremos como las de coco, cabuya, dátil, etc., también han sido utilizadas para el refuerzo de los materiales utilizados en la edificación local. En términos de sostenibilidad y biodegradabilidad estas fibras son unas de las opciones más populares dado que son medioambientalmente amigables y no tóxicos, cualidades que son especialmente ventajosas para la producción de fibras naturales. De acuerdo al estudio de Li, Mai y Ye [12] el cultivo de fibras de sisal a nivel mundial ronda los 4.5 millones de toneladas al año. Cada una de las plantas, puede contener de 1000 a 1200 fibras, lo que representa el 4% de fibras, 0.75% de cutícula, 8% de materia seca y 87.25% de agua.

Las ventajas de la utilización de estas fibras naturales podrían ser comparadas con la utilización de fibras poliméricas procedentes de Residuos de Construcción y Demolición destinadas a su fin de vida útil y recuperadas para su incorporación en materiales compuestos.

## **1.2. Los residuos de construcción y demolición**

La definición que la Directiva Marco de Residuos 2008/98/CE establece para residuos es: “cualquier sustancia u objeto del cual su poseedor se desprenda o tenga la intención de la obligación de desprenderse[13].

Constantemente desde que se tiene registros, la humanidad ha generado residuos con los materiales y productos que ha tenido a su alcance y la utilización que dan a éstos. Hasta hace unos años, estos residuos no causaban mayor preocupación, dado que estos residuos eran orgánicos biodegradables o podían ser utilizados en

## Introducción

la fabricación de herramientas o materiales de construcción. Debido a la formación de núcleos urbanos compactos, los residuos empiezan a convertirse en un problema a tener en cuenta, tanto en el ámbito sanitario como estético produciendo la recolección y posterior tratamiento de los residuos[14].

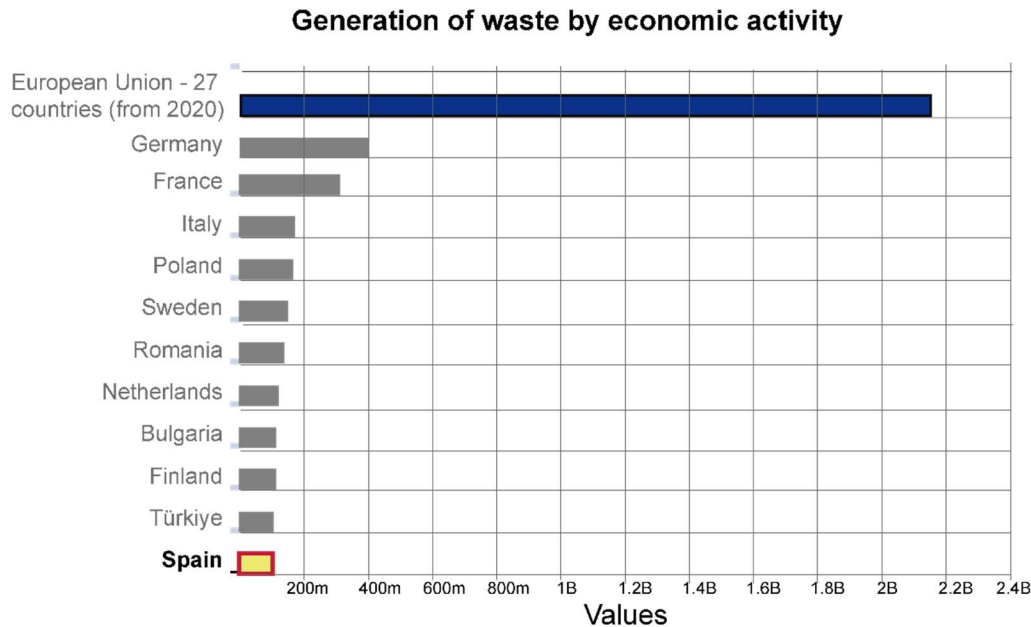


Figura 1: Generación total de residuos (2020) [15].

Las últimas estadísticas de la UE-27 indican que la generación de residuos total en Europa ascendió a 2.151 millones de toneladas en el año 2020 [15]. En la Figura 1 se muestra el volumen de los residuos generados en la UE y en concreto, la generación de residuos en España es de casi 105.93 millones de toneladas. Esta cantidad de residuos generados tiene relación directa con la población y el volumen de los países en términos económicos[16].

Al observar los datos clasificados en función de las actividades o sectores industriales representados en la Figura 2, se puede afirmar que el sector de la construcción representa más del tercio de la producción de residuos generados en Europa [4].

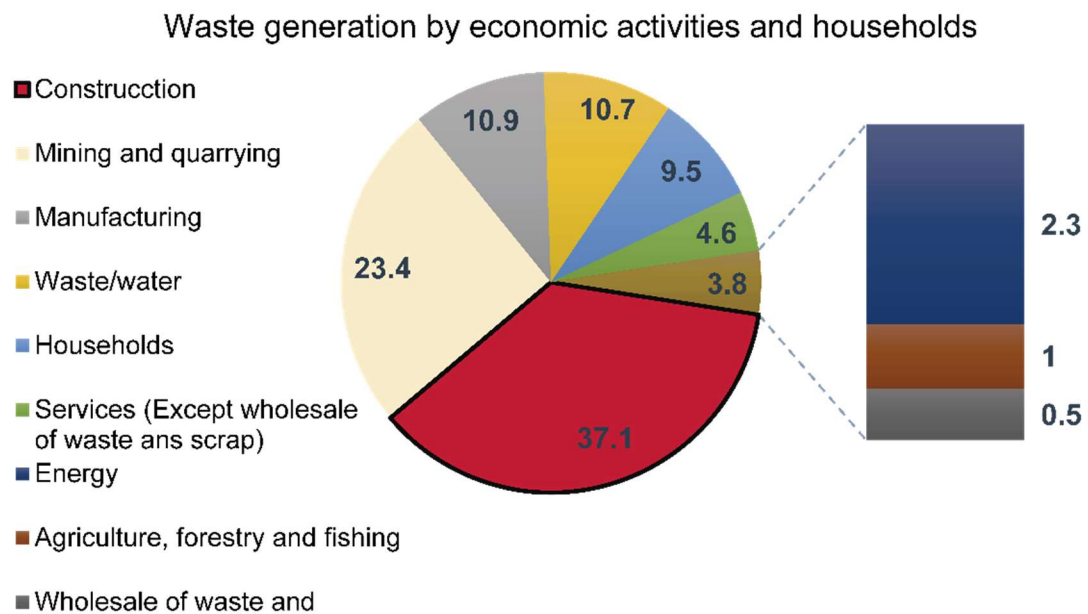


Figura 2: Residuos generados según las distintas actividades económicas en Europa. [4].

La mayor parte de los RCD son residuos inertes, razón por la cual no modifican químicamente el entorno y no ponen en peligro la salud humana o animal, aunque existe un porcentaje muy pequeño que puede contaminar los suelos y acuíferos[17]. Las sustancias químicas albergadas en los recipientes son los causantes de la contaminación y deben ser tratados de manera más estricta en el desecho de estos y así evitar las reacciones químicas, contaminación de suelos y agua e influencia en la salud del ser humano.

Cada vez es mayor el porcentaje de aprovechamiento de los materiales desechados en las obras. Es así como en el 2021 Eurostat presenta el aprovechamiento de 72.796 millones de toneladas de residuos generados, alcanzando el 68.72% de aprovechamiento de los residuos en general [18]. La ley 7 del 2022 es más

ambiciosa y busca que el porcentaje sea al menos del 70% de aprovechamiento de estos residuos [19].

La Decisión 94/904/CE del Consejo aprueba el Listado Europeo de Residuos (LER), y es actualizada por la Decisión de la Comisión 955 del 2014 [15]. Es así como el Listado Europeo de Residuos es establecido en España mediante Orden MAM/304/2002 del 8 de febrero por la cual se publican “las operaciones de valorización y eliminación de residuos y la lista Europea de Residuos”[20]. Esta orden tiene como base la Ley 10/1998, la misma que es derogada por la Ley 7/22[19] del 8 de abril.

Este listado tiene un sistema de codificación que divide en 3 niveles que se establece en primer lugar el capítulo otorgando un código de 2 cifras, un segundo nivel que genera un código numérico de 4 dígitos referente a los subcapítulos que los dos primeros dígitos coinciden con el capítulo al que pertenece y por último el tercer código numérico son 6 dígitos que agrupará en el capítulo y subcapítulos del listado.

### 1.2.1. Generación de residuos de construcción y demolición en España

La generación de residuos en España para el sector de la construcción se cuantificó en 32,542,572.5 toneladas (t) en las últimas estadísticas disponibles del año 2020 (ver Figura 3).

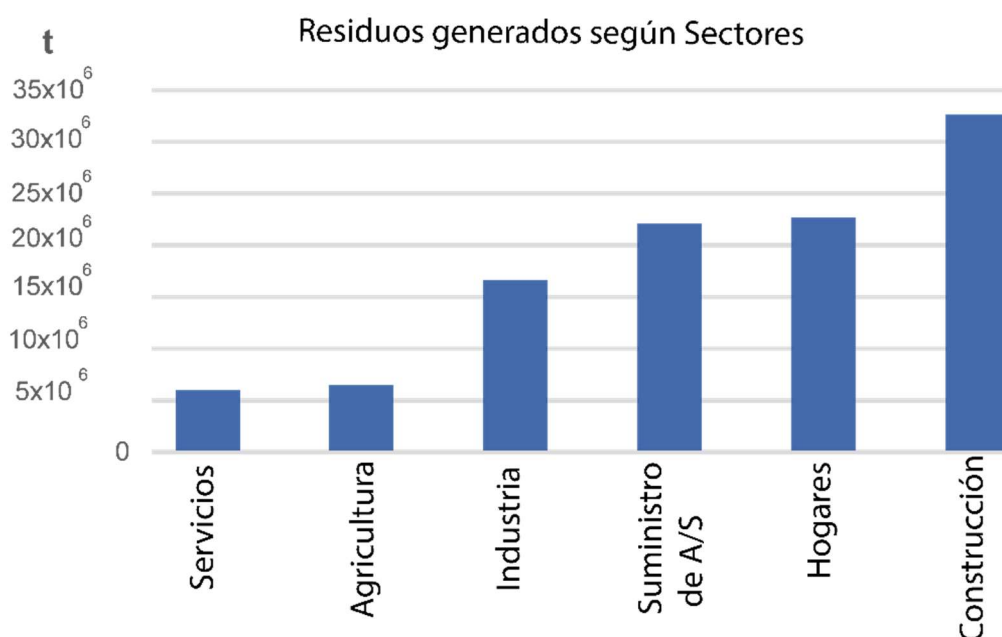


Figura 3: Residuos generados durante el año 2020 en España según los distintos sectores [21]

Los residuos de construcción y demolición RCD generados en la edificación representan el 30,81% del total y son transportados hacia los gestores de residuos antes mencionados para su tratamiento y gestión de estos residuos, encaminados a cubrir las estrategias de la economía circular al incorporar RCD en la generación de nuevos materiales [22]. En este sentido, han sido generadas estrategias para reducir el impacto ambiental producido por el sector. Una de las principales líneas de trabajo establecidas por la Comisión Europea es el correcto manejo de los residuos y combatir la generación de gases de efecto invernadero emitidos al aire, a través de medidas orientadas hacia una economía circular [23]. En concreto, el programa de la Unión Europea “Horizonte Europa” (2021-2027) [24] que es la continuación de la estrategia Horizonte 2020. promueve un crecimiento inteligente, sostenible e inclusivo que son reforzadas entre sí y dictan una visión de economía de mercado europea para el siglo XXI. En los países industrializados, la alimentación, la vivienda y la movilidad son los responsables del 70%-80% de todo el impacto medioambiental [25].

El Consejo Superior de Arquitectura Técnica (CSAT) ha cuantificado los residuos de construcción y demolición en función de la familia de los materiales [26] y los ratios nacionales de éstos. Estos datos son representados en la Tabla 1. En la cual se observa que los productos que más se descartan son los elementos de arcilla cocida, tales como azulejos y variedad de ladrillos. El porcentaje que corresponde al vertido de materiales plásticos donde están incluidas las fibras que son objeto del estudio es del 2.90%.

Tabla 1 Porcentajes de RCD por familia de materiales. Fuente: [26].

<b>Tipo de material</b>	<b>Composición (%)</b>
Cerámicos	39.62
Hormigón	24.24
Asfalto	1.58
Madera	10.01
Metales	5.43
Papel	2.11
Plástico	2.90
Vidrio	2.,60
Yeso	7.74
Mezclados	2.63
Basura	1.05
Potencialmente peligroso	2.43

### 1.2.2. Gestión de los residuos de construcción y demolición

Los países miembros de la Unión Europea están alineados por los principios y objetivos establecidos en la normativa comunitaria, es así que existen diferentes Directivas y Decisiones relativas a los residuos que a partir de los años 1990 han sido desarrolladas, modificadas y afinadas, como por ejemplo la Directiva de envases y residuos de envases, la Directiva de Equipos Electrónicos, la estrategia temática sobre prevención y reciclado de residuos, la directiva de pilas y acumuladores, y por último la DMR 2008/98/CE de los RCD [27].

En concreto, la legislación europea que regula la gestión de los RCD a nivel comunitario es la Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo del 19 de noviembre de 2008 [13] que es modificada parcialmente por la Directiva 2018/851 [28]. Según dichas Directivas, la definición de la gestión de residuos es *“la recogida, el transporte, la valorización y la eliminación de los residuos, incluida la vigilancia de estas operaciones, así como el mantenimiento posterior al cierre de los vertederos, incluidas las actuaciones realizadas en calidad de negociante”*.

El artículo 4. de la Directiva 2008/98/CE establece el principio de jerarquía de los residuos el cual establece que el principal aspecto a considerar es la prevención, reutilización, reciclaje y valorización para evitar la eliminación final de los residuos. Esta jerarquía es representada en la Figura 4.

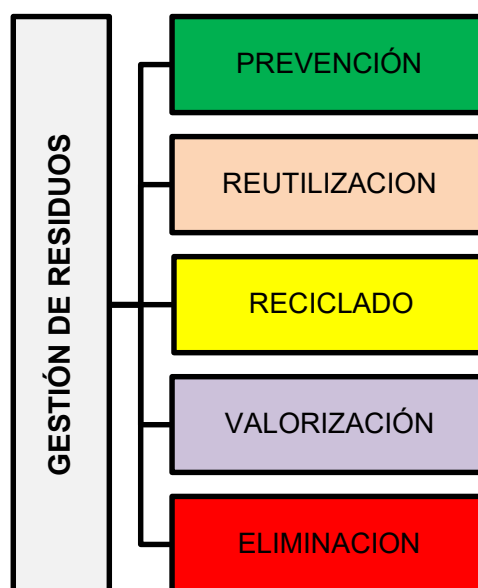


Figura 4: Jerarquía de Residuos. Fuente: Elaboración propia en base del Artículo 4 de la Directiva 2008/98/CE [28]

Cada país cuenta con medidas propias para reducir la cantidad de RCD generados y una de ellas es la regulación al vertido de RCD [27], la cual promueve un estricto control de esta actividad. Otra medida es el incremento de las tasas aplicadas a la eliminación en vertederos, un ejemplo de ellos es Alemania que estableció el compromiso voluntario nacional del sector de la construcción con la finalidad de reducir la cantidad de vertidos en escombros.

En España el RD 105/2008 obliga a que el productor de los RCD a redactar un Estudio de gestión de RCD que irá incluido en la documentación del proyecto para su aprobación. En este Estudio de gestión deberá cuantificar la cantidad de residuos que serán generados en la obra y establecerá las medidas oportunas enfocadas a prevenir la generación de residuos que serán adoptadas en las obras y la cuantificación de los costos resultantes de la gestión de estos residuos. De igual manera, el plan de gestión de los residuos de construcción y demolición debe ser redactado por el poseedor de los residuos, donde concretará cómo va a ser la aplicación del estudio de gestión de residuos del proyecto

La resolución del 16 de noviembre del 2015 aprueba el Plan estatal marco de gestión de Gestión de Residuos para el período 2016-2022 (PEMAR) [29], este plan anula al Plan Nacional Integral de Residuos (PNIR) del período 2008-2015. En dicho Plan, se definen como instalaciones para la gestión de los residuos las siguientes:

- *Plantas de transferencia*: “instalaciones para el depósito temporal de residuos de la construcción que han de ser tratados o eliminados en instalaciones localizadas a grandes distancias. Su cometido principal es agrupar residuos y abaratar costes de transporte, si bien en ocasiones se efectúa en ellas algún proceso menor de triaje y clasificación de las fracciones de los residuos, buscando mejorar las características de los RCD enviados a plantas de tratamiento y a vertederos”
- *Plantas de tratamiento*: “son instalaciones de tratamiento de RCD, cuyo objetivo es seleccionar, clasificar y valorizar las diferentes fracciones que contienen estos residuos, con el objetivo de obtener productos finales aptos para su utilización directa, o residuos cuyo destino será otro tratamiento posterior de valorización o reciclado, y si este no fuera posible, de eliminación en vertedero. Pueden ser fijas o móviles”
- *Vertederos controlados*: “son instalaciones para el depósito definitivo de RCD (por encima de los plazos establecidos en la legislación de vertederos)

## Introducción

y que deben cumplir los requisitos del Real Decreto 1481/2001 que les sea de aplicación”

La efectividad en la gestión de los RCD deberá cumplir con la interacción uniforme de la efectividad ambiental, efectividad social y la efectividad económica [30]. Esto da como resultado el equilibrio necesario para que la gestión sea beneficiosa en todo ámbito mejorando el rendimiento económico de los agentes ambientales, reduciendo la carga de residuos desechados en los vertederos y mejorando el reciclaje junto con la concienciación de la sociedad de una gestión adecuada con la separación de residuos desde la separación de residuos adecuada. La separación adecuada de residuos en obra es factible dada la exigencia de la disposición de contenedores específicos para el tipo de residuos que se prevea en la obra.

La publicación del BOE-B-2023-20478 anuncia el inicio del período de consulta e información pública de los documentos titulados “Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos” y “Estudio Ambiental Estratégico”. Este plazo terminó el 2023-08-04, existiendo la versión inicial del “Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos (2023-2035)” sin que este sea de aplicación.

### **1.2.3. Economía circular**

El concepto de "Economía Circular" introducido por la Fundación Ellen MacArthur en el año 2012, se ha establecido rápidamente en el mundo de la gestión de residuos y recursos, convirtiéndose en la principal corriente en la actualidad [31]. Es así como el incremento de publicaciones e iniciativas continúa llamando la atención de investigadores, instituciones públicas y privadas que se suman a la tendencia creciente de desarrollo de productos con base en la economía circular[32].

La economía circular defiende el regreso a la economía de los recursos utilizados que de otra forma se convertirían en residuos, en lugar de solo manejar su eliminación sostenible. En vez de ver los residuos como un final, se consideran como una etapa temporal en un ciclo idealmente perpetuo en la actividad económica, antes de su eventual disipación en energía, según las leyes de la física [33].

A pesar de que el reciclaje es un aspecto central, hay mucho más en juego. Existen muchas otras ideas relevantes o emergentes relacionadas con la economía circular, tales como la recuperación de recursos, la eficiencia y la efectividad de recursos, el consumo y la producción sostenible, los sistemas de suministro, el metabolismo urbano, el cero residuos, el eco-diseño, la criticidad de materiales, el diseño para el reciclaje, los modelos en cascada, la re-manufacturación, la prevención y minimización de residuos y, por supuesto, la sostenibilidad en general [34] [35].

La idea es mantener separados los materiales "ingenierizados" o altamente desarrollados, como los plásticos basados en combustibles fósiles, compuestos a base de resinas, de otros materiales basados en plantas, como los residuos alimentarios, y procesarlos para obtener recursos secundarios. Esta es una descripción idealizada que promueve la idea de "cerrar el ciclo" de los materiales [32]. Lo necesario de la economía circular se refleja en la comunicación de la Comisión Europea de julio de 2014 titulada "Hacia una economía circular: un programa de cero residuos para Europa"[36], [37]. Este documento establece principalmente las bases para la futura gestión de residuos sólidos en Europa, aspirando a liderar el camino en los desarrollos relevantes.

El "cómo" se recuperan los recursos "ingenierizados", involucra una larga cadena de recolección, transporte y procesamiento de materiales, con el objetivo final de reemplazar los recursos primarios con los derivados de los residuos; y el reemplazo ocurre donde se produce la fabricación y/o producción de energía [38]. En este caso, las eslingas son directamente desechadas a los contenedores de obra que son

## Introducción

gestionados por los gestores autorizados de residuos y no se tiene constancia de que éstos sean utilizados en ninguna actividad que sea abarcada en la economía circular. Al ser compuestos por polímeros, el uso dado a estas fibras una vez separados será la incineración en las diferentes industrias donde sea requerida energía calorífica, tales como centrales térmicas, fabricas cementeras, caleras o yesíferas.

La regulación del régimen jurídico aplicable a productos en relación con el impacto en la gestión de los residuos de estos productos junto con la prevención, producción y gestión de los residuos viene dada por la Ley 7/2022 [19]. La finalidad de esta ley es la prevención y reducción de la generación de residuos y los impactos negativos que generan estos residuos junto con la gestión de estos. El campo de aplicación de esta ley cubre a la perfección a las eslingas de un solo uso dado el artículo 3) letra b) *“todo tipo de residuos, teniendo en cuenta las exclusiones recogidas en los apartados 2, 3 y 4”*. El artículo 5 de la Ley 7/2022 [19]: *“Fin de condición de residuo”*, indica:

- a) Que las sustancias, preparados u objetos resultantes deban ser usados para finalidades específicas.
- b) Que exista un mercado o una demanda para dichas sustancias, preparados u objetos.
- c) Que las sustancias, preparados u objetos resultantes cumplan los requisitos técnicos para las finalidades específicas, y la legislación existente y las normas aplicables a los productos.
- d) Que el uso de la sustancia, preparado u objeto resultante no genere impactos adversos globales para el medio ambiente o la salud humana

La huella ecológica a nivel global, en particular la española, ha sido deteriorada, lo que demanda la búsqueda de soluciones integrales con la inclusión de sectores públicos y privados, generadores de residuos y consumidores, es así que por parte del gobierno ha publicado el documento “Estrategia Española de Economía Circular. España Circular 2030.” [33] donde asienta las bases de un nuevo modelo de producción y consumo en el que los recursos, materiales y valor de los productos se mantenga el mayor tiempo posible en el tiempo, así como la generación mínima de residuos y que sean aprovechados con el mayor alcance posible los residuos que no puedan ser evitados (ver Figura 5).

La estrategia española es de carácter transversal y multidisciplinar y está formada por planes de acción trienales, así también está alineada con iniciativas internacionales para la salvaguarda del medioambiente. Las iniciativas internacionales firmadas por España son:

- a) Acuerdo de París sobre el cambio climático
- b) Agenda 2030 para el desarrollo sostenible.
- c) Declaración ministerial de la asamblea de las naciones unidas sobre el medio ambiente.

Esto determina unas orientaciones estratégicas que marca los objetivos marcados para el año 2030:

- Reducir en 30% el consumo nacional de materiales en relación con el PIB, tomando como año de referencia el 2010.
- Reducir la generación de residuos un 15% respecto a lo generado en el 2010.
- Reducir la generación de residuos de alimentos en toda la cadena alimentaria.
- Incrementar la reutilización y preparación para la misma hasta llegar al 10 % de los residuos municipales generados
- Mejorar un 10% la eficiencia en el consumo del agua.
- Reducir la emisión de gases de efecto invernadero, por debajo de los 10 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> equivalentes.

Esta estrategia transversal contiene los planes de actuación que conllevan los siguientes ejes de actuación:

- Producción: desde la idea del producto, diseño, fabricación, vida útil y desecho del producto, deberá ser fácilmente reparable, tener mayor vida útil, actualización del sistema, fácilmente reciclables y no emisión de sustancias nocivas.
- Consumo: introducción de un sistema de consumo más responsable, que incluya el acceso a servicios para la prevención y reducción de la generación de residuos, avanzando en un reciclaje adecuado de los productos.

## Introducción

- Gestión de residuos: aprovechamiento adecuado de los recursos presentes en los residuos dada la escasez de las materias primas
- Materias primas secundarias: permite el uso sostenible de los recursos naturales, creando confianza en los consumidores en el consumo responsable de recursos.
- Reutilización y depuración de agua: este es un eje singular debido a la importancia del agua, por su esencial incidencia en la economía y porque España es líder en la reutilización del agua.

Los siguientes ejes tratados son considerados transversales e igual de importantes en la estrategia española de Economía circular.

- Sensibilidad y participación: la implicación ciudadana en el avance a una economía circular es la clave para el funcionamiento adecuado de la economía circular, junto con la información adecuada de la jerarquía de residuos, la separación correcta de los residuos en origen, avanzando en el reciclaje de calidad para alcanzar los objetivos comunitarios.
- Investigación, innovación y competitividad: Las políticas de estos apartados tienen un peso muy importante en la estrategia que conllevan a investigar desde la academia, sectores privados, entre otros, innovando productos y sistemas de gestión que conllevan a la competitividad desde los estudios, hasta los negocios resultantes.
- Empleo y formación: es necesaria la recualificación, formación en nuevas capacidades, mejora de empleo existente, creación de empleos nuevos, los cuales tendrán un papel especial en la Economía Circular



Figura 5: Ejes de actuación de Estrategia Española de Economía Circular.

Fuente: Elaboración propia

### 1.3. Eslingas de un solo uso y su gestión

En el sector de la construcción, todos los materiales son transportados desde los diferentes almacenes y talleres hacia el centro de trabajo. Existen algunas unidades de obra que son completamente realizadas en la misma, casi de manera artesanal, como pueden ser el tendido de yeso o el levantado de mampostería de material cerámico. Por el contrario, existen unidades de obra que llegan de manera completamente industrializada y prefabricada que son colocadas en obra mediante elementos de elevación como las eslingas textiles o metálicas. La RAE define eslinga como: “*Maroma provista de ganchos para levantar grandes pesos.*”

Por último, existen unidades de obra que son una fusión entre lo industrializado y lo artesanal en obra, como pueden ser las estructuras de hormigón armado donde la armadura de acero corrugado es montada en taller y transportada y descargada en la obra. La carga, transporte y descarga de estos elementos pueden ser realizados con eslingas textiles de un solo uso que conllevan un mejor aprovechamiento del tiempo y de recursos de los transportistas, lo que conlleva a la reducción de costes de las empresas que se dedican a la ejecución de estructuras.

En la ejecución de obras de construcción al ser ejecutados las unidades de obra que se componen de ferralla, son utilizadas eslingas de un solo uso para la elevación y transporte de cargas. Estas eslingas son fibras tejidas de polímeros como poliéster polipropileno, poliamida que son asociadas con impactos negativos al medio ambiente en termino de toxicidad (en el caso de la incineración) y contaminación [39].

La normativa vigente de las eslingas textiles es la norma UNE 40901:2007 “Eslingas textiles” [40]. Esta norma define eslinga no reutilizable como: “*Eslinga diseñada para un solo viaje en un modo específico de utilización, colocada alrededor de la carga en el punto de partida y que permanece en su lugar hasta alcanzar el destino final. Después de ser retiradas de la carga en su destino final, la eslinga no reutilizable pasa a ser no apta para volver a utilizarse en un posterior servicio de elevación. Al eliminar la eslinga no reutilizable, conviene tener en consideración la legislación o regulación(es) medioambientales.*”

## Introducción

Los materiales químicos con los cuales se pueden elaborar estas eslingas son polímeros que son definidas en el apartado 5.1 (Materiales) [40, 41]. Es así como las fibras son únicamente de estos materiales:

- Poliamida (PA)
- Poliéster (PES)
- Polipropileno (PP)

Las eslingas son tejidos planos en disposición de malla entrelazada, realizados con polimérico y se unen para cerrar esta eslinga con hilos que proporcionen la adecuada resistencia mecánica a las especificaciones de cada eslinga. Estos hilos podrán ser de color diferente a las fibras de la eslinga para poder facilitar la inspección del estado de la unión de resistencia.

El apartado 3.15 establece la carga máxima de utilización (CMU), este valor está en función de las prescripciones de los cálculos realizados en la fase de diseño de la eslinga. En el caso que el CMU es inferior a 1 tonelada, será expresada en kilogramos (kg) no obstante si la CMU es mayor o igual a 1000 kilogramos, esta carga será expresada en toneladas (t).

El coeficiente de utilización de las eslingas viene dado por la relación entre la carga de rotura de la eslinga y la CMU [40], estos valores mínimos de este coeficiente deberán ser al menos 5 o 7. que dependerá de la forma en la que se sujete las eslingas a la carga.

Referente al marcado de las eslingas no reutilizables, es obligatorio que al menos contenga la siguiente información:

- a) eslinga no reutilizable.
- b) la referencia de la maniobra de elevación a realizar (debe identificarse cuando el coeficiente de utilización es igual a 5. y no es preceptiva su indicación cuando el coeficiente de utilización es igual a 7);
- c) la carga máxima de utilización (CMU);
- d) la longitud útil en metros;
- e) el material(es) textil de la eslinga no reutilizable, por ejemplo; poliéster (PES), poliamida (PA), polipropileno (PP);
- f) el código de trazabilidad;
- g) tipo o modelo de la eslinga no reutilizable (referencia para el diseño de la utilidad);

- h) el nombre, símbolo, marca registrada u otra identificación inequívoca del fabricante o distribuidor, origen de fabricación;
- i) el número de esta norma

Este marcado, será realizado con un color de etiqueta identificativo y único, acorde al material de la fibra de la eslinga. La Tabla 2 representa los colores de las etiquetas que deberán llevar las eslingas.

Tabla 2: Colores de etiquetas en función del material. Fuente: Elaboración propia.

<b>Material</b>	<b>Color</b>
Poliamida	Verde
Poliéster	Azul
Polipropileno	Marrón

El anexo D, apartado 3. de la norma UNE 40901:2007 a título informativo se comunica la selección correcta y uso de las eslingas no reutilizables. Este apartado consta de 17 subapartados que son resumidos en el siguiente listado como los más importantes:

- No sobrecargar la CMU marcada.
- Seguir las buenas prácticas de uso relacionada con las eslingas.
- Proteger a la eslinga de abrasión, bordes y fricción, debido a la carga o al aparato de elevación.
- Seguimiento de la norma UNE 58151-1 referente a la planificación y dirección de la operación de elevación y adopción de sistemas seguros de trabajo.
- No reutilizar las eslingas.
- Una vez usadas, eliminar la etiqueta de la eslinga y posterior eliminación de la propia eslinga, según las prácticas ambientales más idóneas.

### 1.3.1. Composición de las eslingas de un solo uso: polipropileno

El polipropileno es uno de los polímeros más versátiles presentes en nuestra vida diaria. Puede ser utilizado tanto como plástico como fibra. Es obtenido a partir de la transformación química del petróleo [42]. El propileno es el subproducto de la producción de etileno o de operaciones de refinerías. El polipropileno es la polimerización del propileno y en sus inicios la estructura fue muy regular, denominada estructura isotáctica y ésta es representada en la Figura 6.

Este polímero es un plástico muy duro y resistente, opaco y resistente al calor, dado que se ablanda a más de los 150°C, es muy resistente a los golpes a pesar de tener poca densidad se puede doblar fácilmente y es resiliente dado que soporta varias deformaciones en el mismo lugar antes de producirse el fallo, lo que ha llevado a su uso como bisagras. Otra de las características es la estabilidad química que presenta siendo utilizado en un campo muy amplio en todos los sectores productivos [42], [43].

En función de los procesos de obtención del polipropileno puede tener varias tipologías de estructuras moleculares, mostradas a continuación:

**Isotáctica:** tiene una distribución regular de los grupos metilo que tienen alta cristalinidad en el rango de los 70% y 85%. Poseen alta resistencia mecánica y buena tenacidad. La presentación más conocida de este producto es el papel de embalaje o papel celofán y el material utilizado en fabricación de juguetes mediante el proceso de inyección. La estructura de este tipo de polipropileno es representada en la Figura 6.

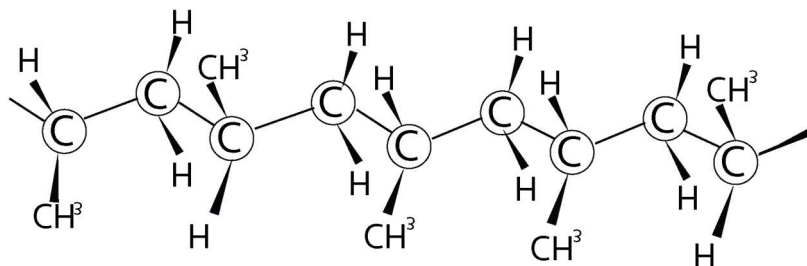


Figura 6: Estructura PP isotáctica. Fuente: Elaboración propia.

**Atáctica:** Los polipropilenos atácticos son fundamentalmente amorfos, se presentan en forma viscosa que serán utilizados en los pegamentos, adhesivos e imprimaciones. La estructura del polipropileno atáctico es representada en la Figura 7.

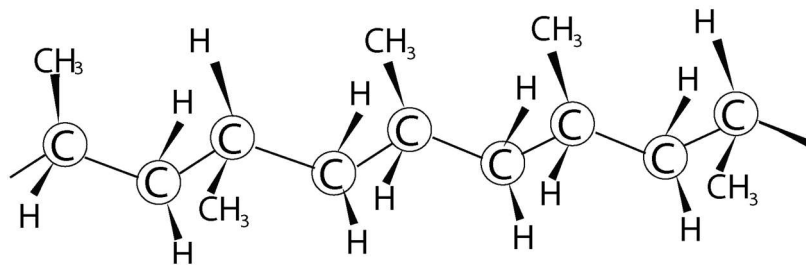


Figura 7: Estructura PP Atáctico. Fuente: Elaboración propia.

**Sindiotáctico:** La estructura de los polipropilenos sindiotácticos cristaliza muy mal después de los grupos metileno y aloja alternativamente los elementos necesarios para ser más elásticos que el polipropileno isotáctico, pero también esto reduce sus características mecánicas [42] [43] . La estructura del polipropileno atáctico es representada en la Figura 8.

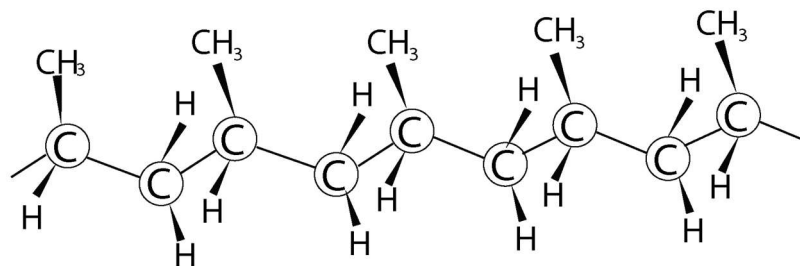


Figura 8: Estructura PP Sindiotáctico. Fuente: Elaboración propia

En este estudio se han utilizado fibras de polipropileno, las propiedades mecánicas características del polipropileno (isotáctico) son representadas en la Tabla 3 y han sido obtenidas de las etiquetas identificativas y fichas técnicas de las eslingas recuperadas en obra.

Tabla 3: Características mecánicas del PP. Fuente: elaboración propia.

Propiedad	Unidad	PP
Alargamiento a la rotura	%	650
Conductividad térmica	W/mK	0.22
Coefficiente de dilatación térmica de 20°C a 50°C	m/ mK	150x10 <sup>-6</sup>
Densidad	g/cm <sup>3</sup>	0.91
Dureza “Shore”		D73
Módulo elástico	N/mm <sup>2</sup>	1300
Punto de fusión	°C	164
Resistencia a tracción	N/mm <sup>2</sup>	33
Temperatura máxima de uso	°C	100
Temperatura mínima de uso	°C	-10

### 1.3.2. Gestión de los residuos procedentes de las eslingas de un solo uso

Las eslingas de un solo uso son fibras tejidas de polímeros como poliéster, polipropileno y poliamida. Los polímeros son asociados con impactos negativos al medio ambiente en términos de toxicidad por la incorporación de aditivos antioxidantes y retardantes de ignición, más no por el polímero base, adicionalmente su producción envuelve la generación de benceno y clorofluorocarbonos [39].

Estas eslingas de un solo uso no se pueden reutilizar y se depositan en vertederos, lo que ocasiona un impacto negativo al medio ambiente. La recuperación, reciclaje y posterior uso de estas fibras como materia prima alternativa para la fabricación de materiales de construcción, evita la emisión de CO<sub>2</sub> y revela un consumo menor de energía y de combustibles fósiles [44]. Esto favorece la consecución de uno de los objetivos principales del documento Europa 2020 (centrar el reciclaje y desarrollo de políticas de innovación al enfrentar el reto del cambio climático, eficiencia energética y de recursos, cambios demográficos y salud [23]) e impulsa las nuevas necesidades de investigación que surgen de los desafíos globales contenidas en el análisis de las estrategias de Horizonte Europa 2025-2027 [45], con el apartado específico 3.2.3 “*Deliver a circular economy and zero pollution ambition for a toxic-free environment*”.

Las previsiones definidas en la COM 571 “*Hoja de ruta hacia una Europa eficiente en el uso de los recursos*” son que el 42% del consumo final de energía, 35% de los

gases de efecto invernadero y la cantidad de materiales extraídos, sean influidos y reducidos por la innovación de los sistemas constructivos y del uso de la edificación[25]. Por tanto, las actuales políticas que impulsan la eficiencia energética y el uso de energías renovables en los edificios deberán ser reforzadas y complementados con políticas de eficiencia energética de los productos utilizados, los que deberán abordar un abanico más grande de impactos ambientales.

Por las razones antes descritas, es importante que los desechos de RCD, y más concretamente de plástico, sean reutilizados en la elaboración de materiales de construcción, así se obtiene más y mejores resultados de ahorro energético, aplicación de economía circular y valorización de desechos poliméricos.

Para esta tesis, las eslingas recuperadas y utilizadas en la realización de los ensayos están compuestas por polipropileno. Al aplicar el LER la codificación de este material es la 170203. En primer nivel (17) de residuos de la construcción, para seccionar en un segundo escalón (1702) del grupo Madera, vidrio y plástico y determinar puntualmente cómo plástico con el código 170203.

## 1.4. El yeso como material de construcción

El término yeso es utilizado para indicar el mineral que contiene la base de sulfato de calcio di-hidratado, el producto obtenido por calcinación de este mineral, la pasta obtenida al mezclar el polvo calcinado del mineral con agua, así como al mortero/pasta aplicada para la unión y cubrición de elementos de tabiquería o mampostería [46] [47].

En esta tesis definiremos como:

- **Aljez:** roca sedimentaria, de estructura cristalina cuyo constituyente esencial es el sulfato de calcio di-hidratado ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )
- **Yeso en polvo:** al producto obtenido de la calcinación del aljez, molido posteriormente y comercializado tanto en sacos o a granel. Conglomerante a base de sulfato de calcio en sus distintas fases de hidratación, por ejemplo, el hemihidrato ( $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$ ) y anhidrita ( $\text{CaSO}_4$ ). Dentro de esta definición encontramos los productos que sobresalen en el mercado:

## Introducción

- **Escayola (E):** yeso en polvo con un alto índice de pureza (> 95%).
- **Yeso Grueso (YG):** yeso en polvo con índice de pureza (< 95%).
- **Morteros de yeso:** yeso para la construcción con un contenido menor al 50% de sulfato de calcio como componente activo principal. El fabricante puede añadir aditivos y áridos [48].

El sulfato de calcio hidratado con dos moléculas de agua ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) [48] o dihidrato es el componente principal del aljez. Los cristales de aljez han sido formados en las eras geológicas secundaria y terciaria debido a la evaporación de las aguas saladas retenidas en lagos y mares de las épocas geológicas antes citadas, dando lugar a estos depósitos. Las rocas formadas en estos yacimientos son denominadas rocas evaporitas [49], pudiendo encontrarse en forma de masas duras o masas blandas, otras se encuentran en masas terrosas y en algunos casos se encuentran disueltas en aguas que son definidas como “aguas selenitosas” [50].

Las rocas con contenido en aljez presentan variedad de tonos, estructura cristalina y formas de enlaces, relacionadas con la cantidad de los elementos químicos presentes en su formación. Las rocas de aljez pueden tener estructura amorfa o cristalina y de color blanco cuando no contiene cristales de otros elementos químicos.

La clasificación de las variedades aljez, en función de estructura cristalina es:

- Laminar, ver Imagen 1
- Forma de punta de lanza Fibrosa Alabastrina, ver Imagen 2.
- Ordinaria, ver Imagen 3
- Alabastro, ver Imagen 4
- Selenita; transparente e incolora, ver Imagen 5
- Sacaroide, espejuelos, rosa del desierto, etc. Ver Imagen 6



Imagen 1: Estructura laminar [51].



Imagen 2: Estructura punta de lanza [52]



Imagen 3: Estructura ordinaria [53].



Imagen 4: Variedad de roca tipo alabastro [54]



Imagen 5: Variedad de roca selenita [55]



Imagen 6: Variedad de roca, rosa del desierto [56]

Esta “roca de yeso” se encuentra regulada por la Norma UNE 102001:2014 “Aljez o piedra de yeso ” [57], norma que anula y sustituye a la Norma UNE 102001:1986 [58]. La norma anulada clasificaba a la roca en la tabla 1 en función de la cantidad del contenido mínimo de sulfato cálcico dihidrato presente en la roca de aljez y por último en la tabla 2 clasificaba de acuerdo con el tamaño de las partículas (mm) tamizadas.

La Norma UNE 102042:2014 Yesos y Escayolas de Construcción [59], en el apartado 9 establece el proceso para la “*determinación del índice de pureza*” (IP) que la roca podrá contener de sulfato de calcio de hasta el 100%. Esta norma no clasifica la roca y obliga a los fabricantes a cuantificar el IP de las rocas de aljez que se prevean utilizar en la fabricación del polvo de yeso y predeterminar el tipo de producto que podría obtener. El índice de pureza si bien puede alcanzar el 100%, es difícil que la roca a procesar contenga dicho índice de pureza, dado que, en los yacimientos yesíferos al haber evaporado el agua, quedan restos de arcillas u otros tipos de impurezas que reducirán el rendimiento del producto obtenido en la transformación de la roca en los productos previstos [60].

### 1.4.1. Composición química y sus transformaciones

La composición química del yeso en polvo está formada por algunas fases de sulfato cálcico, que, junto con agua y amasados, endurecen a través del fraguado y transforma nuevamente esta mezcla en “rehidrato” o “yeso rehidratado”. En la naturaleza se pueden encontrar dos tipos de estructuras estables de sulfato de calcio, la anhidrita natural ( $\text{CaSO}_4$ ) y el sulfato de calcio dihidratado ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) [61]. Estas fases tienen diferentes apariencias en función de su pureza y de la forma en que se crearon en la naturaleza.

Una vez identificada la materia prima a procesar y el ajustado el tamaño del árido, se ejecutan los procesos energéticos de transformación [62]. La transformación del aljez en los diferentes tipos de yeso se produce en un proceso que incorpora energía en forma de calor. Al analizar este proceso, si seleccionamos una muestra teórica con un índice de pureza (IP) del 100%, tenemos un conjunto de sulfato cálcico y dos conjuntos de agua, éstos van a tener una presencia de 20.6% de dihidrato y 79.4% de sulfato. Estos valores son determinados por el cálculo estequiométrico de los pesos moleculares de los elementos [57].

Al elevar la temperatura de la roca de la muestra seleccionada se elimina gran parte del agua ( $3/2\text{H}_2\text{O}$ ) hasta convertir la muestra en hemihidrato ( $\text{CaSO}_4 + 1/2\text{H}_2\text{O}$ ), como se ve en la Ecuación 1



Por efectos de la cocción se evapora el 75% de las moléculas de agua de cristalización del aljez. En este proceso de la deshidratación, la materia prima

utilizada deberá ser lo más homogénea posible, ya que la pésima conductividad térmica del yeso y los granos grandes de la roca se cuecen a diferente velocidad si la comparamos con rocas de granulometría uniforme [47]. Además del tamaño de los granos, en la deshidratación del aljez influyen otros factores, como la velocidad de calentamiento del horno, cantidad de impurezas, la presión externa, densidad de los granos y la agitación de la masa.

Es así como en el momento de la cocción se hallan las siguientes estructuras:

- la superficie de las rocas va a recibir calor directamente eliminando por completo el contenido de agua de esta capa, en ésta se presenta la estructura de la anhidrita.
- la capa intermedia que recibe calor, pero no logra eliminar por completo la humedad de formación y evapora el 76% de humedad estará formada por la estructura de hemihidrato.
- Además del hemihidrato, se producirá una fase de yeso llamado anhidrita III o anhidrita soluble. Esta fase tiene gran avidez de agua incluso la presente en la humedad ambiente.
- El núcleo de la roca apenas logrará calentarse y eliminar la humedad de la roca, manteniendo la estructura de dihidrato.

La mezcla de las diferentes estructuras, anhidrita, hemihidrato y dihidrato que quedan después de la cocción de la roca, determinan el tiempo de fraguado del yeso en polvo. La cantidad de las diferentes estructuras que componen la mezcla pueden ser determinadas mediante análisis químico. Esta roca una vez transformada térmicamente será mezclado, homogeneizado y molido, para empaquetado y comercialización. Las cantidades de los componentes serán las cuales van a determinar el tiempo de fraguado y cada lote tendrá una composición diferente siendo estadísticamente improbable que dos mezclas tengan exactamente el mismo porcentaje de compuestos.

#### **1.4.2. Transformaciones químicas en el proceso de deshidratación en función de la temperatura de cocción:**

La deshidratación del aljez se produce en dos fases, en la primera etapa el dihidrato se calienta entre 120°C y 180°C produciéndose hemihidrato (SH) en dos formas alotrópicas  $\alpha$  y  $\beta$  que, en función del método industrial de cocción, tendrá diferentes proporciones de éstas. Este hemihidrato en la segunda fase será calentado hasta

300 °C la cual modifica su estructura hasta llegar a anhidrita III soluble (AnIII) la cual también se encuentra presente en dos formas. Estas anhidritas que a su vez una vez calentado a 700°C se transforma en Anhidrita II (AnII) presentándose en tres tipos, y por último calentada la anhidrita II a 1180°C se transforma en anhidrita I(AnI). Estas transformaciones quedan reflejadas en la Tabla 4.

Tabla 4: Procesos energéticos de transformación [63]

Temperatura	Denominación	Formula química	Variedades
Ambiente	Aljez o piedra yeso /Dihidrato (DH)	CaSO <sub>4</sub> 2H <sub>2</sub> O	
120°C a 180°C	Hemihidrato (SH)	CaSO <sub>4</sub> 1/2H <sub>2</sub> O	SH <sub>α</sub> ,SH <sub>β</sub>
180°C a 300°C	Anhidrita soluble (AnIII)	CaSO <sub>4</sub> III	AnIII <sub>α</sub> , AnIII <sub>β</sub>
300°C a 1180°C	Anhidrita II artificial (AnII)	CaSO <sub>4</sub> II	AnII <sub>s</sub> , AnII <sub>o</sub> , AnII <sub>p</sub>
>1000°C	Anhidrita (AnI)	CaSO <sub>4</sub> I	

Las características más importantes de los compuestos químicos son:

Hemihidrato: Se muestra de dos formas: hemihidrato alfa (SH<sub>α</sub>) y hemihidrato beta (SH<sub>β</sub>), las dos conformadas con la misma proporción de agua en su estructura y que es estimada entre 6.21%y 8.05% [47]. De igual manera, ambas poseen la misma estructura romboédrica y con características micro moleculares y físicas diferentes.

El SH<sub>α</sub> se fabrica a baja presión en autoclave y se distingue por sus cristales grandes y compactos. El SH<sub>β</sub> se produce en atmósfera normal y muestra formaciones más fragmentadas. El SH<sub>β</sub> se obtiene por la deshidratación parcial del dihidrato un poco por encima de los 100°C.

La densidad real del SH es mayor que la del dihidrato (2.31 g/cm<sup>3</sup>) con 2.757 g/cm<sup>3</sup> para el SH<sub>α</sub> y 2.619 g/cm<sup>3</sup> para el SH<sub>β</sub>. El SH<sub>α</sub> es llamado yeso alfa, el cual requiere una cantidad de agua baja para su amasado (entre 30 y 40 %). Mientras que el SH<sub>β</sub> con una pureza muy alta se le conoce como “escayola” el cual requiere una cantidad de agua elevada de alrededor del 80% y ofrece materiales rehidratados más porosos que aquellos del SH<sub>α</sub>. El yeso de construcción también parte del SH<sub>β</sub> que es mezclado con otras fases y se le conoce como “yeso multifases”.

Anhidrita III o Anhidrita soluble se obtiene por la deshidratación total del DH entre 180°C y 300°C, este SH se caracteriza por tener gran avidéz de agua e inestabilidad tendiendo a convertirse en DH incluso con la simple humedad del ambiente.

De acuerdo con el SH del que procedan se dan dos formas de anhidrita III $\alpha$  (AnIII $\alpha$ ) y anhidrita III $\beta$  (AnIII $\beta$ ). Esta última se encuentra en la industria del yeso en la formulación de escayolas junto al SH $\beta$  y en los yesos de construcción con los SH $\beta$  y anhidrita II.

Anhidrita II: La anhidrita II (AnII) o insoluble se obtiene por deshidratación total del SH entre los 300°C y 1.180°C. No hay consenso entre los investigadores, pero se asume que hay tres tipos de (AnII) [64]:

- AnII<sub>s</sub>      Difícilmente soluble, que se produce entre los 300°C y los 500°C
- AnII<sub>i</sub>      Insoluble, producida entre los 500 °C y los 700°C
- AnII<sub>p</sub>      De pavimentos, más de 700°C

Aprovechando la insolubilidad de la AnII se utilizan para retardar el fraguado con otras fases en el yeso de construcción.

Anhidrita I: Se obtiene a más de 1.180°C y en la fabricación le dan poca importancia industrial. Por encima de los 1.400°C se rompe en enlace iónico del sulfato cálcico y la anhidrita se descompone en óxido de cal y anhídrido sulfúrico. El uso de ésta se limita como yeso de pavimentos cuando el mineral tiene impurezas que permiten disminuir la temperatura de disociación hasta 700°C donde es una mezcla sólida de óxido de cal y AnII.

En este estudio se ha utilizado el yeso de construcción YG (B1) y la escayola (A/E-35). A continuación, se describe la diferencia entre ambos materiales:

- Yeso de construcción o bifase (mezcla de AnIII y AnII) para obtener este tipo de yeso es necesario que el aljez utilizado tenga al menos el 75% de DH, clasificado como clase II según norma UNE 102001:2014 [57]. Esta variedad de yeso por lo general es producida por un sistema de fabricación conjunto, es decir, en un solo horno se producen SH, AnIII y AnII. Estas anhidritas son procesadas de acuerdo con las temperaturas de calcinación propias de la tipología y posteriormente son mezcladas en una proporción de 1 de AnII y 3 de AnIII. La mezcla obtenida de estas anhidritas en su granulometría

adecuada y homogénea será molida hasta los límites establecidos en norma, envasados en sacos o provistos en silos.

- Escayola. Para producir este tipo de yeso, en la norma sustituida se establecía que el aljez necesario debía tener una clasificación de al menos tipo I de la norma (UNE 102001). Este es un yeso de alto contenido de DH, al menos del 95% aunque en la normativa actual no se encuentre esta determinación y requerimientos se hace imprescindible el establecer esos límites sin que se deba cumplir ninguna norma vigente. Para la fabricación de la escayola se utilizará normalmente dos sistemas de fabricación:
  - Fuego indirecto y carga intermitente
  - Horno rotatorio con fuego directo y carga continua.

### 1.4.3. Normativa de yesos para la construcción

La Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR) es la entidad rectora y encargada de normar y regular los requisitos, materiales y demás aspectos referentes a los yesos.

La norma que caracteriza al aljez o piedra de yeso es la Norma UNE 102001: 2014 [57], la cual define y caracteriza desde la composición, tamaño de partícula, humedad y cuerpos extraños que pueden existir en las rocas extraídas y que serán utilizadas en la fabricación del yeso o escayola; define la toma de muestras del lote y culmina con el muestreo en función del tamaño de envío y del tamaño de la piedra.

La normativa referente a los yesos de construcción y conglomerados a base de yeso para la construcción está dividida en dos partes, adicionalmente, existe la norma que amplía los ensayos que pueden ser realizados a los yesos utilizados.

- UNE-EN 13279-1:2009 [48]
- UNE-EN 13279-2:2014 [65]
- UNE 102042:2024 Yesos y escayolas. Otros métodos de ensayo [66]

En la Norma UNE-EN 13279-1:2009 se establecen las definiciones y especificaciones del yeso, mientras que en la segunda parte (UNE-EN 13279-2:2014) se establecen los ensayos que deberán ser realizados a los yesos en función de la clasificación y uso que se vaya a dar en la construcción.

En la Figura 9 de la norma UNE-EN 13279-1:2009 muestra las familias de los yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción.

Es así como la escayola (E35) es identificada como A, pudiendo clasificarse como A1, A2 o A3 y el yeso de construcción (YG) es identificado como B1. Esta Tabla 5, indica los tipos de conglomerantes a base de yeso y clasifica el material que será utilizado en este estudio.

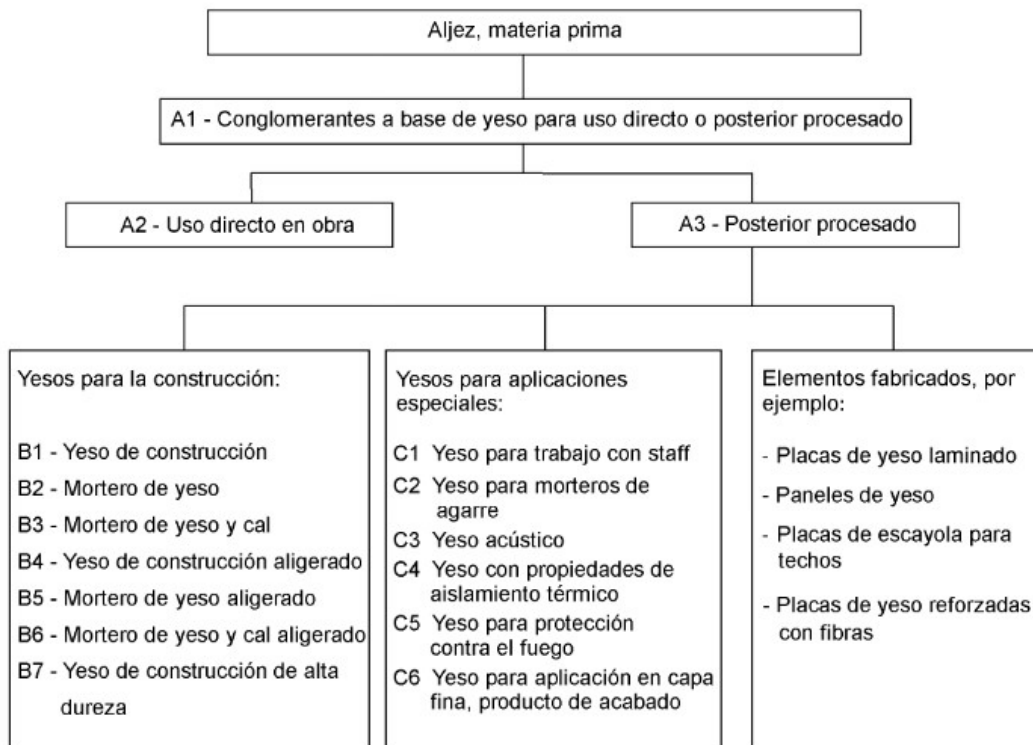


Figura 9: Familia de los yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso de la construcción. Fuente: UNE-EN 13279-1:2009 [48].

Tabla 5 Tipos de conglomerantes a base de yeso y de yesos para la construcción. Fuente: UNE-EN13279-1:2009 [48].

Designación	Justificación
Conglomerantes a base de yeso*, por ejemplo:	A
– Para uso directo o para su transformación (productos en polvo, secos);	A1
– Para uso directo en obra;	A2
– Para su transformación (por ejemplo, en paneles de yeso, en placas de yeso laminado, en placas de escayola para techos).	A3
Yeso para la construcción:	B
– Yeso de construcción;	B1
– Mortero de yeso;	B2
– Mortero de yeso y cal;	B3
– Yeso de construcción aligerado;	B4
– Mortero de yeso aligerado;	B5
– Mortero de yeso y cal aligerado;	B6
– Yeso de construcción alta dureza.	B7
Yeso para aplicaciones especiales:	C
– Yeso para trabajos con staff;	C1
– Yeso para morteros de agarre;	C2
– Yeso acústico;	C3
– Yeso acústico;	C4
– Yeso con propiedades contra el fuego;	C5
– Yeso para la aplicación en capa fina, producto acabado	C6
– Producto de acabado	C7

Los requisitos que deben cumplir los yesos están recogidos en la Tabla 6 correspondiente de la normativa vigente [48].

Tabla 6: Especificaciones para los yesos de construcción. Fuente: UNE-EN13279-1:2009 [48].

Yeso para la construcción	Contenido en conglomerante de yeso %	Tiempo de principio de fraguado min.		Resistencia flexión N.mm <sup>-2</sup>	Resistencia compresión N.mm <sup>-2</sup>	Adherencia N. mm <sup>-2</sup>
		Aplicación manual	Proyección mecánica			
B1	>50	>20 <sup>b</sup>	>50	>1.0	>2.0	La rotura se produce en el soporte o en la masa del yeso: cuando la rotura aparece en la interfaz yeso-soporte, el valor debe ser 0.1.

<sup>b</sup> En algunas aplicaciones manuales se permite un valor menor que 20min. En ese caso, el productor debe declarar el tiempo de principio de fraguado.

La parte dos de la norma UNE-EN-13279 establece los diferentes tipos de ensayos para los yesos de construcción y cubre las características más importantes referentes a características físicas y mecánicas.

La norma que enmarca las especificaciones referentes a las escayolas es la UNE-102011:2013 [67]. En esta Norma se establecen las especificaciones que deberán cumplir los yesos y escayolas. En la Tabla 7 se establece el índice de pureza mínimo para ser considerado escayola, dentro de las tres categorías clasificadas.

Tabla 7: Índice de pureza. Fuente: UNE 102011:2013 [67].

Tipo de escayola	Índice de pureza
Escayola E 35	≥92%
Escayola E 30	≥90%
Escayola E 30P	≥87%

La Tabla 8 especifica la clasificación de las escayolas en función de la cantidad de finos que se recoja en el tamiz 0.8mm.

Tabla 8: Porcentaje de residuos en tamiz. Fuente: UNE 102011:2013 [67]

Nomenclatura	Porcentaje de residuos en tamiz	
Escayola E 35	Tamiz 0.8 mm;	0%
	Tamiz 0.2 mm;	1%
Escayola E 30	Tamiz 0.8 mm;	0%
	Tamiz 0.2 mm;	5%
Escayola E 30P	Tamiz 0.8 mm;	0%
	Tamiz 0.2 mm;	30%

#### 1.4.4. Producción nacional de yeso

En el año 2020 la producción mundial de yeso fue cuantificada en 161.9 millones de toneladas. España es uno de los países que produce más cantidad de yeso con el 8.37% de esta producción y corresponde a 13.54 millones de toneladas [68], tal como se observa en la Figura 10.

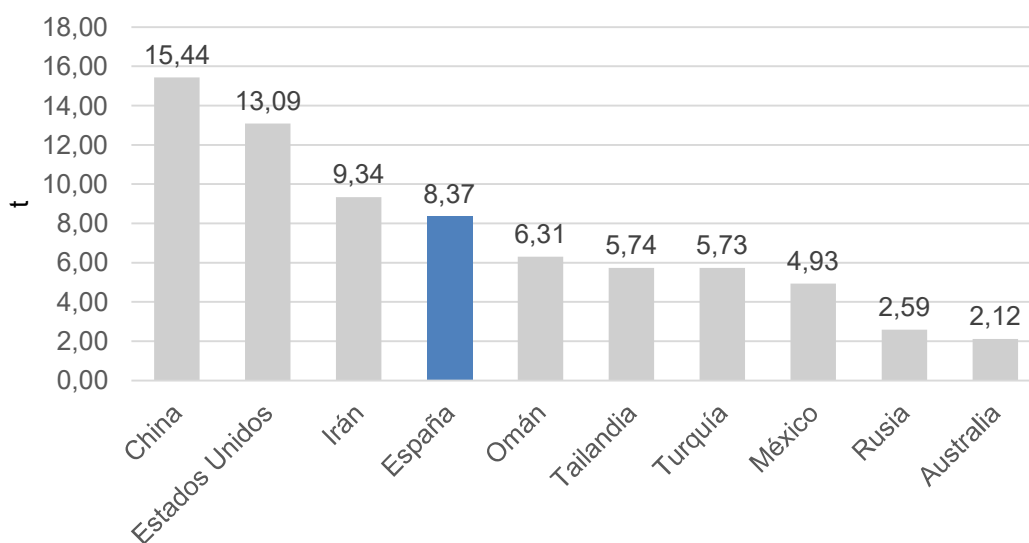


Figura 10: Producción mundial de yeso 2020 [68]

En el 2020, España ha incrementado la producción de yeso y actualmente se sitúa en la cuarta posición a nivel mundial. A nivel europeo es el país que más genera productos de yeso en polvo y productos relacionados con éste. La producción mundial de productos relacionados de yeso en polvo ha tenido una tendencia creciente en el último lustro.

España muestra en el año 2020 un incremento de 51.57% con respecto a la producción del año 2016 [68] mostrando de igual manera un incremento del 20.08% con respecto al año 2019.

El ministerio de transición ecológica cuantifica en el apartado “Producción de productos de cantera en el año 2019” que la producción de yeso en polvo representa el 8% de los productos con origen en canteras [69]. El monto económico que representa esta actividad se estima en torno a 77.65 millones de euros, colocándose la extracción de yeso únicamente detrás de piedras calizas, grava y arena que son destinados en su mayoría a la elaboración del hormigón, estos montos refuerzan la importancia de la industria yesífera en España, apoyados en el sector fuerte de la construcción.

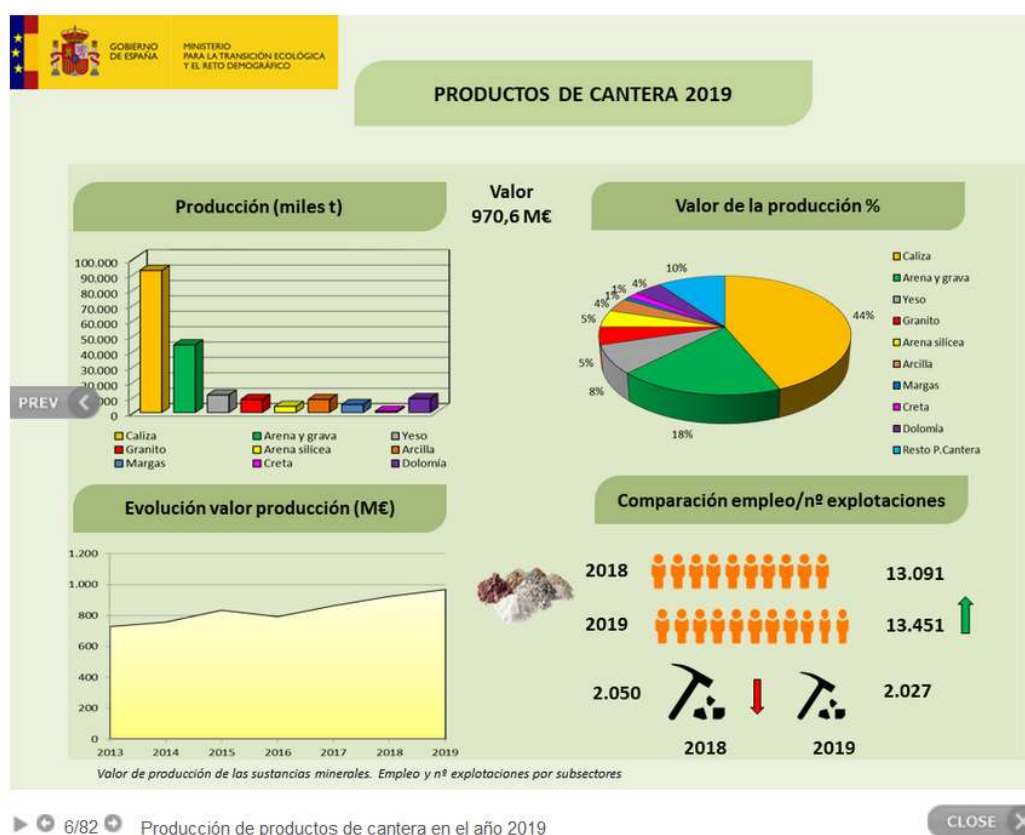


Figura 11: Producción de productos de cantera en el año 2019 [69]

## 2. Estado de la cuestión

Para el análisis del estado de la cuestión, se han revisado varios estudios donde se incorporan diversas adiciones buscando mejorar algunas de las cualidades y propiedades físico-mecánicas del yeso/escayola. El análisis de esta documentación se resume en que existen tres campos comunes de estudio: reducción de densidad con el consiguiente incremento en la resistividad térmica, mejora de propiedades mecánicas mediante la incorporación de fibras y la incorporación de RCD como materia prima alternativa para la fabricación de materiales de construcción.

### 2.1. Estudios previos para disminuir la densidad de los yesos

La disminución de la densidad ha sido analizada por varios estudios como por ejemplo; Serhat y Kahraman [70] estudian las modificaciones de las propiedades de los elementos de construcción de yeso mediante la adición de gránulos de macroporo de sílice expandida, en la cual son añadidos 5%, 10% y 15% de masa. La resistencia a flexión muestra una relación inversa a los porcentajes de gránulos de sílice añadidos con reducciones de 14%, 26% y 55% con respecto a la muestra de referencia, mientras que la resistencia a compresión muestra un menor porcentaje de reducción, del 4%, 15% y 26% respectivamente. La incorporación de gránulos expandidos de sílice mejora la resistividad térmica en 19%, 32% y 48%. Concluye que la adición de sílice expandida mejora algunas características y que es un proceso controlable mediante la incorporación de gránulos de sílice espumado.

Hernández-Olivares et al. [71] desarrolla compuestos de yeso-corcho para aplicaciones en la construcción, en la que incorpora corcho como aditivo del yeso al 20 % y lo refuerza con fibras de vidrio de 25mm de longitud en 2% de masa. La utilización del corcho es tomada en cuenta con 2 tipos de corcho recogida en invierno, recogida en verano. Estas mezclas son analizadas con relación agua/yeso de 0,6 y 0,8. Este estudio concluye que la compatibilidad entre el corcho y el yeso es muy buena al haber realizado los ensayos de microscopio de barrido, mientras que los valores de los ensayos mecánicos no son tan prometedores, encontrando decrementos de las resistencias a flexión y a compresión. La incorporación de fibras de vidrio mejora las resistencias mecánicas tanto a flexión como a compresión. La densidad de estos compuestos se ve reducida hasta en un 33%, lo que le otorga una mejor resistencia térmica que se ve traducida en compuestos de yeso aislantes térmicos.

Garcia Santos [72] estudia la incorporación de fibras de polipropileno comercial y esferas de poliestireno expandido como elemento aligerante al 0.5%, 1%, 1.5% y 2% que compara con una muestra de referencia sin adiciones. En este caso la incorporación únicamente de fibras tiene mejores resultados, mientras que al incorporar poliestireno expandido las resistencias se ven reducidas de manera proporcional al porcentaje. Al incrementar los porcentajes de fibras, las resistencias a flexión mejoran hasta el 250.74% en las series sin poliestireno expandido, mientras que la resistencia a compresión tiene un incremento lineal a los porcentajes añadidos, a excepción de la serie con solo incorporación de fibras, que tiene una reducción hasta del 22,39% con respecto a la referencia. Concluye que esta combinación carece de rotura frágil y que en el momento de rotura no existe la caída de material. Existe un incremento de resistencia a flexión de hasta el 22.77%. La densidad de las muestras se reduce hasta en 50.88%.

Del Río [73] estudia el comportamiento de la escayola E-35 con la incorporación de arcilla expandida al 60% y la incorporación de 1% de fibra, también incorpora perlita al 20% y fibra de vidrio al 1%, vermiculita al 20%, comparando con la incorporación de 0.5% de MELMENT (superplastificante) y 1% de fibra de vidrio, incorpora también esferas de poliestireno expandido al 3%, 0.5% de melment y 1% y 2% de fibra de vidrio. Las principales conclusiones a las que llega es que la rotura de las probetas con algún tipo de adición, no presentan rotura frágil, manteniendo la cohesión entre las superficies de rotura. La disminución de la relación  $A/Y$  conlleva a un aumento de peso, así como las resistencias a compresión y flexión. La incorporación de fibras mejora la tenacidad de las muestras e incrementa las resistencias respecto a muestras iguales sin incorporación.

Zihao et al. [74] estudia la incorporación de tres diferentes agregados de bajo peso al yeso, restos de cerámica, perlita expandida, y partículas de poliestireno. Estas han sido mezcladas en proporciones de 0%-80% de manera individual. En el análisis de la relación de la densidad y la resistencia a compresión, se puede observar de una manera clara cómo a más densidad, mayor resistencia a compresión desarrolla y así también se determina que el agregado que da mejores resistencias es la arena de cerámica, seguido por la perlita expandida y por último las partículas de poliestireno expandido, mientras que el material con menor transmisión térmica es el que incorpora las partículas de poliestireno expandido.

En general, estos estudios concluyen que la incorporación de elementos aligerados o de baja densidad, supone una reducción de la densidad de los morteros de yeso y/o escayola, que con una relación inversa reduce las propiedades mecánicas y

físicas de estos morteros. Estos morteros aligerados pueden ser aplicados en materiales de construcción ligeros y con un coeficiente de conductividad térmica muy bajo.

## **2.2. Estudios previos para mejorar las propiedades mecánicas de los yesos mediante la adición de fibras**

La mejora de la resistencia mecánica, en especial de la flexión, ha sido investigada en estudios de diferentes autores que han incorporado diferentes tipos de fibras, tanto naturales como artificiales.

### **2.2.1. Estudios que incorporan fibras naturales**

En los morteros de yeso y escayola, dentro de las adiciones de fibras naturales podemos destacar los estudios realizados con fibras de sisal por parte de Oteiza [75], que incorpora fibras de sisal de 30mm y 40mm de longitud en porcentajes de 1%, 1.5% y 2%. Este estudio determina que la longitud crítica es de 40mm de longitud. La resistencia a flexión incrementa en 20% con la adición del 2% de fibras de 40mm de longitud, así también mejora hasta en un 200% la tenacidad de los compuestos al incrementar la longitud de la fibra, adicionalmente la capacidad de absorción de energía registra un incremento del 100% al incrementar 1% de fibra de 20mm de longitud. Por otra parte, Fonseca et al. [76] estudia la impresión en 3D de escayola reforzada con fibras de sisal donde determina que el incremento de porosidad de las probetas está relacionado de manera lineal con respecto a la incorporación de fibras, adicionalmente existe un amplio rango de variación de la resistencia a flexión con relación a la dirección de disposición de las fibras. Adicionalmente la investigación de Iucolano et al. [77] documenta el estudio de la sustitución de las fibras de vidrio por fibras sisal o cáñamo en diferentes porcentajes de adiciones. Este estudio registra el incremento de hasta el 90% de resistencia a flexión así también la resistencia de penetración por impacto se ve incrementada significativamente.

La incorporación de fibras de sisal incrementa las resistencias de flexión de las probetas estudiadas, así como la tenacidad del material, mientras que la porosidad del material también se ve incrementada con relación directa. La orientación de

las fibras, así como el tamaño de las fibras también influyen en las características mecánicas.

Otro tipo de fibra natural que se ha investigado es la fibra de cáñamo:

- En un estudio posterior de Iucolano et al. [78], investiga el comportamiento termo mecánico de morteros reforzados con fibras de cáñamo evidencia que las fibras de cáñamo evitan el colapso de los morteros de yeso es así como después de 20 minutos a 150°C, los morteros reforzados con fibras sufren una reducción del 38% de la resistencia a flexión frente al 65% de morteros de yeso sin refuerzos de fibras.
- Boccarusso et al. [79] continua con la investigación de Iucolano F. y dispone retículas de fibras de cáñamo variando la separación de las cuadrículas y diámetro de los tejidos en la matriz de yeso en una sola malla o en capas separadas verticalmente. Adicionalmente, estos compuestos son comparados entre fibras impregnadas con bioepoxi y sin tratamiento alguno. Al ensayar a flexión, se demuestra que la adherencia de las fibras tratadas con bioepoxi llega a ser hasta 7 veces más que las fibras no tratadas. En los ensayos de penetración por impacto, los compuestos con una malla absorben hasta 31.47J de energía mientras que los compuestos con dos mallas paralelas absorben hasta 39.72J. Boccarusso concluye también que la aplicación de bioepoxi afecta al comportamiento elástico de los compuestos debido a la reducción de la energía de impacto.
- Awang et al. [80] estudia la incorporación de fibras de cáñamo (hessian) en mallas dispuestas de una a tres capas de tejido de arpillera, así como la incorporación de fibras de vidrio en el refuerzo de morteros de yeso. La resistencia a flexión se reduce en 28.2% al incorporar dos capas de tejido de arpillera, 8.7% al incorporar 2 capas de fibra de vidrio y por último 7.5% de decremento al incorporar tejido de fibra de vidrio en cuatro ejes con respecto a la referencia. La incorporación de malla con rejilla mas tupida presenta una reducción del 35.1% con respecto a la referencia, lo que significa 5.2% menor que la malla con rejilla más separada, lo que indica que la adherencia entre yeso y los filamentos de fibras es mejor mientras más separadas se encuentren.

La adición de otros materiales aligerantes han sido estudiados por Zhang et al. [81] prepara y estudia los materiales almacenadores de energía a base de morteros de yeso con la adición de perlita expandida con la incorporación del 65% de masa de

## Estado de la cuestión

la mezcla de ácidos cáprico (85%) y palmítico (15%) con muestras con porcentajes de hasta el 40% de adición. Las resistencias de compresión y flexión se ven reducidas considerablemente y de manera exponencial al porcentaje incorporado. La resistencia a compresión se ve reducida hasta el 59.6% en comparación con la referencia mientras que la reducción de la resistencia a flexión es hasta el 44%. En cuanto al estudio térmico, la incorporación de perlita expansiva Zhang concluye que existe un incremento en la conductividad térmica de los compuestos, mientras que una vez incorporada la mezcla de ácidos, la conductividad térmica se ve reducida en hasta el 16.03% y concluye que la capacidad de almacenamiento de energía del panel de yeso será mayor mientras más alto es el contenido de volumen del compuesto de ácidos así como menor la fluctuación de la temperatura dentro del sistema donde realiza el ensayo. También tenemos el estudio de Zak et al. [82] estudia la influencia de las fibras naturales de refuerzo en la resistencia de material de ladrillos de tierra, yeso y cemento a la compresión, donde incorpora fibras de linaza en 1% y 3% así como la incorporación de fibras de cáñamo al 1% y 3%. La resistencia a compresión de las muestras con fibras de linaza varía de manera imperceptible, mientras que, al incorporar fibras de cáñamo, la resistencia a compresión se ve reducida en un 22.72%. Las conclusiones a las que llega Zak es que la presencia excesiva de agua en la mezcla presenta mayor porosidad. La adición de yeso en estos morteros no presenta variación de resistencias en comparación con las probetas de referencia y la incorporación del yeso dificulta su utilización debido al tiempo de fraguado de éste. No menos importante Braiek et al. [83] en su estimación de las propiedades termo físicas de compuestos de yeso con fibras de palma datilera para uso de materiales en edificación, concluye que existe un incremento destacado de las propiedades térmicas de los compuestos en detrimento de las propiedades mecánicas como la resistencia a flexión y compresión. El valor más destacable en este estudio es el que al añadir el 20% de fibra de la palma datilera, la conductividad térmica se ve reducida a  $\lambda=0.17\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$ . esta reducción de la conductividad es esperada, dado que las fibras de palma datilera tienen un valor de  $\lambda=0.083\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$  la cual es menor que el presentado por las muestras de yeso utilizado.

materiales aislantes, lo que permitiría el uso de estos compuestos como material aislante.

### **2.2.2. Incorporación de fibras de vidrio**

Rovero et al. [84] investiga analítica y experimentalmente el comportamiento de adherencia de los compuestos con matriz de yeso y cemento reforzados con fibra de vidrio, en el cual, incorpora tejido de fibra de vidrio en una capa y ensaya las muestras a tracción. La investigación contempla tres longitudes de solape de las fibras en la matriz de yeso, 150. 200 y 250mm. Los supuestos empleados no interpretan completamente la respuesta post-elástica que se caracteriza por deslizamientos mas prolongados y unión más rígida, lo que sugiere asumir un modelo diferente para este modelo.

Martias et al. [85] estudia los efectos de la adición de fibra de vidrio, mica y vermiculita en las propiedades mecánicas de un compuesto a base de yeso a temperatura ambiente y durante ensayo de fuego, en la que adiciona dos tipos de fibra de vidrio E y AR, al 1% de fibras, estas con características mecánicas idénticas e incorpora también vermiculita del 3-5-6-7% y mica al 5-10%, con estas combinaciones determina que la deformación tiene relación directa con el incremento de los porcentajes de fibra y que la fractura frágil de la matriz pasa a ser pseudo-dúctil en función del porcentaje de fibras añadidas. El módulo de Young de la matriz decrece y concuerda con los valores teóricos realizados, adicionalmente la incorporación de vermiculita reduce el módulo de Young, así como la densidad de los compuestos, la cual obtiene el valor de 1000kg/m<sup>3</sup> al incorporar 5% de vermiculita.

La adición de fibra de vidrio a los morteros de yeso y escayola presenta un incremento muy pequeño en las resistencias mecánicas especialmente a la deformación en los ensayos de flexión y disminuyendo la adherencia a los soportes de manera significativa.

### **2.2.3. Incorporación de fibras poliméricas**

Los estudios que incorporan fibras poliméricas en una matriz de yeso se centran fundamentalmente en fibras de polipropileno, textiles, de poliamida y policarbonato. A continuación, analizamos los estudios de polipropileno:

## Estado de la cuestión

Durgun [86] estudia los efectos de los ciclos de humectación-secado en morteros de yesos con incorporación de piedra pómez (0-30%), ceniza volante (10%) y fibras de polipropileno (0.5-1%). En este estudio determina que la velocidad de los ultrasonidos es inversamente proporcional a la incorporación de la piedra pómez, donde la reducción de la velocidad representa el 15.95% comparada con la muestra de referencia. La relación entre absorción de agua y la porosidad aparente es proporcional a los porcentajes de adición, mientras que la relación entre velocidad de ultrasonidos y porosidad aparente es inversa con el coeficiente de determinación de 0.8998. Después del ciclo mojado-secado, la resistencia a compresión se reduce drásticamente desde el 25.26% en la muestra de referencia hasta el 27.27%, en la muestra con 30% de piedra pómez y 1% de fibra (P30/1). La incorporación de fibras es inversamente proporcional al peso de las muestras, es así que al añadir el 0.5% de fibras se reduce el peso en 0.8% y la incorporación del 1% de fibras, representa 1.6% de reducción de peso de las muestras. Esta relación guarda la tendencia en cada uno de los porcentajes de fibras añadidos a las muestras ensayadas. Esta relación inversamente proporcional es mantenida en los resultados de los ensayos de velocidad de pulso de ultrasonidos, resistencia a compresión, mientras que en los ensayos de resistencia a flexión esta relación es menos estable y los valores presentan una tendencia variable. La caracterización de este estudio representa la reducción de los valores de los ensayos realizados en las muestras que han sido aplicados los ciclos de humedecimiento /secado. Se observa que la pérdida de peso de las muestras es mayor mientras menos fibra se adiciona con la misma relación que la porosidad aparente. La resistencia a compresión de las muestras aplicadas el ciclo de humedecimiento/secado presenta relación directa con la cantidad de fibras incorporadas, lo que lleva una mejora de esta resistencia hasta el 10% comparadas las muestras de referencia con las muestras con incorporación del 1% de las fibras, así como la conductividad térmica se ve incrementada de manera proporcional hasta el 9.5% en relación con las muestras sin adición de fibras.

Flores Medina y Barbero-Barrera [87] incorporan fibras de polipropileno junto con grafito isostático (IGF) y determinan que existe una relación directa entre las incorporación de aditivos y el incremento de las resistencias mecánicas la densidad y la conductividad térmica, donde también se observa la reducción de la porosidad y la absorción de agua.

Vasconcelos et al. [88] evalúan el desempeño del material compuesto de yeso y corcho al incorporar fibras textiles recicladas de polipropileno y el uso de cítrico y bórax como retardantes de fraguado. Este estudio incorpora corcho expandido en proporciones de 5% y 7% procedente de la industria paneles aglomerados de corcho negro, con valores de resistencia térmica cercanos al poliestireno expandido o arcilla expandida con granulometría de 2-4mm. Las fibras textiles recicladas provienen de la industria de reciclado de neumáticos y poseen diámetros comprendidas entre  $7.2\mu\text{m}$  y  $34.1\mu\text{m}$  y longitudes entre  $108.2\mu\text{m}$  y  $12469.1\mu\text{m}$  y se agregas entre el 1% y 3%. Al relacionar la velocidad del pulso ultrasónico (VPU) con el módulo de elasticidad, la resistencia a compresión así como con la densidad, se puede observar que guardan una relación directa entre ellas mientras que al analizar el comportamiento debido a la incorporación de los materiales, podemos observar: la resistencia a compresión está relacionada directamente con la densidad; la mayor incorporación de corcho reduce los valores del módulo elástico, así como los valores de la resistencia a compresión. La incorporación de fibras a las probetas con incorporación de 7% de corcho parece disminuir el módulo de elasticidad y por último la incorporación de fibras textiles recicladas, mejora la ductilidad de las probetas.

Romero-Gómez et al. [89] caracterizan los compuestos de yeso con fibras de polipropileno con origen de toallitas húmedas no degradables. El tejido de las toallas húmedas es recortado en anchos cercanos a los 2mm de ancho y longitudes de 15mm a 30mm, estas fibras son añadidas en porcentajes de 2 a 3.5% a la base de yeso grueso con una relación agua yeso de 0.55 y realiza 2 series de probetas para cada mezcla. La incorporación de las fibras reduce la densidad de las muestras en menos del 0.91% en el mayor porcentaje de incorporación, mientras que la resistencia a flexión tiene una relación directa al incorporar 2 y 2.5% de fibras, mientras que al incorporar 3 y 3.5% de fibras la relación es inversamente proporcional, llegando a existir un decremento en la resistencia a flexión de 8.3%. La resistencia a compresión presenta una relación inversamente proporcional en todas las muestras, llegando a una reducción del 61.53%. El análisis electrónico de barrido confirma la formación de cristales alrededor del tejido y su buena adherencia a las fibras, con variación de la tipología de cristales formados en la incorporación de fibras.

Deng y Furuno [90], estudian las propiedades de los paneles de partículas reforzados con fibras de polipropileno condicionadas con la cantidad de fibras así como la longitud de éstas. La longitud de las fibras utilizadas son 3, 6, 9 y 12mm, las cuales se incorporan en proporciones de 3, 6, 9, 12 y 15% con respecto al peso. La mezcla utilizada en este estudio tiene una relación de yeso madera 0.25 y la relación A/Y es de 0.35, valor muy alejado de los utilizados generalmente en morteros. Los resultados de la resistencia a flexión de la placa indican que las fibras de 3mm reflejan mejores resultados al incorporar 9% de fibras junto con fibras de 12mm al 12%. Igualmente se determina que el máximo porcentaje de fibras que puede ser incrementado es 12% en fibras de 6 y 9mm y que al incorporar 15% de fibras la resistencia a compresión presenta una menor efectividad. Al relacionar el incremento de volumen con el tamaño de las fibras se establece que las muestras con las fibras más cortas generan una hinchazón mayor que las muestras que tienen fibras más largas.

Parres et al. [91] analizan las propiedades mecánicas de morteros reforzados con fibras y microfibras de polipropileno obtenidas de ruedas trituradas. Para ello compara fibras comerciales de poliamida y fibras recicladas. El tamaño de las fibras comerciales es de 6mm y las fibras recicladas están en el rango de 0.2 -7mm. A la mezcla con relación A/Y 0.8 se le incorporan fibras de 1, 2, 3 y 4%. Tanto la resistencia a flexión, cómo la de compresión en las probetas muestran valores mayores en aquellas probetas que han sido añadidas fibras recicladas, especialmente a mayor cantidad de fibras incorporadas. Este estudio estima que el tiempo que toma en la separación de fibras es un impedimento para la reutilización de estas fibras recuperadas.

Suarez et al. [92] analiza el comportamiento de la fractura de yesos reforzados con micro y macro fibras poliméricas, donde incorpora fibras de polipropileno de 12mm (“microfibra”), fibras de poliolefina de 48mm y fibras de poliolefina enlazadas de 24, 48 y 60mm de longitud, en porcentajes de 5 y 10% de adición en la mezcla con relación 0.63 de agua yeso. Los datos obtenidos muestran que la trabajabilidad de la mezcla con fibras de polipropileno es menor que las fibras más largas dado que el número de fibras incorporadas es mayor. El diagrama de carga de los ensayos realizados muestra como la incorporación de las fibras de mayor longitud presenta mejores resultados de la resistencia a flexión una vez que ha llegado al punto de

rotura. La tipología de las fibras modifica el comportamiento de la rotura de las probetas ensayados, es así que, para las microfibras, el acabado es más uniforme, mientras que, para las fibras de poliolefina en las dos tipologías, la rotura es más irregular. El uso de microfibras mejora el confinamiento de la matriz y evita que el pico de carga de rotura descienda bruscamente.

Por último, los materiales poliméricos analizados por Pedreño et al. [93] incorpora también los residuos de policarbonato cómo agregado en morteros de yeso e incorpora residuos de yeso laminado sin proceso térmico en forma parcial al 50% e incorporación total de estos residuos con una relación agua/yeso de 0.55. La densidad muestra una relación inversa con la cantidad de residuos de policarbonato incorporados llegando a ser hasta 24.5% menor que las probetas de referencia. Los valores de la resistencia a flexión muestran cómo existe un ligero incremento al incorporar 10 % de residuos de policarbonato en las 3 combinaciones, yeso solo, 50% y 100% de agregado de yeso laminado. La incorporación de 50% de residuos de yeso laminado tiene peor comportamiento que las muestras con incorporación del 100% de éstos. Según los datos analizados, la incorporación del 100% de residuos de yeso laminado tiene un mejor comportamiento que las muestras con yeso grueso de primer uso. La resistencia a compresión presenta mejores resultados al incrementar residuos de policarbonato para mezclas de yeso sin adiciones de residuos de yeso laminado y muestras con solo residuos de yeso laminado mientras que la combinación de yeso, residuos de policarbonato al 10% y 20% poseen mejoras en la resistencia, las combinaciones con el 30% y 40% presentan descensos en la resistencia a compresión. Las imágenes del escáner de barrido muestran que la adherencia entre el policarbonato y la matriz de yeso no es significativa.

Por otra parte Eve et al. [94] incorporan fibras de poliamida con diámetros comprendidos entre 15 y 40  $\mu\text{m}$  y longitudes de 1.2, 6 y 12mm en porcentajes añadidos de 0.1, 0.2, 0.5, 1, 2 y 5% . La relación agua yeso utilizada es de 0.68 (A/Y). Los resultados obtenidos muestran una relación inversa entre la resistencia a flexión con el porcentaje de fibras incorporadas obteniendo un valor atípico al incorporar el 4% de fibras de 6mm. Los valores de la resistencia a compresión muestran una relación inversa mayor con la concentración de fibras, donde se obtienen los peores resultados al incorporar 5% de fibras poliméricas en las probetas . Así también determina que la dispersión de las fibras en toda la matriz de las probetas facilita la absorción de agua por medio de los filamentos y poros cercanos a éstas. Por último, la incorporación de fibras disminuye el módulo de

Young en las resistencias a flexión y compresión mientras se incrementa el porcentaje de fibras.

La adición de fibras de polipropileno en morteros de yeso y escayola ha sido estudiada generalmente con fibras comerciales y en pocas ocasiones fibras recicladas procedentes de neumáticos desechados. Los resultados obtenidos muestran un incremento de las propiedades mecánicas estudiadas, mientras que existe una reducción de la masa al incorporar de manera uniforme materiales aligerantes. La aplicación de fibras textiles de polipropileno procedentes de neumáticos o de toallitas húmedas presentan una relación inversa con la densidad del producto y generan decremento de las características mecánicas.

De manera similar, la adición de otros polímeros como el policarbonato o poliamidas muestran una relación inversa con la resistencia a flexión y la incorporación de estas fibras, así también con el módulo de Young.

En estos trabajos, se ha observado que el incremento máximo de fibras que presenta un aumento en las resistencias mecánicas y que mantiene una trabajabilidad adecuada es del 4%. Al incrementar este porcentaje de fibras, la trabajabilidad de la masa se ve reducido y las resistencias presentan variación en los resultados.

### **2.3. Estudios que promueven una economía circular a través de la incorporación de RCD en yeso**

Existen estudios con incorporación de residuos de construcción y demolición de diferente origen, como lo son; madera, aislamientos térmicos, fibras minerales, cubrición de cables eléctricos, textiles, yeso, etc., los cuales son resumidos a continuación.

Villoria et al. [95] incorpora residuos de cerámica, hormigón y residuos de poliestireno expandido en porcentajes de 25%, 50% y 75% respectivamente, en este estudio se observa que al incorporar los residuos, la dureza superficial tiene una relación directa con la incorporación de todos los residuos en especial con la mezcla uniforme (50% MIX) de residuos. Existe una correlación directa entre la densidad

y la resistencia a compresión, en este caso la probeta con mejores prestaciones corresponde a la incorporación de 75% de residuos de cerámica. Estos compuestos entregan ventajas directas tanto en la resistencia mecánica como en la resistencia térmica comparado con la probeta de referencia.

Alameda et al. [96] caracterizan placas de yeso con residuos de espuma de poliuretano y reforzados con fibras de polipropileno de 12mm de longitud, donde compara placas comerciales con placas con residuos y placas con residuos y reforzadas con fibras de polipropileno al 2 y 4%. Los resultados demuestran que la mejora de la resistencia a flexión al incorporar fibras es mínima, la resistencia a flexión tiene una relación inversa con la cantidad de residuos de poliuretano que sean incorporados en la mezcla, así también se observa que las fibras si mejoran la resistencia de flexión en las probetas que incorporan los residuos de poliuretano, no obstante, al incrementar más residuos, esta tendencia se ve modificada y la resistencia disminuye al incorporar 2% de fibras. La absorción de agua en las probetas se ve incrementada en función de la cantidad de fibras que son agregadas a las mezclas.

Del Río et al. [97] realizan el estudio preliminar de la incorporación de residuos cerámicos en morteros de yeso. Los residuos cerámicos proceden seis orígenes diferentes, ya sea de obra nueva, rehabilitación o de fábrica, así como el tipo de cocción de la cerámica que haya sido aplicada en los diferentes tipos de ladrillos y han sido incorporados en relaciones de 25, 50 y 75% del peso del yeso, los mismos que tienen dos granulometrías diferentes. El mayor porcentaje de residuos cerámicos que puede ser añadido a las mezclas es 25%. El tiempo de fraguado ha sido modificado hasta en 40% menos de tiempo debido a las partículas finas de la cerámica que absorben la humedad de la mezcla. La capacidad de absorción de agua por capilaridad ha disminuido al incorporar residuos de cerámica. La incorporación de residuos de fábrica de ladrillo con enfoscado de yeso debe ser descartada en los nuevos morteros de yeso o escayola. En función del origen de los residuos cerámicos, pueden ser incorporados hasta el 75% de la masa. La trabajabilidad de las mezclas es mejor con granulometría fina que con granulometría gruesa. Los mejores resultados de los ensayos corresponden con los residuos de ladrillo cerámico perforado con origen en obra nueva de construcción, sin restos de yeso o cemento.

Del Río et al. [98], estudian la incorporación de residuos de construcción y demolición de tipo cerámico para nuevos materiales de construcción sostenibles en los cuales introduce residuos procedentes de fábrica y obra. Determina que las muestras que contienen residuos cerámicos de fábrica necesitan más agua de amasado. Los compuestos con granulometrías gruesas obtienen mejores resistencias que granulometría fina. El porcentaje mayor que puede ser aplicado depende del origen de los residuos.

Vidales Barriguete et al. [99], analiza la factibilidad del uso de RCD como un agregado de bajo impacto ambiental en conglomerantes. Los residuos utilizados son las envolturas de cables eléctricos de PVC con granulometría desde 1mm a 0.063mm con porcentajes de incorporación de 50, 60 y 70% con relación agua/yeso de 0,8 y 1. Los resultados de resistencia a flexión presentan un descenso de éstas al incorporar los residuos donde la incorporación de 60% de residuos presentan mejores resultados que aquellos de 50% y 70%. La resistencia a compresión presenta un decremento de resistencia al incorporar los residuos y esta incorporación presenta una relación inversa lineal donde al incrementar más residuos, empeora la resistencia. El análisis microscópico de la muestra de 50% de residuos permite observar adherencia deficiente entre los residuos y la matriz de yeso, al existir una zona amplia de espacio entre los elementos descritos.

Jiménez Rivero et al [100], incorpora los residuos del caucho de aislamiento de tuberías de instalaciones hidráulicas en diferentes granulometrías de 1-2mm, 2-4 mm, 4-6 mm y 20-25 mm, en porcentajes de incorporación de 1.25%, 2.50%, 5.00% y 7.50%. La adición de este material comparado con la muestra de referencia presenta reducción de valores en las características físicas estudiadas. De entre estas mezclas, la que mejor resultado presenta es la de granulometría 1-2mm, mientras que la que peores valores obtiene es la de granulometría 20-25mm, y todas estas mezclas cumplen con los requerido en la normativa vigente. Este estudio concluye que la adición de 7,5% de adición excede la trabajabilidad de la masa y no es recomendable este porcentaje de adición. La adición de este caucho reduce hasta en 49% la densidad de la mezcla comparada con las probetas de referencia.

Estos estudios tienen en común la reducción de residuos, aplicación de la economía circular de los elementos constructivos, la reducción de gases de efecto invernadero y el consumo de energía para el reciclado de materiales que pueden llegar a ser transformados mediante el reciclado.

A continuación, se resume en la Tabla 9 los estudios realizados y analizados para el estado de arte de este documento, organizados por objetivos marcados en disminución de densidad, incremento de propiedades mecánicas, incorporación de RCD.

Tabla 9. Trabajos de investigación realizados para mejorar las propiedades del yeso. Fuente: Elaboración propia.

<b>Objetivo</b>	<b>Material incorporado</b>
Disminución de densidad	Corcho [73] [88]
	Poliestireno expandido [72] [73]
	Perlita expandida, vermiculita [70] [72] [81] [101] [102] [103] [104]
Incremento de propiedades mecánicas.	Fibras naturales [75] [76] [77] [78] [79] [80] [81] [82] [83] [105]
	Fibras de vidrio E y AR [84] [85] [106]
	Fibras poliméricas [86] [89] [93] [91] [92] [107], [108] [109] [110] [111] [112] [113] [114]
Favorecer una economía circular. Incorporación de RCD.	Yeso [22] [115] [116] [117] [118] [119] [120]
	Cerámicos [22] [95] [97] [98], [121]
	Polímeros [99] [122] [123]
	Aislantes térmicos [46] [96] [99] [122] [124] [125]
	Madera [117] [126] [127] [128]
	Vidrio [129]

### 3. Justificación del trabajo

La generación de residuos en la ejecución de obras de construcción y demolición suponen el 37.1% de todos los residuos generados en la industria de España [130]. Además, la fabricación de los materiales de construcción requiere gran cantidad de recursos naturales y energía para la fabricación, transformación y puesta en obra. Estos materiales al ser llevados a obra generan RCD que en su mayoría no son biodegradables, lo que conlleva un problema en cuanto a su gestión. Una de las opciones para su gestión es utilizarlos como fuente de energía en plantas incineradoras. Esta solución tiene el inconveniente de la generación y emisión de GEI como el CO<sub>2</sub> que está siendo regulado y controlado a fin de evitar el calentamiento global. Otra de las opciones de gestión es su recuperación y posterior tratamiento para ser utilizados como materia prima alternativa para la fabricación de nuevos materiales de construcción, favoreciendo así una economía circular [22].

En la actualidad, la sociedad tiene una mayor conciencia ambiental lo que promueve la reducción de la fabricación de productos que demandan grandes cantidades de energía y recursos naturales. Por este motivo, son muchos los profesionales y académicos que han trabajado para dar respuesta a esta situación y ofrecer nuevas alternativas para su gestión encaminadas hacia una economía circular.

La implementación de una economía circular donde se prime la reutilización y la recuperación, está motivada no solo desde el sentimiento de protección del medio ambiente, sino también por la implantación de normativas a nivel europeo en las que determinan estrategias comunitarias que palían el impacto ambiental generado por los motores económicos y especialmente para el sector construcción [23]. Estas directrices europeas son actualizadas continuamente, es así que el programa de la Unión Europea “Horizonte Europa (2021-2027)” [24], continúa las líneas establecidas por la estrategia Horizonte 2020, la cual promueve un crecimiento sostenible, inteligente e inclusivo que estos criterios son reforzados entre sí y generan una visión de economía de mercado europea para el siglo XXI.

Esta demanda hacia un menor impacto ambiental ha hecho que los fabricantes de materiales de construcción cambien sus procesos, incorporando residuos en su proceso de fabricación, obteniendo materiales con las exigencias, características y propiedades similares a los materiales tradicionales hacen que la investigación de

la incorporación de RCD sea más demandada y que cada vez más aparezcan nuevos estudios para el desarrollo de materiales con productos con RCD.

En este sentido, la industria yesífera es una de las industrias con una gran cantidad de productos aplicados, tanto en obra seca cómo en húmedo, en la construcción y es motor en la generación tanto de investigación cómo empleo. El yeso es una de las materias primas que más ha sido investigado, no solo en la incorporación de nuevas cargas, sino también adiciones con cargas de origen en los RCD. Los estudios realizados incluyen la adición de fibras orgánicas [131] y poliméricas de nueva fabricación [110] y fibras de fundición de fibra de vidrio [132], lana de roca [125], etc. Entre los estudios que incorporan RCD destacan aquellos que incorporan desechos de ladrillos cerámicos [22], envoltura plástica de cables eléctricos [123], [99] y otros tipos de residuos cómo cenizas de madera [126], residuos textiles [88], residuos de placas de yeso laminado [133], fibras poliméricas con diatomeas [134], residuos de otros materiales aligerantes cómo poliestireno extruido (XPS) [135] y perlita expandida [103], [81].

La aplicación de fibras recicladas en morteros de yeso o escayola también ha sido estudiado y los materiales obtenidos, evitan la emisión de CO<sub>2</sub> que se genera en la fabricación de fibras comerciales nuevas y revela un consumo menor de energía y de combustibles fósiles [44].

Otros RCD generados habitualmente en las obras de construcción y demolición son los residuos provenientes de las eslingas de un solo uso, que tienen una vida útil muy corta, al ser descartadas junto con el material entregado en obra, y generan unas fibras poliméricas de difícil reciclaje.

Entre los trabajos encontrados que incorporan fibras provenientes de RCD no se han encontrado estudios que incorporen fibras poliméricas provenientes de eslingas de un solo uso. Por este motivo, esta tesis doctoral analiza la viabilidad de incorporar residuos poliméricos de eslingas de un solo uso en compuestos de yeso, analizando sus propiedades físicas y mecánicas. La sustitución de fibras comerciales por fibras de eslingas reduciría el uso de materias primas naturales, y por ende, el ahorro energético que conlleva. Adicionalmente evitaría la incineración de los residuos de eslingas y la consecuente emisión al ambiente de CO<sub>2</sub>.

## 4. Objetivos

El objetivo principal de esta Tesis Doctoral es reducir el impacto medioambiental del sector de la construcción mediante el diseño de un nuevo eco material en base yeso que incorpore RCD. El estudio realizado comprende el análisis de la viabilidad de incorporar fibras poliméricas de polipropileno procedentes del residuo generado por las eslingas de un solo (recuperadas de obras de construcción) en una matriz de escayola y yeso, con el fin de obtener propiedades mejoradas en comparación con los productos tradicionales.

Los objetivos específicos que han sido planteados para la obtención del objetivo principal son los siguientes:

- Objetivo 1: Caracterizar las propiedades físico-químicas de los materiales utilizados: yeso, escayola y fibras poliméricas.
- Objetivo 2: Caracterizar los compuestos con fibras poliméricas
  - Evaluar las investigaciones previas de compuestos de yesos con agregados poliméricos para determinar las variables a utilizar.
  - Evaluar el cumplimiento de los compuestos, en estado fresco, de las prescripciones de la normativa en vigor.
  - Determinar y analizar de las propiedades físico-mecánicas y térmicas de los compuestos con fibras amparados en la normativa vigente y el cumplimiento de los mínimos establecidos.
- Objetivo 3: Proponer aplicaciones de los compuestos de yeso con fibras poliméricas de origen RCD en la construcción.
  - Seleccionar de los compuestos más apropiados para la aplicación en las diferentes unidades de obra en edificación.
  - Analizar las características microscópicas de los compuestos idóneos seleccionados.



## 5. Materiales y plan experimental

Este capítulo se describe los materiales utilizados, así como el plan experimental utilizado para alcanzar los objetivos específicos propuestos en el capítulo 4 Objetivos.

### 5.1. Materiales y equipos utilizados

Las probetas ensayadas en esta tesis han sido realizadas con los siguientes materiales:

- Yeso grueso (YG) suministrado por la empresa Placo Saint-Gobain y cuyas características se determinan en la Tabla 10. La información técnica -comercial es adjuntada en el Anexo 1
- Escayola (E35) suministrada por Placo Saint-Gobain y cuyas características se determinan en la Tabla 11. La información técnico-comercial se incluye en el Anexo 2.
- Fibras de polipropileno de origen comercial: Las fibras comerciales utilizadas las suministró Sika fiber y sus características se observan en la Tabla 12. La información técnico-comercial se incluye en el Anexo 3.
- Fibras recuperadas de eslingas de un solo uso (Fibras RCD): obtenidas de las eslingas de la marca comercial Cables y Eslingas S.A. (Tabla 13). La información técnico-comercial se incluye en el Anexo 4. Estas eslingas han sido recogidas de los contenedores de distintas obras donde fueron utilizadas para el izado de cargas y cortadas de manera manual a 12mm con una precisión de  $\pm 1$ mm, para su posterior deshilachado del tejido.
- Agua del Canal de Isabel II. Las características del agua utilizada son adjuntadas en el Anexo 5

Tabla 10: Características técnicas de YG.

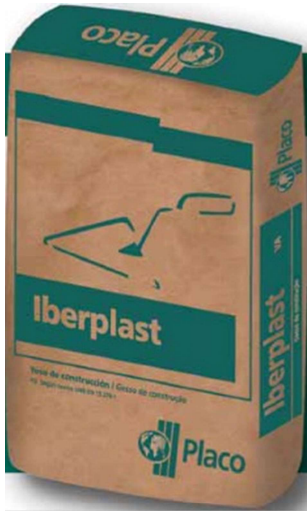
IBERPLAST		Características técnicas
YG 	Índice de pureza	> 75%
	Resistencia mecánica a flexión	> 2.0 N/ mm <sup>2</sup>
	Resistencia compresión	> 2.0 N/ mm <sup>2</sup>
	PH	> 6
	Granulometría	0 –2 mm
	Relación A/Y	1.0 –1.2 litros/Kg
	(λ) conductividad térmica	0.30 W/mK
	Difusión al vapor de agua	6
	Dureza superficial Shore C	≥ 45
	Tipo de soporte recomendado	cerámica, hormigón
	Adherencia	> 0.1 N/ mm <sup>2</sup>
	Tiempo de empleo	12-14 minutos
	Temperatura de aplicación recomendada	5-40°C
	Reacción al fuego	Euroclase A1

Imagen 7: Yeso Grueso utilizado en el estudio

Tabla 11: Características técnicas de la E35.

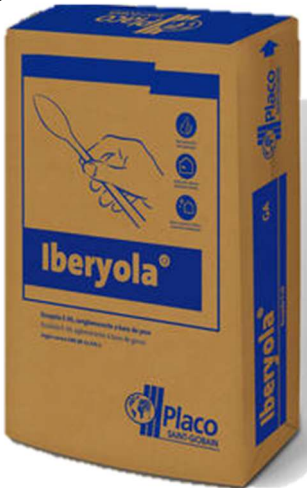
IBERYOLA		Características técnicas
E35 	Índice de pureza	> 75%
	Resistencia a flexión	> 3.0 N/ mm <sup>2</sup>
	Resistencia a compresión	no indicado
	PH	> 6
	Granulometría	0 –2 mm
	Relación A/Y	0.7-0.8 litros/Kg
	(λ)conductividad térmica	0.30 W/mK
	Difusión al vapor de agua	6
	Dureza superficial Shore C	no indicado
	Tipo de soporte recomendado	no indicado
	Adherencia	no indicado
	Tiempo de empleo	15-22 minutos
	Temperatura de aplicación recomendada	5-40°C
	Reacción al fuego	Euroclase A1

Imagen 8: Escayola utilizada en el estudio

Tabla 12: Características técnicas de la fibra comercial.


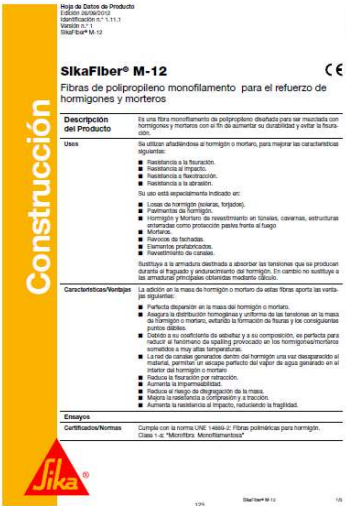


Denominación	SIKAFIBER M-12	
 <p>Imagen 9: Fibras comerciales de polipropileno.</p>	Fabricante	Sika S.A.
	Composición	Polipropileno
	Longitud	12mm
	Tenacidad	280-310N/mm <sup>2</sup>
	Diámetro	31µm
	Módulo de elasticidad	1500N/mm <sup>2</sup>
	Alargamiento a la rotura	80-140%
	Absorción de agua	0
	Densidad	0.91g/cm <sup>3</sup>
	Número de fibras	102x10 <sup>6</sup>
		

Tabla 13: Características técnicas de la fibra RCD.

Fibras recuperadas de RCD.	ESLINGA NO REUTILIZABLE	
 <p>Imagen 10: Fibras de polipropileno procedente de los residuos de eslingas (RCD). Elaboración propia.</p>	Fabricante	Cables y eslingas S.A.
	Composición	Polipropileno
	Longitud	12 ±1mm.
	Tenacidad	280-310N/mm <sup>2</sup>
	Diámetro	31µm
	Módulo de elasticidad	Teórico.
	Alargamiento a la rotura	80-140%
	Absorción de agua	0
	Densidad	0.91g/cm <sup>3</sup>
		

La elaboración de probetas y ensayo de éstas han sido realizados en el Laboratorio de la Escuela Técnica Superior de Edificación de la Universidad Politécnica de Madrid (LMETSEMUPM) y se han empleado las siguientes máquinas, útiles y herramientas:

- Prensa motorizada con dispositivos de flexión y compresión. Mod. AUTOTEST 200-100 SW.
- Durómetro Shore C.
- Báscula de precisión. Mod. EUROPE 3000 HR.
- Estufa de desecación. Mod. CENTERM 150
- Desecadora con gel de sílice.
- Amasadora planetaria
- Moldes triples para probetas de 40mm x 40mm x 160mm.
- Mesa de sacudidas y molde troncocónico.
- Elementos de medición (calibre, cronometro).
- Taladro de banca con corona de 50mm de diámetro.
- Útiles varios (vaso graduado, paleta, enrasador, termómetro).
- Microscopio electrónico de barrido (SEM) Jeol 5600-LV junto con espectrómetro de energía de barrido
- Stereopycnometer de la marca QuantaChrome
- Termobalanza TA Instruments SDT Q600
- Difractómetro Siemens Diffraktometer D5000 con radiación Cu K $\alpha$  (1.2) y monocromador de grafito
- Autopore IV 9500 de la casa comercial Micromeritics Instrument Corporation

## 5.2. Plan experimental

Para la consecución de cada uno de los objetivos específicos, se ha desarrollado un plan experimental en laboratorio que consta de las siguientes fases:

- Fase 1: Caracterización de los materiales utilizados
- Fase 2: Confección de probetas con fibras de polipropileno comerciales y de fibras RCD provenientes de los residuos de eslingas de un solo uso
- Fase 3: Caracterización de los compuestos en estado fresco y endurecido
- Fase 4: Selección de los mejores compuestos y realización de imágenes con microscopio electrónico de barrido (SEM)
- Fase 5: Aplicaciones de los compuestos seleccionados

### 5.2.1. Fase 1: Caracterización de los materiales utilizados

Se ha realizado la densidad real, un análisis termogravimétrico, difracción de rayos X y densidad aparente del yeso, la escayola y las fibras procedentes de los residuos de eslingas.

#### Fase 1.1 Densidad aparente

La densidad aparente del yeso y escayola han sido obtenidas aplicando el ensayo del Método de la masa hidrostática según norma UNE 102042:23 [66], en el Laboratorio de Análisis Químico de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Diseño Industrial de la Universidad Politécnica de Madrid (LAQETSIDI). Esta densidad de aparente también es definida como densidad bulk, incluye los poros y espacios interparticulares del polvo. Esta densidad fue determinada al pesar una muestra contenida en una probeta graduada de 50cm<sup>3</sup> (Imagen 11).



Imagen 11: Medición de densidad bulk YG, E-35

### Fase 1.2 Determinación de la densidad real

La densidad real de las materias primas yeso, escayola han sido determinadas mediante picnometría de helio. El tamaño de la molécula del helio es capaz de penetrar en los poros más pequeños de toda la muestra. Este ensayo ha sido realizado en el LAQETSIDI.

La densidad real o densidad de helio o densidad de esqueleto, es definida como la densidad del material con el descarte de poros y espacios interparticulares. Esta densidad es determinada por desplazamiento helio que penetra en los poros. En este estudio, ha sido empleado un estereopicnómetro modelo Stereopycnometer de la marca QuantaChrome (Imagen 12), el cual mide la variación de la presión cuando el helio (Air Liquide, 99.999% pureza) se desplaza desde la celda inicial que contiene la muestra (celda de volumen conocido) hasta una celda de referencia de volumen también conocido, esta medición se realiza a temperatura ambiente. El proceso que se ha seguido consiste en llenar 2/3 de la cápsula de la cámara con la muestra y se realiza la pesada inicial de la muestra (M). Esta cápsula se introduce en el picnómetro en la celda de muestra ( $V_c = 155.88 \text{ cm}^3$ ), se desgasifica durante diez minutos con Helio, así se elimina el aire ocluido en los poros y se presuriza también con Helio, indicándose en el display digital la presión (P2). Posteriormente se activa la válvula selectora y el gas helio fluye de la celda inicial de muestra a la celda de referencia ( $V_a = 76.67 \text{ cm}^3$ ), con lo cual el volumen que ocupa el Helio aumenta indicándose un nuevo valor de presión menor que el anterior (P3).



Imagen 12: Medición de densidad real con picnómetro de helio.

## Materiales y plan experimental

La densidad real o picnometría de Helio viene dada por la Ecuación 4:

$$\rho_s = M / V_s \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

$\rho_s$  es la densidad real del sólido en g/ cm<sup>3</sup>.

M es la masa de la muestra en g.

$V_s$  es el volumen que ocupa la muestra en cm<sup>3</sup> según la Ecuación 5:

$$V_s = V_c + [V_a / 1 - (P_2 / P_3)] \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

$V_s$  es el volumen de la muestra en cm<sup>3</sup>.

$V_c$  es el volumen de la celda de muestra en cm<sup>3</sup>.

$V_a$  es el volumen de la celda de referencia en cm<sup>3</sup>.

$P_2$  es la lectura de la presión después de presurizar la celda de muestra.

$P_3$  es la lectura de presión después de incluir el volumen de la celda de referencia  $V_a$ .

### Fase 1.3 Análisis termogravimétrico

Este ensayo gravimétrico dinámico del yeso, escayola, fibras comerciales y procedentes de RCD han sido realizados en el LAQETSIDI. Este análisis consiste en someter la muestra a un tratamiento térmico en un horno, con velocidad de calentamiento y atmósfera dinámica controladas, en el que se registra la masa en función de la temperatura, así como los eventos térmicos asociados. Ha sido utilizado una termobalanza TA Instruments SDT Q600 (Imagen 13). Se prepara una cápsula de platino y coloca el material a ensayar a 2/3 la capacidad del vaso, siendo la medida de masa de referencia. A partir de temperatura ambiente, se disponen discos de alúmina entre la cápsula de platino y el brazo de la termobalanza para evitar que se suelde la cápsula al brazo. A continuación, y en una atmósfera seleccionada de aire filtrado suministrado por un compresor a 100 ml/min, se inicia un incremento de temperatura controlada iniciando a temperatura ambiente, elevando 10°C por minuto y finalizando en 1000°C. Se registra las variaciones de masa, temperatura de la muestra (tanto en % respecto a la masa inicial como en unidades de masa) y el calor desprendido o absorbido frente a la temperatura y el tiempo.



Imagen 13: Análisis térmico gravimétrico. Equipo (izquierda) y brazos de termobalanza (derecha).

### Fase 1.4 Difracción de Rayos X

El ensayo de difracción de Rayos X ha sido realizado al yeso (YG) y escayola (E35) en el LAQETSIDI, con la finalidad de conocer la composición y estructura cristalina de las muestras. Las fibras comerciales y de RCD no han sido ensayadas en esta ocasión debido al tamaño de partículas y que no presenta adherencia entre estas fibras lo que no permite disponer la muestra en el portamuestras de forma correcta para llevar a cabo el análisis.

El equipo utilizado es el difractorómetro Siemens Diffraktometer D5000 con radiación Cu K $\alpha$  (1.2) y monocromador de grafito (Imagen 14); el mismo que emite el difractograma en un rango entre  $5^\circ \leq 2\theta \leq 100^\circ$  cada  $0.04^\circ$ , 1 segundo por paso.



Imagen 14: Equipo de difracción de rayos X.

### 5.2.2. Fase 2: Confección de probetas con fibras de polipropileno y residuos de eslingas de un solo uso

El estudio del estado de la cuestión concluye que los trabajos previos recomiendan incorporar fibras hasta el 4% en masa. Estos porcentajes corresponden tanto a fibras de polipropileno comerciales como fibras de polipropileno recicladas de RCD. Por ello, se han elaborado distintas mezclas incorporando hasta un 4% de fibras en compuestos de yeso y escayola tal y como muestra la Tabla 14.

Tabla 14. Nomenclatura de probetas. (Elaboración propia)

Conglomerante	% de fibra	Origen de la fibra	Denominación
<b>YESO GRUESO YG</b>	--	--	YG REF
	1	COMERCIAL	YG-1K
		RCD	YG-1R
	2	COMERCIAL	YG-2K
		RCD	YG-2R
	3	COMERCIAL	YG-3K
		RCD	YG-3R
	4	COMERCIAL	YG-4K
RCD		YG-4R	
<b>ESCAYOLA E-35</b>	--	--	E REF
	1	COMERCIAL	E-1K
		RCD	E-1R
	2	COMERCIAL	E-2K
		RCD	E-2R
	3	COMERCIAL	E-3K
		RCD	E-3R
	4	COMERCIAL	E-4K
RCD		E-4R	

En total se han realizado 346 probetas de distintas dimensiones. En función de los ensayos realizados han sido ejecutadas las probetas de las dimensiones y características necesarias para cada ensayo y que se relacionan en la Tabla 15.

Tabla 15. Probetas elaboradas en función de los ensayos a realizar  
(Elaboración propia)

Ensayo	Dimensiones	Muestras	Series	N.º/ serie	Total probetas
<b>Dureza Shore C</b>	40x40x160mm		4	3	216
<b>Flexión</b>	40x40x160mm	18	4	3	216
<b>Compresión</b>	40x40x80mm		4	6	432
<b>Ascensión por capilaridad</b>	40x40x160mm	18	1	3	54
<b>Adherencia</b>	200x400x10mm	18	2	1	36
<b>Conductividad térmica</b>	250x250x30mm	18	1	1	18
<b>Resistencia al choque</b>	400x300x10mm	18	1	1	18
<b>Flexión de paneles</b>	400x300x10mm	18	3	1	54
<b>Escáner de barrido de electrones</b>	10x10x10mm	4	1	4	4

Las probetas han sido elaboradas siguiendo el procedimiento establecido en la norma UNE-EN 13279-2:2014 ([65]):

- a) Peso de los materiales, yeso, agua y fibras teniendo en cuenta la relación agua/yeso obtenido para rellenar el interior de los moldes (ver Imagen 15).
- b) Vertido del agua en la jarra de amasado, añadir las fibras y mezclar con el agua, espolvorear el yeso en treinta segundos (30s). Reposo del yeso espolvoreado por sesenta segundos (60s), se realiza un primer amasado por 30s, se deja reposar durante otros 30s y se amasa otros 30s. La velocidad de trabajo de la amasadora mezcladora es  $140 \pm 5$  rpm en rotación y  $62 \pm 5$  en movimiento planetario.
- c) La mezcla ya amasada, se vierte dentro de los moldes engrasados previamente con la ayuda de una espátula de silicona que distribuye en las esquinas. Para evitar al máximo las burbujas de aire, se eleva el molde cerca de 10mm y se deja caer generando impactos que expulsan las burbujas de aire.

- d) Se procede a retirar el sobrante de la pasta de los moldes rellenos, con un cuchillo o regla metálica con un movimiento en zigzag.
- e) Las probetas fueron desmoldadas al adquirir un grado de resistencia y son etiquetadas para su posterior disposición de almacenado. Estas probetas pasan siete días en atmosfera de laboratorio y a los 7 días se desecan hasta peso constante en el horno a temperatura constante de  $40\pm 2^{\circ}\text{C}$ . Por último, se enfriarán en desecador con gel de sílice hasta temperatura del laboratorio.

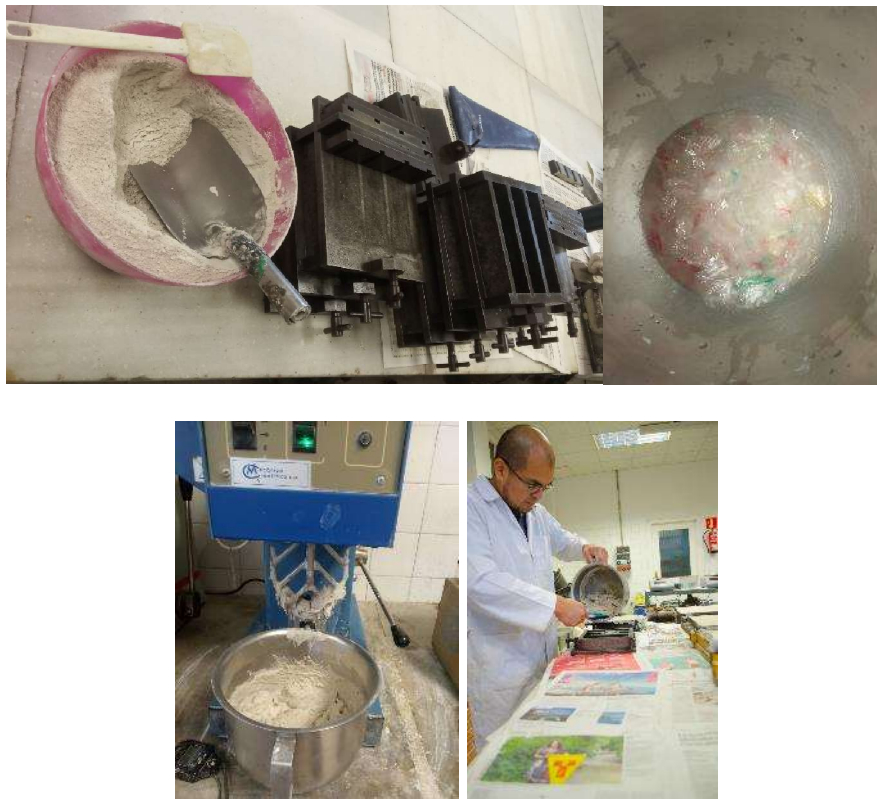


Imagen 15: Proceso de elaboración de probetas. (Elaboración propia)

### **5.2.3. Fase 3: Caracterización de los compuestos en estado fresco.**

La caracterización de los compuestos en estado fresco ha sido realizada para comprobar que la adición de fibras recuperadas mantiene la trabajabilidad necesaria de estos compuestos a la hora de verter en los moldes. La caracterización en estado fresco comprende la determinación de la relación agua/yeso que se ha medido por dos métodos diferentes: saturación y fluidez de la pasta. El método aplicado a las muestras de referencia ha sido mediante el método de saturación, mientras que la relación de agua/yeso para las muestras con incorporación de fibras es mediante la mesa de sacudidas. La determinación de la relación agua/yeso mediante la mesa de sacudidas es establecida debido a que la presencia de fibras dificulta la trabajabilidad de las muestras, lo que podría inducir a errores en la mezcla y obtención de resultados.

#### **a) Método de saturación**

Este método de determinación de la relación agua/yeso es establecido en apartado 4.3.1 de la norma UNE-EN 13279-2:2014 y consiste en:

- Verter 100 de agua en un recipiente cilíndrico. Obtener la masa del conjunto,  $m_0$ .
- Espolvorear el yeso uniformemente, alcanzando la primera marca en 30s.
- Continuar espolvoreando yeso hasta llegar a la segunda marca al cabo de 60s. Al cabo de 90s  $\pm 10$ s llegar a 2mm por debajo de la superficie del agua.
- En los siguientes (20-40) s, el yeso espolvoreado debe hacer desaparecer la capa de agua. En el caso de haber aparecido algún pequeño grumo de yeso, al cabo de 3s o 5s debería haberse humectado.
- Eliminación del exceso de yeso de los bordes del recipiente. Determinación de la masa del conjunto  $m_1$ .
- La relación agua/yeso se obtiene de la operación de la formula (3) de la norma UNE-EN 13279-2:2014 Ecuación 6.

Donde:

$$R = \frac{100}{m_1 - m_0} \quad \text{Ecuación 4}$$

$m_1$  es la masa del vaso más la masa del agua. (g)

$m_1$  es la masa del vaso más la masa del agua y la masa del yeso. (g)

### b) Método de la fluidez de la pasta

Este método de determinación de la relación agua/yeso es establecido en apartado 4.3.2 de la norma UNE-EN 13279-2:2014 y consiste en:

- Colocar el molde truncado sobre la placa de vidrio en una superficie estable y horizontal.
- Preparar la mezcla de 500g de yeso con la relación de agua/yeso determinada por ensayos previos y ejecutados de igual forma que en la fabricación de probetas.
- Vertido de la pasta en el molde truncado, eliminando el exceso de pasta.
- Al cabo de 3min y 15s desde que se comenzó el proceso de la mezcla, se levanta el molde para que la pasta se deslice sobre la placa de vidrio.
- Se mide el diámetro de la galleta formada en dos posiciones perpendiculares, y se halla el valor medio. En el momento en que el diámetro medio esté dentro del rango 150mm y 210mm (ver Imagen 16), se calcula la relación agua/yeso mediante la expresión (Ecuación 5).

$$R = \frac{500}{m_2} \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde:

$m_2$  es la cantidad de yeso empleada en gramos. (g)



Imagen 16: Medición de diámetros. (Elaboración propia)

### c) Trabajabilidad de la pasta

La trabajabilidad de las muestras puede ser palpada en la facilidad del mezclado de los ingredientes y el vertido de esta mezcla en los moldes, la misma que tomará en cuenta las dificultades en el momento de dividir la masa dentro de los moldes y la distribución homogénea dentro de cada una de las probetas. Esta trabajabilidad se verá influida por la cantidad de fibras incorporadas en la masa de yeso. Este factor es determinante a la hora de elegir la cantidad máxima de fibras que pueden ser incorporadas, a fin de obtener los mejores resultados y el aprovechamiento óptimo del rendimiento a la hora de fabricar las probetas.

#### 5.2.4. Fase 4: Caracterización de los compuestos en estado endurecido

Una vez elaboradas las probetas establecidas en la Tabla 14, se realizan los siguientes ensayos siguiendo la norma UNE-EN 13279-2: 2014:

- Densidades: húmeda, densidad seca, desecada a temperatura ambiente.
- Porosimetría de mercurio.
- Dureza superficial Shore C.
- Resistencia a flexión.
- Resistencia a compresión.
- Adherencia (Resistencia al arrancamiento).
- Coeficiente de conductividad térmica.
- Ascensión por capilaridad
- Resistencia al choque/impacto
- Resistencia a flexión de paneles

### Determinación de densidades

En este apartado se determina y analiza la densidad de las probetas elaboradas. En este estudio se realizan tres mediciones de masas:

1. La primera medición es realizada justo después de desmoldar las probetas y disponer en el laboratorio para su secado.
2. La segunda medición es realizada una vez pasados 7 días al ambiente de laboratorio, antes de introducir estas probetas al horno de desecado
3. La última medición es realizada después de haber pasado 24 horas de secado en horno a  $40 \pm 5^\circ\text{C}$ , hasta peso constante.

La densidad ha sido determinada dividiendo la masa de cada probeta entre  $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$  que es el volumen de cada una de ellas Ecuación 6.

$$\delta = \frac{m_3}{4 \times 4 \times 16} (\text{g/cm}^3) \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde:

$m_3$ : Masa de cada probeta (g)

$4 \times 4 \times 16$ : volumen del molde ( $\text{cm}^3$ ).

### Porosimetría de mercurio

El ensayo de porosimetría de mercurio ha sido ejecutado sobre las mezclas de escayola. Este ensayo ha sido realizado en el laboratorio de Sólidos Porosos pertenecientes a los servicios centrales de apoyo a la investigación de la Universidad de Málaga. El equipo utilizado en la ejecución de este ensayo es el Autopore IV 9500 del fabricante Micromeritics Instrument Corporation (Imagen 17). Para este ensayo son necesarias probetas cilíndricas de 10mm de altura y 10mm de diámetro que se colocan dentro del equipo y que éste introduce de forma gradual mercurio en los poros de la muestra por medio de presión controlada, se recoge la información de tamaño de poro, área superficial y diámetro medio de los poros, volumen y la presión establecida en el proceso, así como la densidad aparente.



Imagen 17: Autopore IV 9500

Los datos obtenidos de presión aplicada, y volumen de mercurio introducido es empleada la ecuación de Washburn Ecuación 7:

$$r = \frac{-2\sigma \cdot \cos\theta}{\mu} \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde:

- r = radio de poro
- $\sigma$  = Tensión superficial del mercurio
- $\theta$  = ángulo de contacto
- $\mu$  = Presión

### Determinación de dureza Shore C

La Dureza tipo Shore C es la determinada para medir esta característica en las probetas de yeso y se ha seguido el siguiente procedimiento:

- Colocar la probeta en una superficie estable.
- Penetrar con el durómetro en las caras que habían estado en contacto con los laterales del molde, realizando cinco mediciones de cada cara. (ver Imagen 18)
- La dureza superficial de la probeta viene dada por la media de las diez mediciones. La dureza Shore C de la amasada es la media de las probetas que forman parte de dicha amasada.

Este método no está contemplado en la normativa en vigor, como consecuencia de ello ha sido utilizado el método de la norma UNE 102039:85 que es predecesora a la UNE-EN 13279-2:2014.

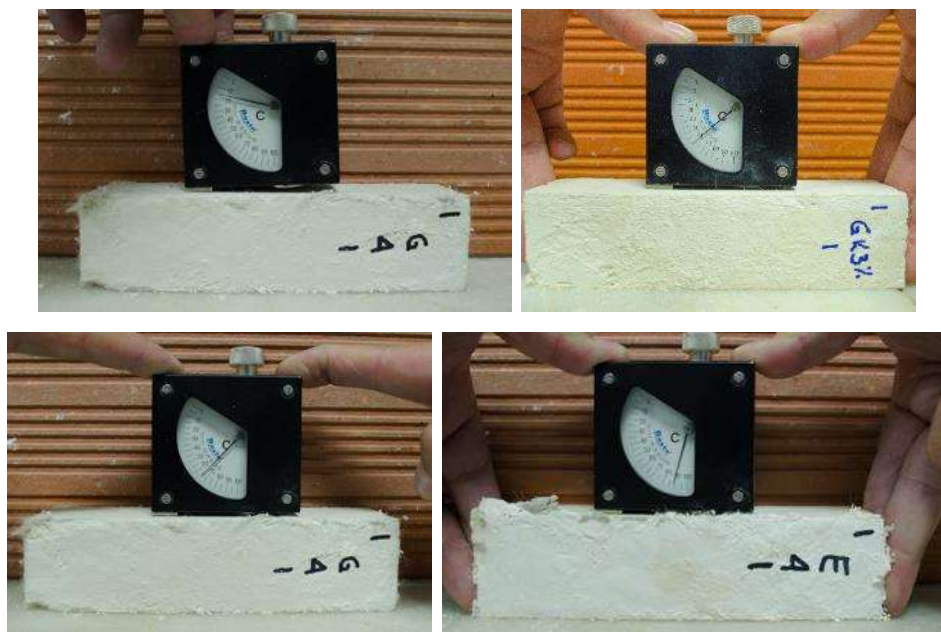


Imagen 18: Medición dureza Shore tipo C. (Elaboración propia)

### Determinación de la resistencia a flexión

El capítulo 4.5.4. de la norma UNE-EN13279-2: 2014 establece la metodología para determinar la resistencia a flexión y se esquematiza de la siguiente manera:

La probeta de 40x40x160mm es colocada de manera que una de las caras laterales queda sobre los rodillos de la máquina de ensayos y que se encuentran separadas 100mm, es aplicada una carga en el rodillo superior hasta rotura de la probeta, ver Imagen 19. La carga de rotura será utilizada en la fórmula (9) de la norma (Ecuación 8) para determinar la tensión del producto.

$$P_F = 0.00234xP \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde:

- $P_F$  es la resistencia a flexión en  $N/mm^2$ .
- $P$  es la carga media de rotura en N de al menos, tres valores obtenidos.



Imagen 19: Dispositivo de ensayo a flexión. (Elaboración propia)

### Determinación de la resistencia a compresión

Para la determinación de la resistencia a compresión es de aplicación el apartado 4.5.5 de la norma UNE-EN13279-2: 2014 (Imagen 20).

Este ensayo ha sido realizado a las dos semi-probetas generadas en la rotura de la probeta en el ensayo a flexión. El procedimiento para determinar la resistencia a compresión determina que:

Si el ensayo a compresión no se realiza inmediatamente a continuación del ensayo de flexión, los trozos de las probetas se deberían guardar en un desecador. (En este estudio todos los ensayos a compresión han sido inmediatamente después de los de flexión).

El trozo de la probeta a ensayar se colocará de forma que los lados del contacto con las caras del molde estén en contacto con los platos de la prensa con una sección de 40mmX40mm.

El valor de la resistencia a compresión de las probetas ensayadas se obtiene aplicando la formula (10) de la norma UNE-EN 13279-2:2014 (Ecuación 9).

Donde:

$$R_c = \frac{F_c}{1600} \quad \text{Ecuación 9}$$

- $R_c$  es la resistencia a compresión en  $N/mm^2$ ;
- $F_c$  es la máxima carga en la rotura en N;
- 1 600  $40\text{ mm} \times 40\text{ mm}$  es el área de la probeta en  $mm^2$ .

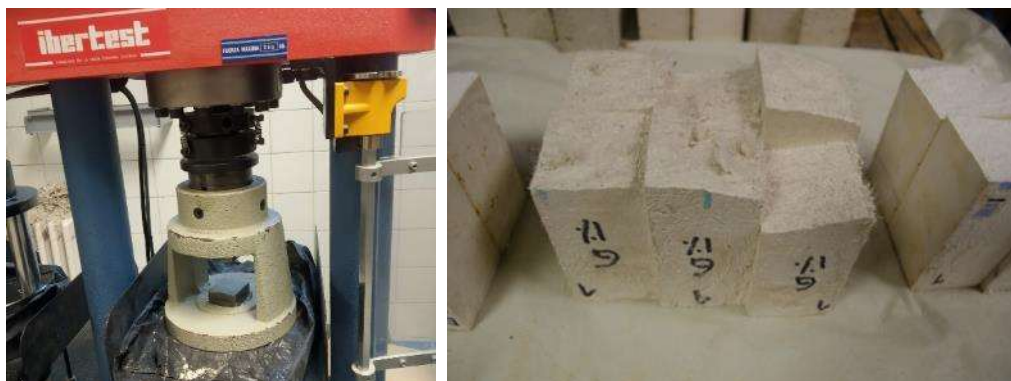


Imagen 20: Dispositivo de ensayo a compresión (Elaboración propia).

**Determinación de la adherencia (resistencia al arrancamiento).**

Para la determinación de la adherencia sigue el contenido del apartado 4.6 de la norma UNE-EN 13279-2: 2014.

Se realizará el vertido de 1cm de la muestra de yeso sobre un ladrillo cerámico cocido, se mantiene 7 días en ambiente de laboratorio y se procede a realizar taladros con diámetro de 50mm que arranca al menos 5mm de la superficie cerámica, para adherir sobre esta superficie un disco metálico con adhesivo a base de resinas. Este disco será arrancado utilizando la máquina de extracción generando una velocidad constante en la carga (Imagen 21). La velocidad de carga recomendable está entre 0.1 N/mm<sup>2</sup> y 0.003N/mm<sup>2</sup>.



Imagen 21: Máquina extractora de discos. (Elaboración propia)

El valor de la resistencia de adherencia se calcula mediante la fórmula (11) de la norma UNE-EN 13279-2:2014 (Ecuación 10).

Donde:

$$R_u = \frac{F_u}{A} \quad \text{Ecuación 10}$$

- $R_u$  Fuerza de adherencia en N/mm<sup>2</sup>;
- $F_u$  es la carga en N;
- $A$  es el área de ensayo de la probeta cilíndrica.

Esta resistencia debe ser calculada con una precisión de  $0.01 \text{ N/mm}^2$  y será tomada en cuenta la forma de rotura del cilindro o base cerámica, dado que existen determinados cuatro tipos de rotura del soporte.

### **Determinación del coeficiente de conductividad térmica.**

Para la determinación del coeficiente de conductividad térmica ha sido utilizada la caja térmica en el laboratorio de física de la Escuela Técnica Superior de Edificación. Para obtener los valores del coeficiente de conductividad térmica ha sido aplicado el siguiente procedimiento:

- Elaboración de placas de cada muestra de yesos de medidas  $25 \times 25 \text{ cm}$  de  $3 \text{ cm}$  de espesor.
- Disposición de la placa en el espacio establecido y ajustarlo, como se puede observar en Imagen 22.
- Disposición de sensores de temperatura en los puntos:
  - Interior de la caja, sin contacto con ningún material.
  - Cara interior de la placa.
  - Cara de contacto entre placa de muestra y poliestireno expandido.
  - Cara exterior de poliestireno expandido.



Imagen 22: Ensayo de caja térmica (Elaboración propia).

Una vez dispuesto los sensores según lo descrito anteriormente, se procede a cerrar la tapa y encender la fuente de calor y se conectan los sensores a los

## Materiales y plan experimental

lectores de temperatura que estarán enlazados a un ordenador donde serán volcados los datos de temperatura cada minuto. Cuando las lecturas medidas sean constantes, serán determinadas para el cálculo teórico del coeficiente de conductividad térmica a partir de la Ecuación 11.

$$\lambda' = \frac{\lambda e' (T2 - T3)}{e (T3 - T4)}$$

Que es deducida de la formula del flujo de calor, Ecuación 12 :

$$\phi = \frac{\lambda}{e} s (T2 - T3) = \frac{\lambda'}{e'} s' (T3 - T4) \quad \text{Ecuación 12}$$

Donde:

$\lambda'$  es la conductividad térmica de la placa de ensayo en W/mK;

$\lambda$  es la conductividad térmica de la placa de muestra en W/mK;

$e'$  es el espesor de la placa de ensayo en metros;

$e$  es el espesor de la placa de muestra en metros;

$T2$  es la temperatura en la cara interior de la placa de muestra, expresado en grados kelvin;

$T3$  es la temperatura entre las dos placas, expresado en grados kelvin;

$T4$  es la temperatura en la cara exterior de la placa de ensayo, expresado en grados kelvin;

$\phi$  es el flujo de calor, expresado en Watios;

$s'$  es el área de la cara de la placa de ensayo, expresado en m<sup>2</sup>;

$s$  es el área de la cara de la placa de muestra, expresado en m<sup>2</sup>.

### **Determinación de la ascensión por capilaridad.**

La norma UNE-EN13279-2: 2014 no especifica el ensayo para la medición de la ascensión de agua por capilaridad, con lo que el procedimiento para la determinación de la ascensión por capilaridad aplicado está determinado en la norma RILEM RC25-PEM. Este procedimiento ha sido aplicado por la mayoría de las investigaciones [99] [116] [123] [124] [125] [129] de yesos razón por la cual se mantiene el mismo criterio de medición y análisis de esta característica.

Las probetas utilizadas han sido desecadas en horno a  $40^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  hasta peso constante.

Estas probetas son colocadas en posición vertical en un recipiente con agua y malla evitando que la cara quede en contacto con el recipiente. La altura del agua será constante de 10mm sobre la cara inferior de la probeta.

Las mediciones son realizadas cada minuto durante 10 minutos y se realizan marcas en cada una de las medidas. El resultado obtenido es expresado en milímetros (mm) ver Imagen 23.

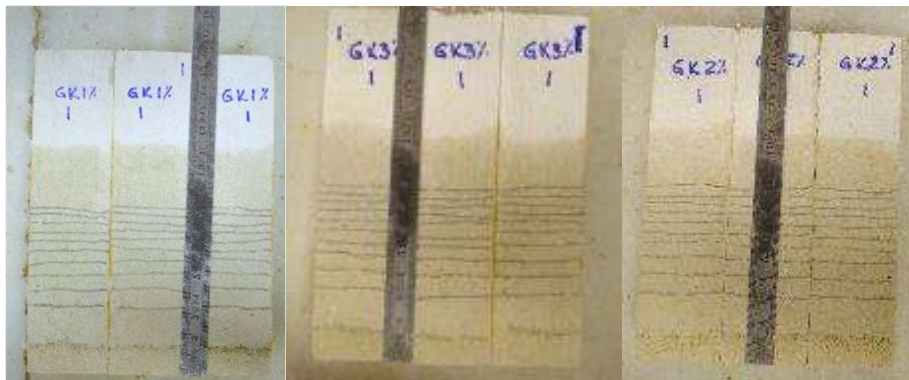


Imagen 23: Medición de ascensión de agua por capilaridad (Elaboración propia).

### Resistencia al choque/impacto

La resistencia al choque por impacto es determinada mediante el ensayo de dureza superficial de placa UNE EN 520 [136] [137]. Este ensayo ha sido realizado en el Laboratorio de Materiales de la Escuela Técnica Superior de Edificación de Madrid de la Universidad Politécnica de Madrid (LMETSEMUPM).

La probeta es colocada sobre una mesa rígida y con la cara a ensayar hacia arriba. Se deja caer una bola de acero, de 12.5 mm de diámetro y 22g de masa, a una altura de  $500 \pm 5$  mm (Imagen 24). Se mide el diámetro de la huella dejada por el impacto con precisión de 1 mm

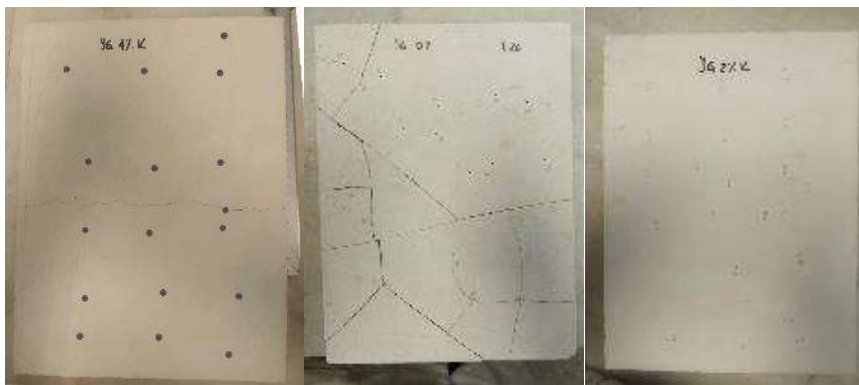


Imagen 24: Ensayo de choque por impacto.

La resistencia al choque de impacto se mide por la profundidad de huella determinada por la bola de acero después del impacto, según la expresión de la Ecuación 13:

$$h = \frac{D - \sqrt{D^2 - d^2}}{2} \quad \text{Ecuación 13}$$

donde,

h es la profundidad de la huella después de impacto en mm

D es el diámetro de la bola de acero en mm

d es el diámetro de la huella después de impacto en mm

### Resistencia a la flexión de paneles

Los ensayos de resistencia mecánica de rotura a flexión de paneles sometidos a una carga en tres puntos, se realiza según la norma UNE-EN 12859:2012 ([138]) en el [LMETSEMUPM]. Los paneles se colocan en posición horizontal sobre la máquina de ensayo modelo MPX-22 de PÁCAM provista de dos soportes cilíndricos paralelos dispuestos sobre una base nivelada (Imagen 25). A continuación, y mediante un rodillo de carga, se aplica la carga en el centro del panel de forma continua y a una velocidad de 20 N/s hasta su rotura.



Imagen 25: Dispositivo de ensayo a flexión de placas (Elaboración propia).

Los paneles estudiados no podrán tener una resistencia menor de 0,18 kN en base a los valores proporcionados en la Tabla 4a) Carga de rotura de los paneles de yeso tipo A de la norma UNE-EN 12859:2012 [138]). Para los resultados de este ensayo, se aplica una reducción del 53% por diferencia de distancia entre soportes (0,9 kN) y por último un 20% por diferencia de espesor de panel (0,18 kN).

### **5.2.5. Fase 5: Selección de los mejores compuestos y su aplicación en edificación.**

La selección del compuesto óptimo ha valorado dos criterios, que confluyen desde la ejecución del amasado hasta la obtención de los resultados de los diferentes ensayos realizados a cada una de las series, siendo así:

- Trabajabilidad de la amasadas
- Incremento de características mecánicas
- Mayor cantidad de fibras incorporadas

En definitiva, para determinar el compuesto más adecuado, se valoró la mejora en las características físicas y mecánicas junto con la trabajabilidad del compuesto con mayor porcentaje de fibras. Realizada esta valoración, se determinan las posibles aplicaciones para su uso en edificación del compuesto elegido, el cual será analizado con microscopía electrónica de barrido (SEM).

El ensayo de microscopía electrónica de barrido (SEM) ha sido realizado en el Laboratorio del CAI Ciencias de la Tierra y Arqueometría de la Universidad Complutense de Madrid. Para ello el microscopio electrónico de barrido ambiental utilizado ha sido el SEM-Quanta FEG-250 (Imagen 26) que permite la observación de probetas de tamaño hasta 50 mm, poco conductoras, sin tratamiento previo y, posibilita la desaceleración de electrones sobre dichas muestras, dando a conocer la morfología y textura cristalina de la muestra así como la interfaz con la granza. Las muestras ensayadas proceden de pequeños fragmentos de las probetas ensayadas a flexión y compresión, de aproximadamente 1 x 1 cm<sup>2</sup>, colocadas sobre portamuestras de acero inoxidable. Una vez colocadas en el microscopio, “el haz pasa a través de las lentes condensadoras y de objetivo, y es barrido a lo largo de la muestra por las bobinas de barrido, mientras que un detector cuenta el número de electrones secundarios de baja energía emitidos por cada punto de la superficie” (Díaz Carretero, Landa Cánovas, & Otero-Díaz, 2002), de manera que se forma una imagen SEM



Imagen 26: Ensayo SEM. (Elaboración propia)

## 6. Resultados y discusión

Los resultados de los ensayos establecidos en los apartados 5.1 y ejecutados en el apartado 5.2 y **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** son analizados en este capítulo, y comparados con los resultados de otras investigaciones.

### 6.1. Caracterización de materiales utilizados

Los ensayos previstos en el capítulo 5.1 Materiales y equipos utilizados en cuanto a materias primas prevé la caracterización física, mineralógica y química de éstas.

#### 6.1.1. Densidad aparente.

Los resultados del ensayo de la densidad de empaquetamiento del YG y E-35 son representadas en la Tabla 16.

Tabla 16: Densidad aparente YG y E-35.

Materia Prima	Muestra	Masa (g)	Volumen (cm <sup>3</sup> )	Densidad Aparente (g.cm <sup>-3</sup> )	Densidad Aparente Media (g.cm <sup>-3</sup> )	Desviación Estándar
Yeso Grueso	YG a	39.9	50	0.798	0.797	0.005
	YG b	39.5	50	0.790		
	YG c	40.1	50	0.802		
Escayola E-35	E a	33.0	50	0.660	0.663	0.005
	E b	33.7	50	0.674		
	E c	32.7	50	0.654		

La densidad de la escayola es 16.89% menor que la del yeso y al comparar con los valores obtenidos por Vidales [123] se comprueba que las densidades de los materiales son idénticas en los lotes utilizados tanto por Vidales como en esta tesis y la variabilidad de densidad de empaquetamiento entre los diferentes lotes puede ser considerada nula.

### 6.1.2. Densidad real

Los valores registrados del ensayo de densidad real mediante el ensayo de picnometría de Helio, correspondientes a las materias primas de yeso grueso (YG) y escayola (E-35), son mostrados en la Tabla 17.

Tabla 17: Ensayo de picnometría de Helio.

Materia prima	Muestra	Masa (g)	Volumen celda de muestra Vc (cm <sup>3</sup> )	Volumen celda de muestra Va (cm <sup>3</sup> )	Lectura de presión después de presurizar	Lectura de presión después de incluir Va	Volumen de la muestra Vs (cm <sup>3</sup> )	Densidad real (g.cm <sup>-3</sup> )	Densidad real media (g.cm <sup>-3</sup> )	Desviación estandar
Yeso	1	71.63	155.88	76.67	18.375	11,592	25.795	2.810		
Grueso	2	71.63	155.88	76.67	18,282	11,545	25,869	2,809	2,81	0,005
YG	3	71.63	155.88	76.67	18,285	11,542	25,871	2,811		
Escayola E-35	1	57.88	155.88	76.67	18,118	11,591	21,693	2,716		
	2	57.88	155.88	76.67	18,167	11,561	21,641	2,714	2,72	0,005
	3	57.88	155.88	76.67	18,242	11,551	21,615	2,718		

La densidad del YG es 3.30% mayor que la de la escayola E-35. Al comparar estos valores con Vidales [123], podemos determinar que estos valores son los mismos y que la densidad real de los lotes utilizados pueden ser considerados constantes.

### 6.1.3. Análisis termogravimétrico.

Este capítulo expone los análisis termogravimétricos las muestras de materia prima (YG, E-35, Fibra comercial y fibra reciclada), y analiza el comportamiento entre YG y escayola E-35 y por otro lado los dos tipos de fibras de polipropileno comercial y reciclada.

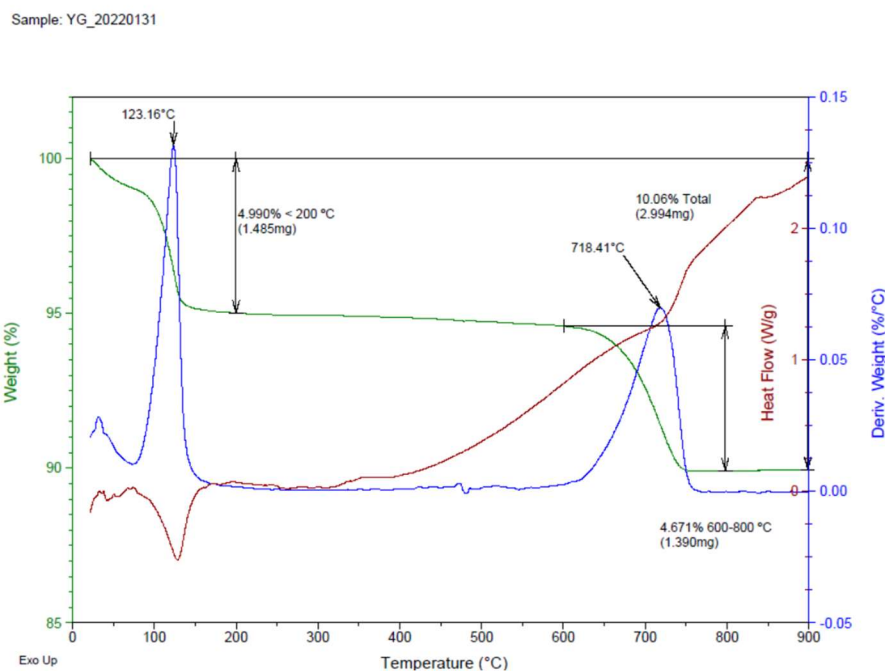


Figura 12: Análisis termogravimétrico de YG.

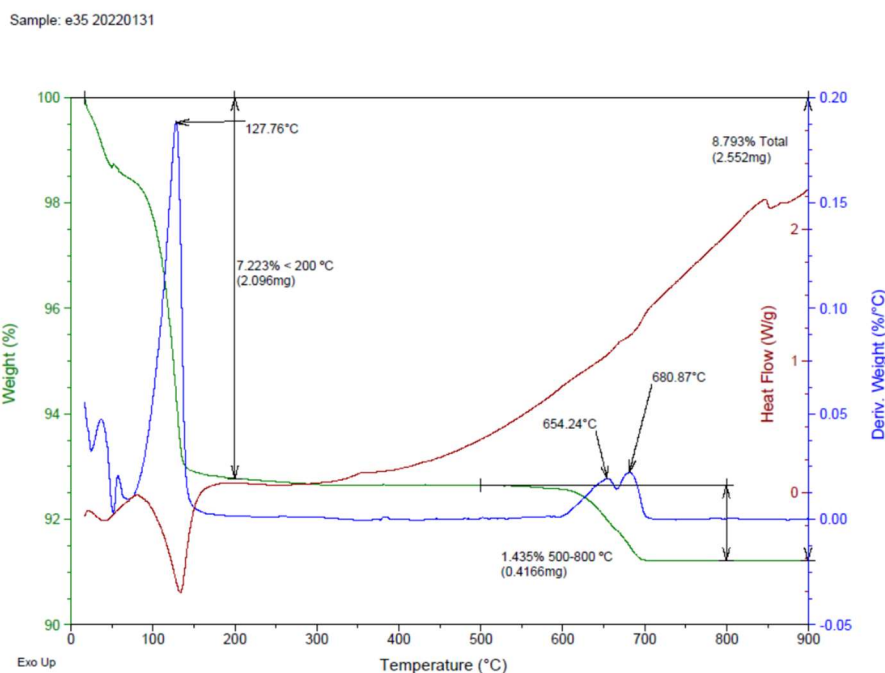


Figura 13: Análisis termogravimétrico de E-35.

La Figura 12 y Figura 13 muestran el comportamiento termogravimétrico del YG y E-35 respectivamente. En estas gráficas son determinadas tres fases muy marcadas en las pérdidas de masa de los dos materiales. Una pérdida continua inicial de masa debido a la pérdida de humedad inicial de 1.899% de masa en el YG y 2.15% en la muestra de E-35 hasta alcanzar los 100°C asociada a la pérdida de humedad interna de las muestras y que esta pérdida de masa continúa hasta los 200°C donde se estabiliza. La pérdida de masa entre los 100°C y 200°C se asocia a la deshidratación del yeso dihidrato y se transforma en hemihidrato ( $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ ). En este ensayo se determina que el hemihidrato formado es del tipo hemihidrato  $\beta$ , dado que no se ha aplicado presión en el momento de la combustión. La segunda fase, corresponde al intervalo comprendido entre los 200°C hasta los 600°C rango en el que se produce una reacción exotérmica de fase de la anhidrita III a la anhidrita II, en la que no existe pérdida de masa considerable, pero si existe un flujo térmico positivo en la segunda mitad de este intervalo.

En la tercera y última fase, que en el caso del YG corresponde desde los 600°C hasta los 800°C y de los 600°C a los 700°C en el caso de la escayola E-35 se observa una pérdida de masa correspondiente a 4.67% en el caso del YG mientras que la pérdida de masa correspondiente a la E-35 es de 1.44%. Esta pérdida de masa es causada por la presencia de algún aditivo incorporado de origen orgánico, dado que químicamente no existen cambios estructurales que expliquen esta pérdida de masa.

Los valores obtenidos en estos ensayos concuerdan con los obtenidos por Vidales. La variación mínima en la pérdida inicial de humedad es explicada por la avidez del yeso y de la escayola que tiene por la humedad ambiente. Estas gradientes en los valores pueden ser considerados nulos, dado que no representa ningún condicionante para reducir la relación A/Y o interfiera en las condiciones iniciales de fraguado de estos materiales.

La Figura 14 muestra el comportamiento termogravimétrico de las fibras de polipropileno comerciales, la Figura 15 muestra el comportamiento termogravimétrico de las fibras de polipropileno recuperadas de Residuos de construcción y demolición.

## Resultados y discusión

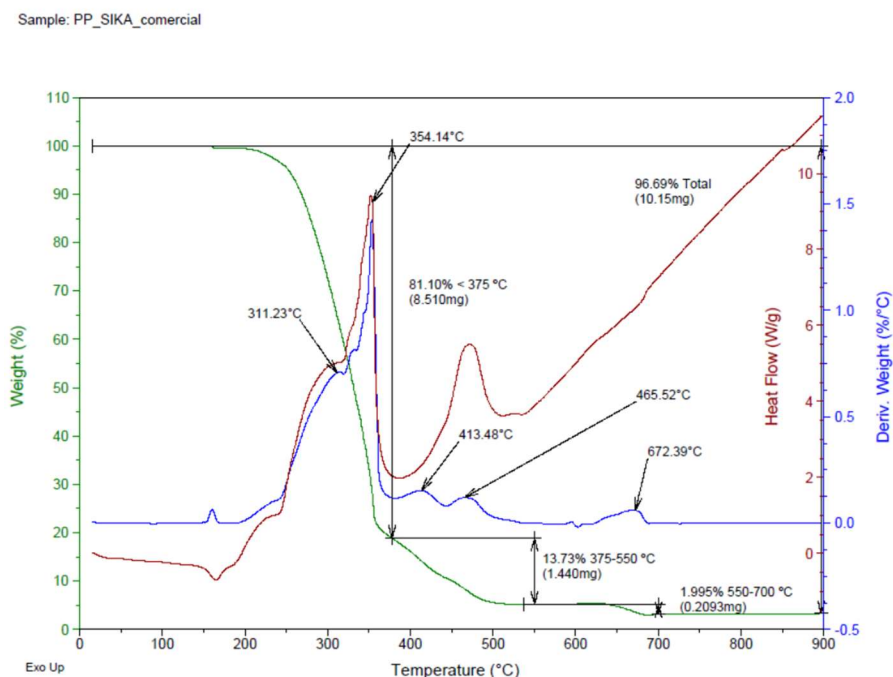


Figura 14: Análisis termogravimétrico de Fibras comerciales.

En los registros de la pérdida de masa de las fibras comerciales se puede observar que a partir de los 160°C se produce una pérdida de masa hasta los 375°C con pendiente uniforme llegando a una pérdida de 81.10% de masa. En este proceso, la pérdida de masa es debido a la combustión de componentes orgánicos. En el intervalo de los 375°C hasta los 550°C la pérdida de masa se ralentiza y se registra 13.73% de pérdida de masa. Desde los 550°C existe un tramo donde la pérdida de masa se estabiliza hasta los 630°C. La última pérdida de masa se da en el intervalo desde los 630°C hasta los 700°C, punto en el cual se registra una pérdida total de masa de 96.69%.

Con respecto a la curva de la derivada del peso, se puede observar que en el rango de los 200°C y 700°C existen varios picos que corresponden a distintas descomposiciones térmicas de oxidación de componentes de la muestra, todos estos picos corresponden con un proceso exotérmico del material.

La derivada del peso con la temperatura presenta varios máximos en el intervalo de 200°C a 700°C; cada uno de ellos correspondería a la descomposición térmica oxidativa de un componente de la muestra, lo que se corresponde claramente con la heterogeneidad de la misma (mezcla de polímeros), presentando todos ellos carácter exotérmico, coincidiendo con el criterio de Ehrenstein en su análisis de térmico de los plásticos [139].

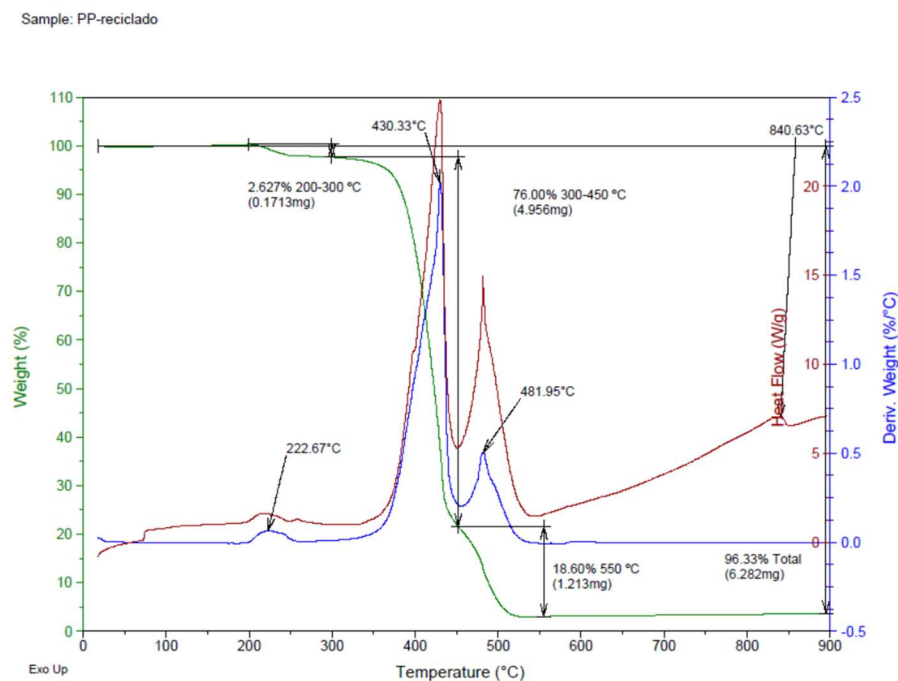


Figura 15: Análisis termogravimétrico de fibras recicladas RCD

## Resultados y discusión

Las fibras de polipropileno recicladas presentan estabilidad térmica hasta los 200°C donde inicia una pérdida de masa inicial contenida de 2.63% hasta los 300°C, En el rango desde los 300°C hasta los 481.95°C presenta una pérdida de masa pronunciada de 76.00% y desde este último punto hasta los 550°C continúa perdiendo masa a una velocidad algo menor hasta los 96.33% de masa, donde la pérdida de masa de la muestra se estabiliza.

Al observar la curva de la derivada del peso, encontramos en el rango de los 300°C y 481.95°C picos que corresponden a las descomposiciones térmicas de oxidación de esta muestra específica y todos estos picos corresponden con un proceso exotérmico del material.

Al igual que en el análisis de las fibras comerciales, la derivada del peso con la temperatura presenta varios máximos en el intervalo de 300°C a 481.95°C; los mismos que corresponderían a la descomposición térmica de oxidación de un componente del espécimen ensayado.

Los dos tipos de fibras utilizados tienen valores específicos de tramos de temperatura donde se realizan las pérdidas de masa, también varía la velocidad con la que tiene lugar dicha pérdida y los valores de la energía necesaria para estas interacciones, dado que los fabricantes no son los mismos y cada uno de los materiales tienen sus componentes y cadenas específicas.

### 6.1.4. Difracción de rayos X

En la Figura 16 se observan los resultados de los ensayos de la difracción de rayos X en el yeso grueso (YG) y la escayola E-35. En las dos muestras analizadas se puede identificar al sulfato de calcio hemihidratado ( $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ ), y no se observa la presencia de dihidrato.

Ninguna de las fibras ha sido analizada en este ensayo, dado que éstas no pueden ser comprimidas y compactadas, lo que lleva a que estas fibras se desplacen de la probeta de ensayo.

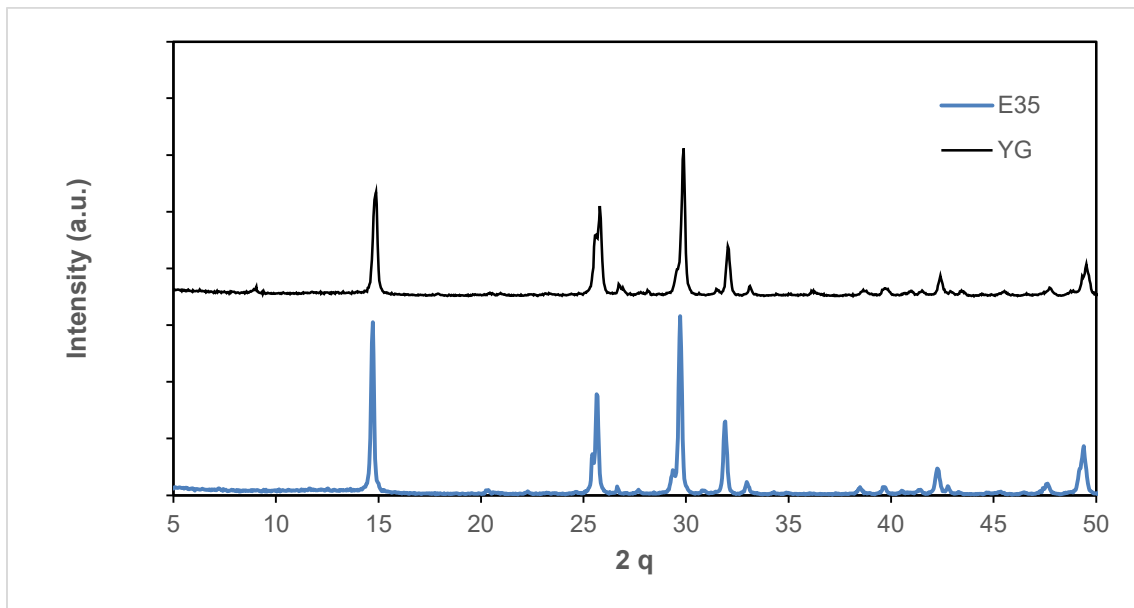


Figura 16: Resultados de difracción de rayos X. (Elaboración propia)

## 6.2. Caracterización de los compuestos

Los morteros a base de yeso y escayola con adiciones de fibras de polipropileno han sido ensayados tanto en estado fresco, así como una vez moldeado y endurecido.

### 6.2.1. Estado fresco

En el estado fresco son obtenidas las relaciones agua/yeso de la mezcla tanto por el método de saturación como por el método de fluidez de la pasta. Todas las mezclas realizadas han sido ensayadas en la mesa de sacudidas, mientras que el método de saturación ha sido aplicado únicamente en las mezclas de referencia que no incorporan fibras.

Tabla 18. Fluidez de la pasta. Fuente: Elaboración propia.

Muestra	Saturación	Relación A/Y	Ø (mm)
<b>YG REF</b>	0.67	0.75	195
<b>YG-1-K</b>		0.75	190
<b>YG-1-R</b>		0.75	190
<b>YG-2-K</b>		0.75	187
<b>YG-2-R</b>		0.75	187
<b>YG-3-K</b>		0.75	183
<b>YG-3-R</b>		0.75	183
<b>YG-4-K</b>		0.75	181
<b>YG-4-R</b>		0.75	181
<b>E REF</b>	0.70	0.75	185
<b>E-1-K</b>		0.75	181
<b>E-1-R</b>		0.75	181
<b>E-2-K</b>		0.75	179
<b>E-2-R</b>		0.75	179
<b>E-3-K</b>		0.75	176
<b>E-3-R</b>		0.75	176
<b>E-4-K</b>		0.75	173
<b>E-4-R</b>		0.75	173

La relación agua/yeso de las muestras de referencia dan valores de 0.67 para el YG y de 0.70 para la escayola E-35. Esta relación agua/yeso es la ideal en el caso de no incorporar fibras a la pasta, mientras que con la incorporación de fibras el escurrimiento de cada una de las mezclas es menor, razón por la cual la relación agua/yeso a utilizar en este estudio se determina que es de 0.75 la cual permite radios de escurrimiento adecuados y que cumplen con la normativa.

Estos resultados son representados en la Tabla 18 y se comprueba que los diámetros de escurrimiento se encuentran entre los 150mm y los 210mm para los dos tipos de material base.

#### **6.2.1.1. Trabajabilidad de la pasta**

El **incremento del 3% de fibras poliméricas** de origen comercial, así como las recuperadas presentan una trabajabilidad adecuada, sin que presenten masas de fibras enlazadas y el vertido y enrasado de los diferentes moldes se realiza con normalidad sin que presenten un decremento en el rendimiento de mano de obra desde la elaboración de las probetas hasta la ejecución de los ensayos correspondientes realizados. Este porcentaje de incorporación se presenta como adecuado a la hora de ser aplicado **en obra** ya que el rendimiento en el mezclado y aplicación en la proyección o moldeo de elementos constructivos no se vería condicionado.

La trabajabilidad de la mezcla se ve reducida al realizar la incorporación del **4% de fibras**, ya sea de origen comercial o recuperada. Esto se debe a que las fibras comienzan a enlazar con sus pares, presentando masas de dimensiones mayores a las probetas y que dificultan el vertido de la masa en los moldes correspondientes de los diferentes ensayos. Es necesario tener en cuenta que estas mezclas serán ejecutadas en obra por operarios que el objetivo más importante es realizar un trabajo adecuado en el menor tiempo posible y si tienen problemas a la hora del amasado, proyección o moldeo en obra, dicho fin no podrá ser alcanzado. La incorporación de 4% de fibras puede ser el óptimo en condiciones de laboratorio donde se pueden obtener ambiente, herramientas y materiales óptimos para la incorporación de estos porcentajes de fibras.

En trabajos previos en los cuales se incorporan diferentes longitudes de fibras, se observa que la longitud idónea de la fibra es de 12mm, dado que los resultados obtenidos presentan decrementos de los resultados obtenidos cuando mayor es la longitud de la fibra, como puede verse en el estudio de Deng y Furuno [90] en el

cual investiga la influencia de la longitud de la fibra en la incorporación de fibras de polipropileno en paneles de yeso, mientras que del Río establece que la longitud idónea de la fibra debe estar en el rango de 6mm;24mm [106] para obtener los resultados con mejores resistencias y trabajabilidad adecuada siendo las muestras con fibras de 12mm la que mejores resultados han generado.

### 6.2.2. Estado endurecido

Una vez que las probetas han sido desmoldadas y conservadas según la normativa vigente, éstas han sido ensayadas física, mecánica y térmicamente, así como observadas en el microscopio de barrido de electrones. A continuación, se analiza cada uno de los ensayos realizados a las probetas endurecidas.

#### 6.2.2.1. Densidad de probetas desecadas.

Los resultados de la densidad ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) de las probetas desecadas se muestran en la Tabla 19 y en la Figura 17.

Tabla 19. Valores de la densidad. (Elaboración propia)

Base	Fibra	Ref	1%	2%	3%	4%
YG	Comercial	1.044	1.039	1.036	1.025	1.021
	Recuperada		1.024	1.016	1.000	1.000
E-35	Comercial	1.054	1.045	1.042	1.023	1.018
	Recuperada		1.041	1.034	1.016	1.010

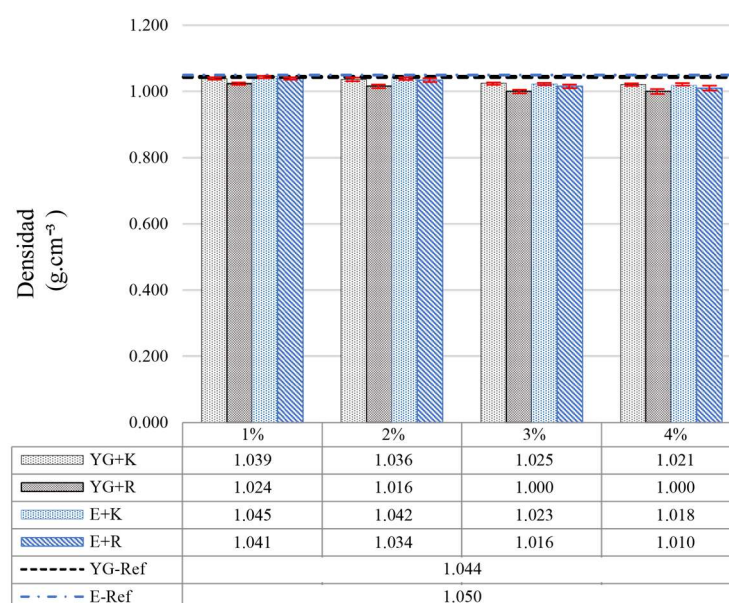


Figura 17: Densidad de muestras desecadas. (Elaboración propia)

Al analizar los datos de la

Tabla 19 y la representación de la Figura 17 se determina que los compuestos con mayor densidad son la correspondientes a las referencias (con valores de densidad de 1.044 en YG REF y 1.054 en E REF) y la densidad disminuye con la adición de fibras.

Los compuestos con la mayor reducción de densidad corresponden a YG-3-R y YG-4-R con un valor de  $1.0 \text{ g/cm}^3$  lo que significa un decremento del 4.21%. En cuanto a la escayola, el compuesto con menor densidad corresponde a la amasada E-4-R con una reducción de la densidad del 3.80%.

Por otra parte, al comparar los compuestos con fibras comerciales y recicladas, se observa que con la incorporación de fibras recicladas se obtienen densidades menores en el rango del -1.44% al 2.05% en los compuestos de yeso y el rango de -1.16% al 1.98 % en los morteros de escayola. La dispersión de los resultados resulta mínima, comprendidos en rangos comprendidos en el -0.41% hasta el 0.63% en morteros de yeso, mientras que el rango determinado en los morteros de escayola comprende -0.12% hasta el 0.58%, lo que representa que tanto la dispersión como la densidad de las muestras es uniforme en todas las series realizadas.

La relación inversa observada entre la cantidad de fibras adicionadas y la densidad de los composite, coincide con los datos obtenidos por estudios realizados por Romaniega [124], Vidales [123], y otros estudios previos,[72] [140],[141],[142] que también observan densidades mayores a la hora de incorporar residuos a las muestras ensayadas.

### 6.2.2.2. Dureza superficial tipo Shore C

Las medias determinadas de la dureza Shore C son expuestas en la Tabla 20 y representadas en la Figura 18.

Tabla 20. Valores de la dureza Shore tipo C. (Elaboración propia)

Base	Fibra	Ref	1%	2%	3%	4%
YG	Comercial	69	68	68	69	68
	Recuperada		58	59	61	62
E-35	Comercial	75	74	78	79	83
	Recuperada		78	82	82	85

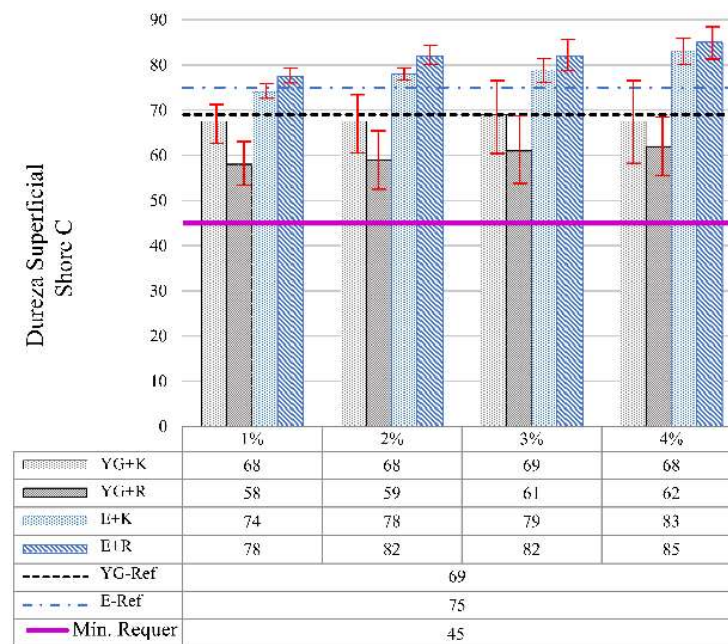


Figura 18: Valores de la dureza Shore tipo C. (Elaboración propia)

El análisis de la Tabla 20 y de la gráfica de la Figura 18, permite determinar que la incorporación de fibras comerciales y recicladas en las probetas de matriz yeso grueso genera un descenso en la dureza superficial de todas las muestras, siendo las probetas de referencia YG REF y E REF las que mayor dureza presentan.

El descenso inicial en la muestra YG-1-K es de 18.90%, que se ve acortado hasta los 11.29% de la muestra YG-4-K. La incorporación de fibras en matriz de yeso grueso y fibras comerciales no presenta variación en los valores, mientras que al incorporar fibras recuperadas existe un descenso inicial del 17.24% en la muestra YG-1-K que al aumentar el porcentaje de fibras esa diferencia con la muestra de referencia es de 8.82% en la muestra YG-4-K. En el caso de las muestras de escayola se observa un incremento en las resistencias tanto en las muestras con incorporación de fibras comerciales como con fibras recuperadas. El incremento inicial de la muestra Y-1-R corresponde al 3%, mientras que el incremento de la muestra Y-4-R es llega al 14.66% con respecto a la muestra E REF. Los valores de las muestras con fibra recuperada son mayores que las muestras con fibra comercial, esta variación corresponde al 4% que se mantiene en cada uno de los porcentajes de fibra incorporados.

La dispersión de los valores en la dureza es considerable, la misma que tiene relación directa con el porcentaje de fibras que se incorpora, es así como la dispersión en YG-1-K está en el rango de +4.41% a -7.35%, mientras que la muestra YG-4-K el rango de dispersión es de 14.7% al 16.17%. La dispersión de los valores en las muestras de escayola es más pequeñas que la del yeso grueso, teniendo rangos que van desde los +2.70% al -2.59%, mientras que en la muestra E-1-K el rango es del +6.41% al -6.4%.

Los valores de la dureza Shore C obtenidos en esta tesis concuerdan con el estudio que realiza Vidales [123] en su tesis doctoral, así como Santos Jiménez [22], del Río Merino [143], Romaniega [144], en los cuales las muestras presentan una relación directa entre el porcentaje añadido de residuos y la mejora de la dureza. No obstante, estudios como los de Gutiérrez González [113, 142, 145], Oliver Ramírez [111], presentan reducciones de la dureza Shore C del material.

### 6.2.2.3. Resistencia a flexión.

Los valores obtenidos en los ensayos realizados a las probetas 40x40x160cm de las series correspondientes son representados en la Tabla 21 y en la Figura 19 y se representa adicionalmente los valores requeridos por la norma UNE-EN 13279-2:2014.

Tabla 21. Valores de la resistencia a flexión. (Elaboración propia)

Base	Fibra	Ref	1%	2%	3%	4%
YG	Comercial	3.03	2.01	2.18	2.38	2.72
	Recuperada		3.04	3.50	3.84	3.98
E-35	Comercial	4.71	4.57	4.65	4.70	4.90
	Recuperada		4.92	5.42	5.58	6.56

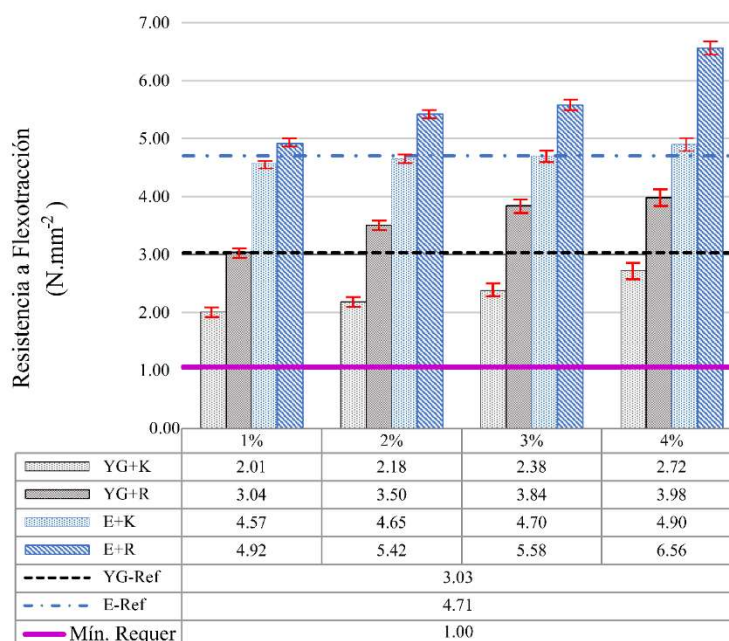


Figura 19: Valores de la resistencia a flexión. (Elaboración propia)

Al analizar los datos obtenidos y la gráfica antes referidas podemos establecer que la resistencia de todas las amasadas tanto en YG como en E-35 superan el valor mínimo establecido en la normativa. Las mezclas correspondientes a la matriz de yeso grueso YG y fibras comerciales descienden inicialmente en la muestra Y-1-K

el 15.13% con respecto a la probeta de referencia y posteriormente presenta una relación directa entre la adición de fibras y la resistencia a flexión llegando a decremento final de 10.23% en la muestra Y-1-K. La incorporación de fibras recuperadas presenta un mejor comportamiento que las muestras con fibras comerciales. La variación existente entre las muestras de fibra comercial y las de fibras recuperadas está en +33,06% al agregar 1% de fibras y +43.15% al agregar 3% de fibras. La incorporación de fibras añadidas guarda relación directa con el incremento de la resistencia a flexión y se observa también que en las muestras con incorporación de fibras recuperadas esta relación presenta una mayor pendiente.

Por otro lado, las muestras de E35 presentan una pendiente mínima de incremento al incorporar fibras comerciales, mientras que esta pendiente aumenta al incorporar fibras recuperadas. La incorporación de fibras comerciales presenta un decremento inicial de las resistencias -2.97% en la muestra E-1-K hasta verse reducido al -0.21% de la muestra E-3-K, mientras que en la muestra E-4-K presenta un incremento de 40.3%. Entretanto, la incorporación de fibras recuperadas presenta un incremento inicial de 4.45% en la muestra E-1-R hasta el 39.27% de la muestra E-4-R.

La dispersión de los valores se ve incrementada de manera lineal según se incrementa el porcentaje de fibras añadidas, tanto comerciales como recuperadas, sin que exista una diferencia marcada entre el origen de estas fibras. El rango de esta dispersión en las muestras de 1% de fibras corresponden al +0.99% en la muestra Y-1-K y -0.97% en la muestra Y-2-K, mientras que en las muestras de YG y E35 con 4% de fibras incorporadas, el rango comprendido está en el +1.06% en la muestra Y-4-K y -1.05% en la muestra Y-4-R.

Estos resultados tienen el mismo comportamiento en el incremento de resistencia obtenidos en estudios como los de Oteiza con incrementos del 20% [75], del Río Merino en rangos de 20%;93% [143], Romaniega en el rango 38%;70% [144], no obstante estos valores son opuestos a los obtenidos por Vidales [123] en los cuales el decremento de la resistencia a flexión está en el rango de -49.28%;-15.51% o los datos de Gutiérrez González [113, 142, 145] con decrementos del 2.8% al 90%, Oliver Ramírez [111] con decrementos en el rango -24.24%; 28.30%

**6.2.2.4. Resistencia a compresión.**

Los datos obtenidos en los ensayos son representados en la siguiente

Tabla 22 y Figura 20 , la cual contempla también el valor mínimo establecido por la norma vigente y de cumplimiento obligatorio.

Tabla 22. Valores de la resistencia a compresión. (Elaboración propia)

Base	Fibra	Ref	1%	2%	3%	4%
YG	Comercial	5.51	3.06	2.92	2.87	2.81
	Recuperada		5.33	4.56	4.26	3.45
E-35	Comercial	10.87	10.80	10.60	9.51	9.32
	Recuperada		10.85	10.65	9.57	9.38

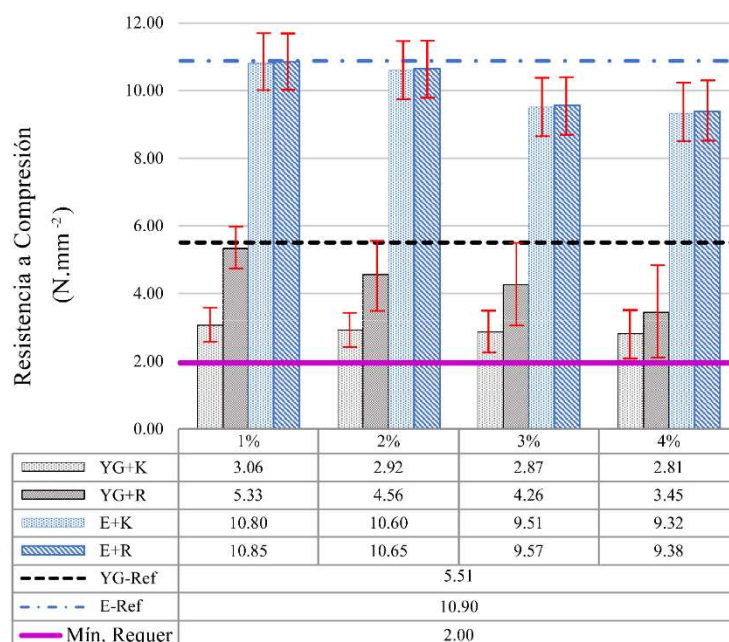


Figura 20: Valores de la resistencia a compresión. (Elaboración propia)

La incorporación de fibras presenta una relación inversa con la resistencia a compresión tanto en la matriz de yeso grueso YG como en la escayola E-35. La pendiente de decremento de resistencias es mas pronunciada en las muestras que

incorporan fibras recuperadas, mientras que las muestras de YG con fibras comerciales presenta una pendiente mas moderada. En las muestras de matriz E35 los valores presentan iguales valores tanto para fibras comerciales como para fibras recuperadas, obteniendo valores muy parecidos.

En cuanto a los compuestos de YG, el mayor decremento de la resistencia a compresión corresponde a las muestra Y-4-K con el 44.46% mientras que el resultado con mejor resistencia corresponde al Y-1-R con el 3.27% de decremento. En cuanto a los compuestos de E35, podemos decir que el decremento es casi nulo con 0.46% en la muestra E-1-R, mientras que el compuesto con el decremento mayor de resistencias corresponde al compuesto E-4-K con 14.50% menos de resistencia que la muestra de referencia E REF.

La dispersión de los resultados es mayor en los compuestos a base de YG comparadas con las muestras elaboradas con E35 y el porcentaje de incorporación de fibras presenta una relación directa con el rango de dispersión. La dispersión de la muestra Y-1-K presenta el rango de dispersión más pequeño -13.8%;13.2%, mientras que el rango más amplio corresponde a la muestra Y-4-R -40.74%;39.98%. La dispersión de valores en los compuestos de matriz E35 varía mínimamente del rango -7.40%;7.35%.

Los resultados obtenidos en este estudio coinciden en el comportamiento con aquellos obtenidos en los estudios realizados por del Río Merino que reducen la resistencia hasta en el 50% [143], García Santos en el rango presenta reducciones en el rango de -31%;-5%[110], Parres en el rango de -6%;9% [91], Vidales en el rango de -55.39%;-26.08% [123], por el contrario, Romaniega presenta un incremento de las resistencias a compresión en el rango 14%;34% [144].

### 6.2.2.5. Adherencia (Resistencia al arrancamiento)

Los datos obtenidos en los ensayos son representados en la Tabla 23 y en la Figura 21. Los requisitos mínimos establecidos para este ensayo son 0.2 N/mm<sup>2</sup>.

Tabla 23. Valores de la adherencia. Elaboración propia.

Base	Fibra	Ref	1%	2%	3%	4%
YG	Comercial	0.374	0.358	0.333	0.304	0.272
	Recuperada		0.323	0.304	0.288	0.255
E-35	Comercial	0.48	0.439	0.414	0.404	0.398
	Recuperada		0.402	0.386	0.388	0.381

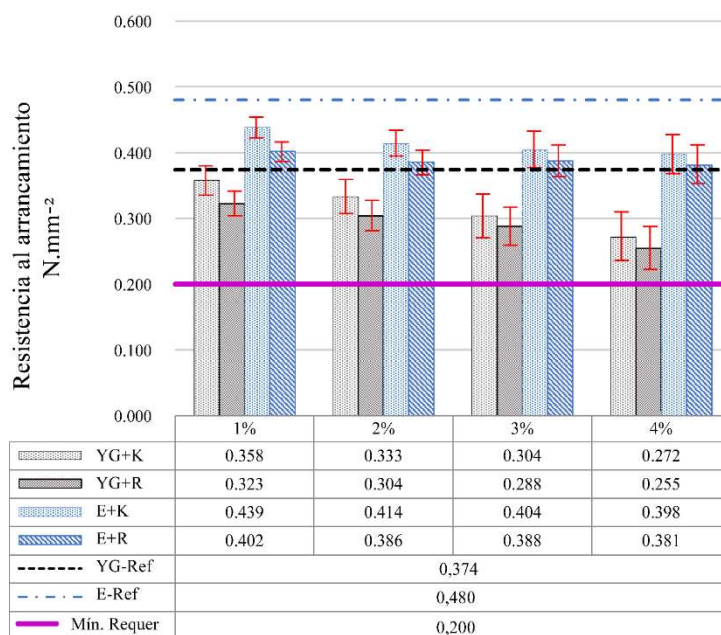


Figura 21: Valores de la adherencia. (Elaboración propia)

Analizados los datos y el gráfico podemos indicar que en este ensayo también se cumple en todas las muestras ensayadas con lo mínimo establecido por la normativa vigente. La incorporación de las fibras tanto en matriz YG cómo E35 presenta una relación inversa con la adherencia.

Los valores correspondientes a la matriz de yeso YG representa un decremento inicial de 4.28% en la muestra Y-1-R, y el valor más bajo corresponde a la incorporación de fibras del 4% en la muestra Y-4-K. Por otra parte, las muestras con matriz E35 el valor mas alto corresponde a la muestra E-1-K con un decremento del 16.25% mientras que el valor más bajo corresponde a la muestra E-4-R con un decremento del 20.63% respecto a la muestra E-REF.

La dispersión de los valores presenta una relación directa con la cantidad de fibras incorporadas en las muestras. La mayor dispersión corresponde a la muestra de Y-4-R con el rango de -13.72%;13.70%. El valor más bajo obtenido en la muestra de yeso grueso con incorporación de fibra recuperada Y-4-R es de 0.217N/mm<sup>2</sup>, el mismo que se acerca al valor mínimo requerido por la normativa vigente (0.20N/mm<sup>2</sup>).

Los resultados obtenidos en este estudio concuerdan con otros estudios realizados por Romaniega que presenta reducciones en el rango -35.53%;9.51% [144], Gutiérrez González [113, 142, 145] con decrementos con el rango -95.22%;-28.26%, o Gallardo en el rango -45%;-23% [146]y Vidales en el rango de -44.83%;-17.24% [123].

### 6.2.2.6. Coeficiente de conductividad térmica

Los valores obtenidos en los ensayos son representados en la y Figura 22 , junto con el valor tabulado por la norma UNE-EN 13279-1:2009 [48].

Tabla 24. Valores de conductividad térmica. (Elaboración propia)

Base	Fibra	Ref	1%	2%	3%	4%
YG	Comercial	0.166	0.171	0.173	0.178	0.194
	Recuperada		0.168	0.169	0.175	0.188
E-35	Comercial	0.194	0.201	0.205	0.210	0.213
	Recuperada		0.197	0.201	0.206	0.210

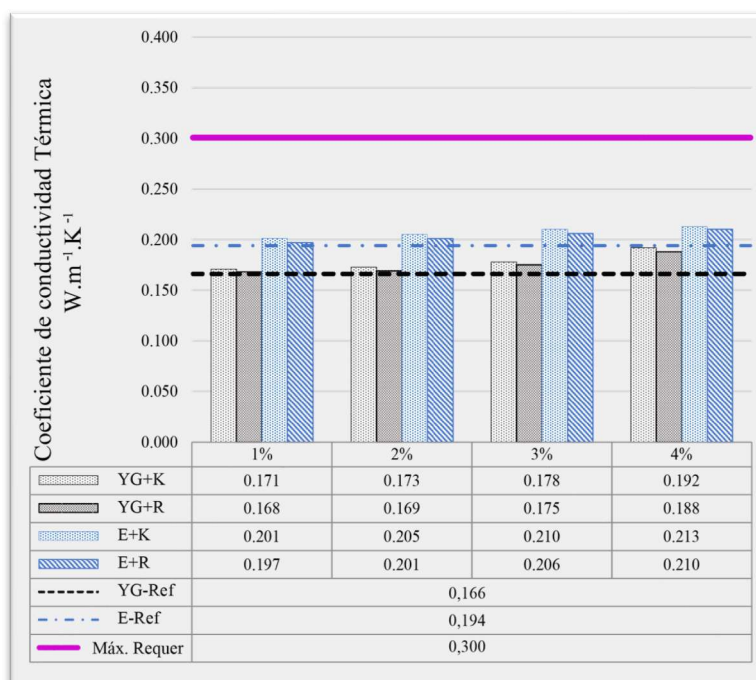


Figura 22: Valores del coeficiente de conductividad térmica. (Elaboración propia)

El apartado 5.1.4 de la norma UNE-EN 13279-1:2009 [48] determina que la conductividad térmica del material será como máximo de 0.30 W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>.

Podemos observar que el coeficiente de conductividad térmico de las muestras a base de YG y E35 tiene una relación directa con la incorporación de fibras poliméricas, tanto comerciales como recuperadas.

La incorporación de fibras comerciales presenta un incremento del coeficiente de conductividad térmico respecto a las fibras recuperadas que se cuantifican en 1.8% en la muestra con incorporación de 1% de fibras hasta el 2.12% en las muestras con incorporación de 4% de fibras. mientras que en los compuestos de matriz E35, el incremento es de 1.79% en las muestras de 1% de fibras incorporadas hasta el 2.13% en las muestras con 4% de fibras.

La muestra con el coeficiente de conductividad térmica más bajo corresponde a la muestra Y-1-R con un incremento del 1.20% mientras que el valor con el mayor incremento corresponde a la muestra Y-4-K con 14.46% de incremento respecto a la muestra de referencia Y REF. Las muestras con matriz E35 presentan un incremento mínimo de 1.55% en la muestra E-1-R y el mayor incremento lo presenta en la muestra E-4-K con 9.79% con respecto a la muestra E REF.

Los valores obtenidos en esta tesis presentan valores contrarios a los obtenidos por Romaniega [144], donde la valores del coeficiente de conductividad térmica presentan un descenso en todos los materiales incorporados en relación directa con los porcentajes añadidos. Estudios realizados por del Río Merino los valores están dentro del rango 0.13;0.20 [143], mientras que Gutiérrez González presenta valores dentro del rango 0.10;0.26 [142].

### 6.2.2.7. Ascensión por capilaridad

Los datos obtenidos de las en los ensayos son representados en la siguiente tabla y gráficos.

Tabla 25. Valores de ascensión por capilaridad. (Elaboración propia)

Base	Fibra	Ref	1%	2%	3%	4%
YG	Comercial	83	81	79	78	75
	Recuperada		78	75	71	70
E-35	Comercial	56	56	50	48	46
	Recuperada		54	50	46	44

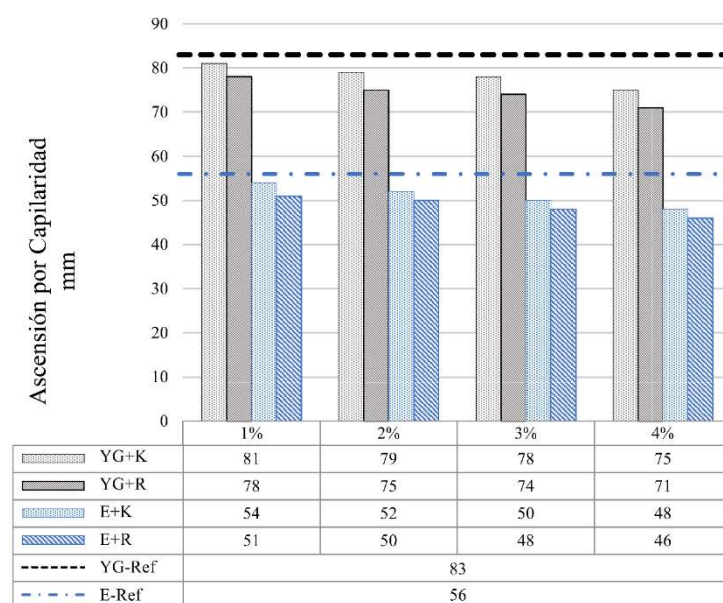


Figura 23: Valores de ascensión por capilaridad. (Elaboración propia)

En cuanto a la ascensión de agua por capilaridad podemos afirmar que la ascensión por capilaridad tanto en las muestras a base de yeso grueso como en las muestras con base de escayola tiene relación inversa con la incorporación de fibras poliméricas. Adicionalmente se observa que en las muestras de YG con la incorporación de fibras recuperadas presenta 4.82% de decremento en la ascensión por capilaridad que las muestras con incorporación de fibras comerciales, mientras

que en las matrices de E35 el porcentaje de reducción llega a ser el 3.57%, por tanto la incorporación de fibras recuperadas poseen mejores resultados en las muestras de YG que en las matrices de E35.

La muestra de yeso grueso con la mayor reducción de ascensión corresponde a la muestra Y-4-R con 10.66% de decremento así como la muestra de escayola con mayor reducción de ascensión corresponde a la muestra E-4-R con 10mm de reducción que representa 21.73% de variación.

Los resultados obtenidos en este estudio concuerdan con los resultados obtenidos por Vidales que presenta reducciones de la ascensión en el rango de -62.89% y 43.36% [123], Alameda et al [96] con reducciones de ascensión por capilaridad del 40%, o Romaniega que presenta diferente comportamiento en función del porcentaje de residuos incorporados, presentes en el rango -1.97% y 36.84%.

#### 6.2.2.8. Resistencia al choque/impacto

El ensayo de resistencia al choque los valores hallados son mostrados en la Tabla 26 y la Figura 24.

Tabla 26. Valores de dureza superficial de placas. (Elaboración propia)

Base	Fibra	Ref	1%	2%	3%	4%
YG	Comercial	1.72	1.39	1.29	1.20	1.14
	Recuperada		1.39	1.29	1.21	1.14
E-35	Comercial	56	0.99	0.98	0.96	0.95
	Recuperada		0.99	0.98	0.96	0.95

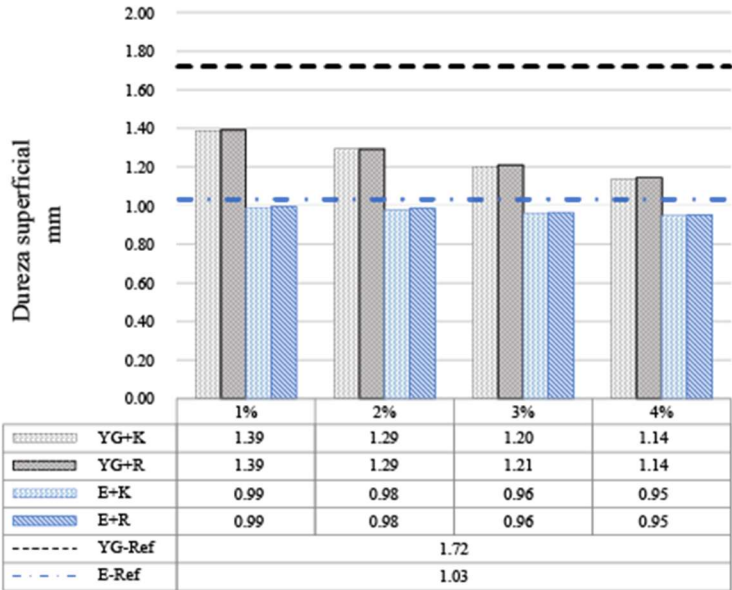


Figura 24: Valores de Dureza superficial de placas. (Elaboración propia)

Al ensayar las placas se puede observar que las muestras sin adición de fibras poliméricas tienen una fractura frágil, dado que con los primeros impactos estas placas rompen y a pesar de ello, se ha realizado el cálculo para encontrar la profundidad de la esfera en 1.72mm para las muestras Y Ref y de 1.03 para la muestra de E Ref., mientras que en las muestras que contienen fibras poliméricas la fractura de las placas se realizan después de varios impactos y las partes no se dispersan debido a la unión que genera las adición de fibras. Podemos afirmar también que el origen de las fibras no presenta diferencias en la profundidad de la huella y que el comportamiento es el mismo entre las muestras comparadas.

La incorporación de fibras tiene una relación inversa con el tamaño de la huella marcada, es así como en las muestras con matriz de yeso grueso la huella se ve reducida inicialmente en 19.18% en las muestras Y-1-K/ Y-1-R hasta llegar al 33.72% en la muestra Y-4-K/ Y-4-R. Las muestras de matriz escayola presentan un decremento de la huella en 3.88% en las muestras E1-K/E1-R y un decremento final de 7.77% en las muestras E4-K/E4-R

Este decremento de la impresión de la huella muestra concordancia con los resultados obtenidos por Vidales que presenta reducciones de la huella de la esfera en -37.61%;-13.68% [123] así como los valores obtenidos por Domínguez y Gúmez que tiene un comportamiento bueno a la hora de añadir residuos de tetra-brik [147]

### 6.2.2.9. Resistencia a la flexión de paneles.

Los datos obtenidos en los ensayos a las probetas 400x300x10mm son representados en la Tabla 27 y en la Figura 25.

Tabla 27. Flexión de paneles. (Elaboración propia)

Base	Fibra	Ref	1%	2%	3%	4%
YG	Comercial	0.160	0.178	0.190	0.247	0.296
	Recuperada		0.181	0.192	0.249	0.301
E-35	Comercial	0.381	0.419	0.499	0.627	0.647
	Recuperada		0.421	0.501	0.642	0.683

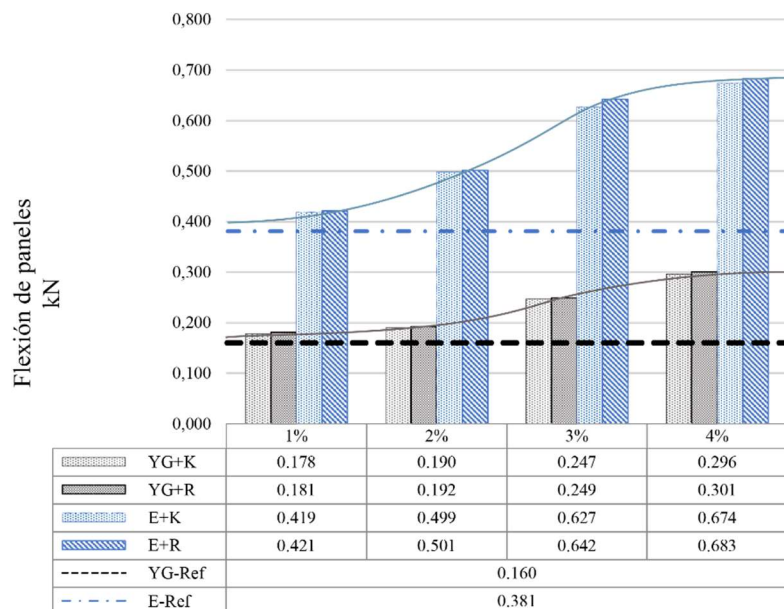


Figura 25: Flexión de paneles. (Elaboración propia)

Al analizar los datos obtenidos podemos establecer que la flexión de paneles tanto en las muestras a base de yeso grueso como en las muestras con base de escayola presenta una relación directa con la incorporación de fibras. tanto en las muestras de matriz YG cómo las muestras con matriz E35. La diferencia entre los valores de la resistencia a flexión de fibras recuperadas y comerciales es mínima 1.68%% al incorporar fibras al 1%, mientras que al incorporar 4%, la diferencia es de 1.69% lo que indica que la incorporación de fibras recuperadas genera una variación constante entre los distintos porcentajes de fibras incorporados.

## Resultados y discusión

La incorporación de fibras recuperadas presenta un ligero incremento en la resistencia a flexión de paneles frente a las muestras de fibras comerciales, que se ven reflejados en 11.25% de la muestra Y-1-K y el 13.13% de incremento en la muestra Y-1-R con respecto a la muestra de referencia Y REF. las muestras con mayor incremento son aquellas con 4% de incorporación de fibras, el mejor resultado corresponde a la muestra Y-4-R con un incremento del 76.90%. el incremento de las resistencias en las matrices del escayola presenta una mayor variación que las muestras de YG. L

El valor mas bajo de las muestras con matriz de E35 corresponde a la muestra fE-1.K, con un incremento de 11.25% respecto a la muestra de referencia E35 mientras que el valor mas alto corresponde a la muestra E-4-R con el 88.13% de incremento de la resistencia a flexión en paneles comparado con la muestra E REF.

Los valores mas bajos en las muestras con matriz de E35 corresponde a la muestra E-1-R con 10,50% de incremento frente a la muestra de referencia E35, adicionalmente, el valor mas alto corresponde a la muestra E-4-R con 79.27% de incremento frente la muestra de referencia E REF.

Los valores obtenidos en esta tesis corresponden con los resultados obtenidos por Vidales que presenta variaciones dentro del rango de -43.66% y -37.68%[123], al incorporar residuos plásticos procedentes de cables eléctricos.

**6.2.2.10. Porosimetría de mercurio**

Los resultados obtenidos al realizar los ensayos de porosimetría de mercurio de las muestras de escayola son reflejados en la Tabla 28 y la Figura 26.

Tabla 28. Propiedades obtenidas por la porosimetría de mercurio en los compuestos seleccionados. (Elaboración propia)

Muestra	Volumen total de intrusión (cm <sup>3</sup> ·g <sup>-1</sup> )	Diámetro medio de poro (nm)	Densidad Bulk a 0.0345 MPa (g·cm <sup>-3</sup> )	Densidad aparente (g·cm <sup>-3</sup> )	Porosimetría (%):
E-REF	0.4478	2658.56	1.199	2.286	50.5887
E-1R	0.4225	2691.86	1.180	2.267	50.9189
E-2R	0.4132	2238.32	1.164	2.243	51.1225
E-3R	0.4399	1903.04	1.166	2.214	51.9008
E-4R	0.4379	1878.21	1.151	2.180	52.4699
E-1K	0.4921	2486.44	1.077	2.266	51.9605
E-2K	0.4862	1969.27	1.071	2.262	52.0925
E-3K	0.4717	1930.61	1.062	2.209	52.9787
E-4K	0.4704	1900.26	1.039	2.175	53.0660

Podemos observar que las muestras fabricadas con fibras comerciales presentan mayor volumen de intrusión que las muestras elaboradas con fibras recuperadas e inclusive la muestra de referencia. El valor de la muestra que más volumen de intrusión presenta, es la muestra E-1K que con el 7,6% más que la muestra de referencia E REF. Por otro lado, el diámetro medio del poro se ve modificado debido a la incorporación de fibras en las muestras realizadas. Las muestras que incorporan fibras recuperadas presentan diámetros mayores que las muestras realizadas con fibras comerciales. El incremento promedio del diámetro ronda el 1.5% más en las fibras comerciales que en las fibras recuperadas. Al analizar la distribución del tamaño del poro sigue un patrón muy similar en todas las muestras estudiadas recogiendo valores de 40 µm. Con base

en la clasificación de IUPAC propuesta por Rouquerol et al. [148] [149] y se establece que estos poros deben denominarse macroporos. La distribución de los poros queda reflejada en la Figura 26.

La densidad aparente de la referencia es de  $1.199 \text{ g.cm}^{-3}$  que se ve reducida al incorporar fibras poliméricas, tanto recuperadas como comerciales. Las fibras comerciales presentan una densidad menor que las muestras con fibras recuperada, comprendida en el rango de 9.56%(1% de fibras) y el 10.08% (4% de fibras). La muestra con menor densidad  $1.039 \text{ g.cm}^{-3}$  corresponde a la incorporación de 4% de fibras comerciales (E-4K). Los valores de este ensayo confirma lo establecido tanto por Flores MEdina y Barbero-Barrera donde incorpora fibras de polipropileno y filler de grafito isostático reciclado [87], Vidales et al. Al analizar la factibilidad del uso de RCD como agregados de bajo impacto ambiental en conglomerantes [99], o también la investigación de yeso reciclado en conjunto con residuos plásticos para mejora de suelo [150] en sus correspondientes estudios donde se refleja la relación inversa de la cantidad de poros y la densidad Bulk es decir, a mayor cantidad de poros, menor va a ser la densidad Bulk.

Teniendo en cuenta que el origen de los poros es debido a la cristalización que se forman de la hidratación del hemihidrato y transformación a yeso dihidratado en forma de agujas largas, cortas y de láminas al igual que en los estudios de Vidales al incorporar residuos plásticos de cables mediante criterios de economía circular [123], y Piña et al. al incorporar fibras de lana de roca recuperadas des RCD para el refuerzo de conglomerantes [125], la incorporación de fibras poliméricas afecta de manera muy ligera en la distribución del tamaño de estos poros. El menor volumen de poro es explicado por el tamaño característico del entramado poroso que está presente en menor cantidad en las muestras con mayor cantidad de fibras poliméricas incorporadas.

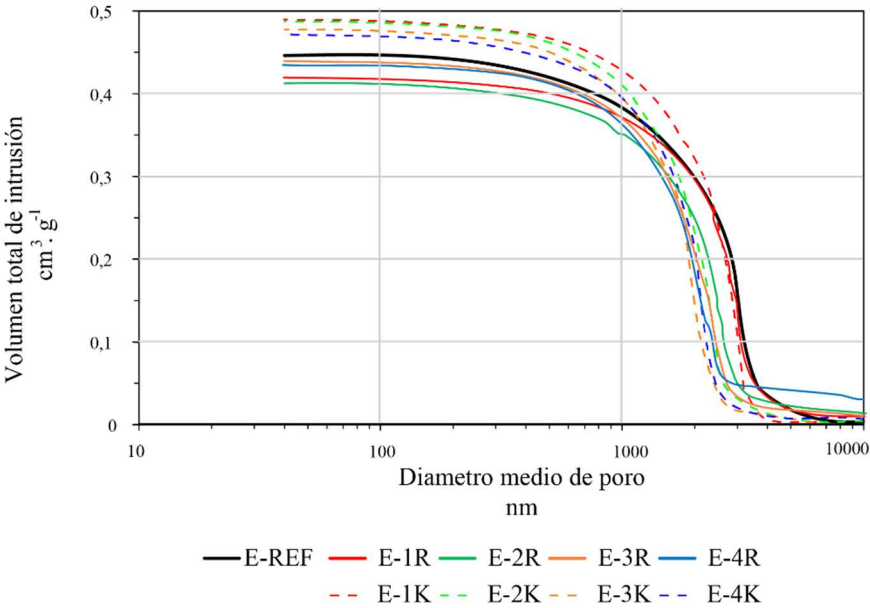


Figura 26: Distribución de tamaño de poros acumulado. Muestras con fibra recuperada. (Elaboración propia)

### 6.3. Selección de los mejores compuestos y su aplicación en edificación.

Para el estudio microscópico, han sido seleccionadas las muestras de los compuestos con 3% y 4% de fibras poliméricas comerciales y recuperadas. Como se puede observar en la Figura 27 de la relación entre la densidad y la flexión, las serie 3% y 4% son las series con valores más altos de todas las series con incorporación de fibras ensayadas, ya sea si la matriz es de yeso o de escayola.

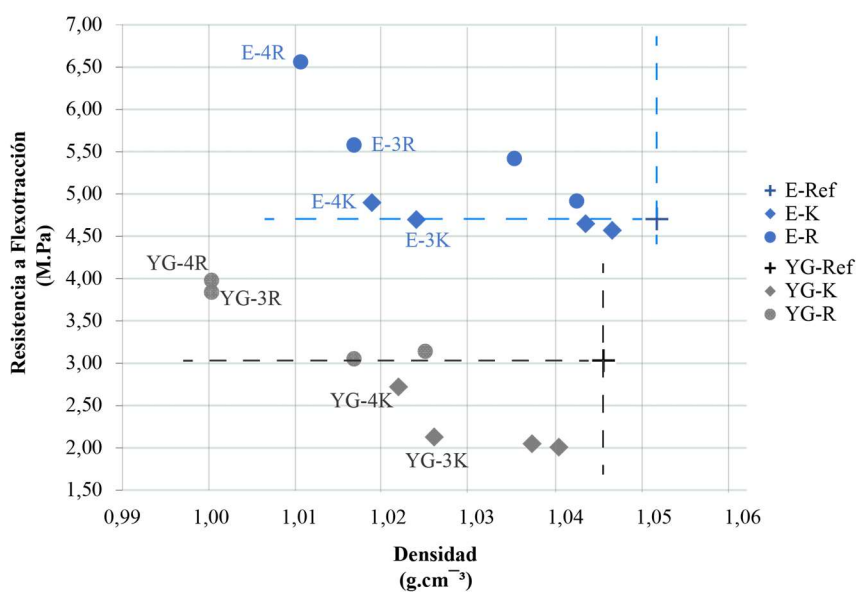


Figura 27: Relación entre densidad y resistencia a flexión

De igual manera, la Figura 28 muestra la relación entre la densidad y la resistencia a compresión en la cual se observa que los compuestos con incorporación de fibras al 1% y 2% presentan los resultados más representativos de las series con incorporación de fibras. En el análisis de la relación entre densidad y resistencia a flexotracción se ha determinado que los mejores valores son los que corresponden con los porcentajes de 3% y 4%, adicionalmente al tener en cuenta que los resultados a compresión de los compuestos a 4% están muy cercanos al límite mínimo marcado por la normativa vigente, la elección de las muestras con incorporación de 3 % de fibras es la más adecuada para el análisis mediante el escáner de barrido electrónico.

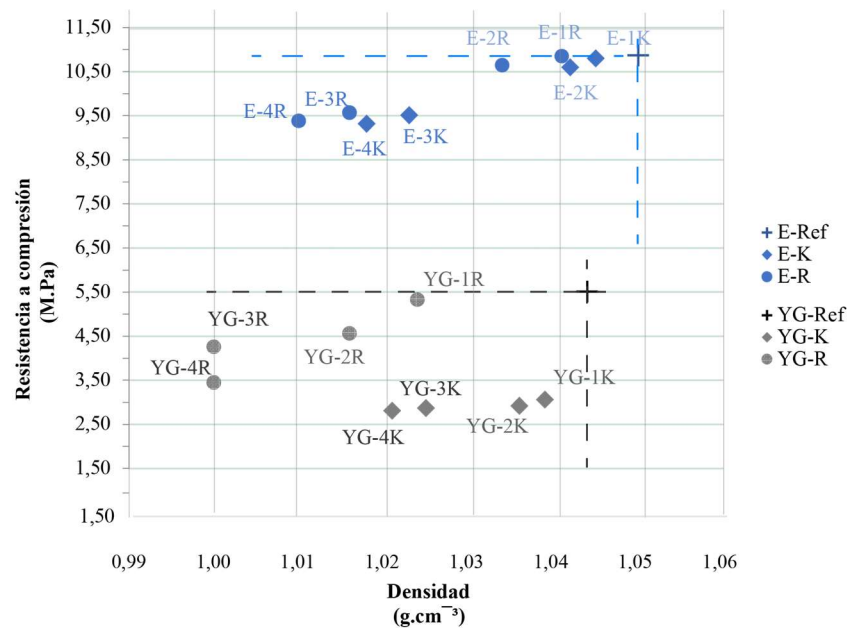


Figura 28: Relación entre densidad y resistencia a flexión

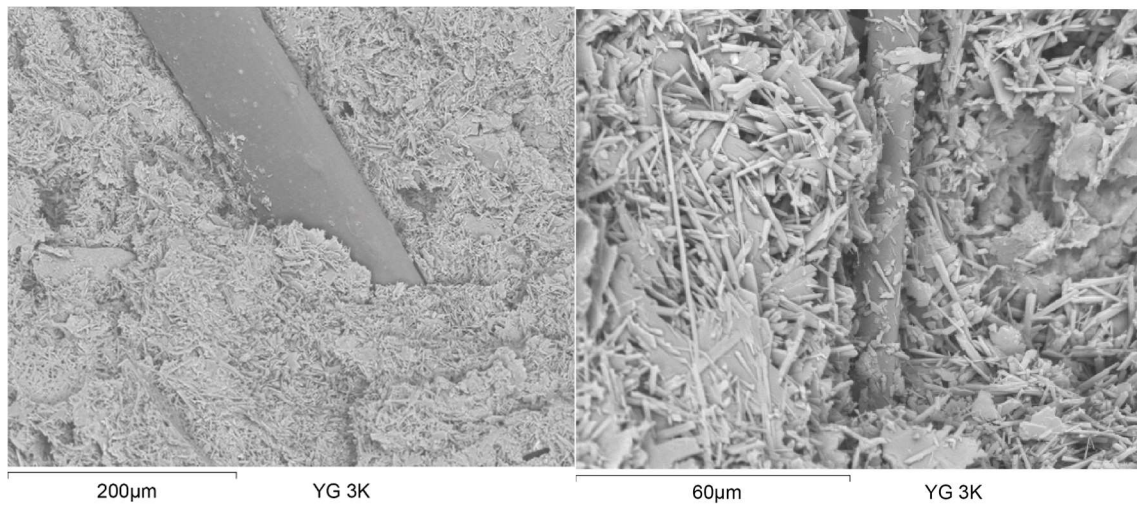


Imagen 27: Microscopía de la muestra YG 3K 200µm (izquierda) 60µm(derecha).

En la Imagen 27 podemos observar a la izquierda la cristalización del dihidrato en anhídrita, donde se aprecia patrones de cristalización aleatorios en los cuales están influenciados por la presencia de impurezas como cenizas, partículas de minerales de sílice donde interactúa con la formación de cristales de la anhídrita. Podemos observar también que la interacción de la fibra con los cristales formados presenta

## Resultados y discusión

una tenue sombra, lo que indica que la adherencia de la matriz de YG a la fibra no es tan potente.

En la imagen de la derecha podemos comprobar las diferentes formas de cristalización, tanto en lascas, agujas cortas y largas que dan paso al patrón aleatorio que fue comentado en el párrafo anterior y es reflejado en la parte izquierda de la Imagen 28

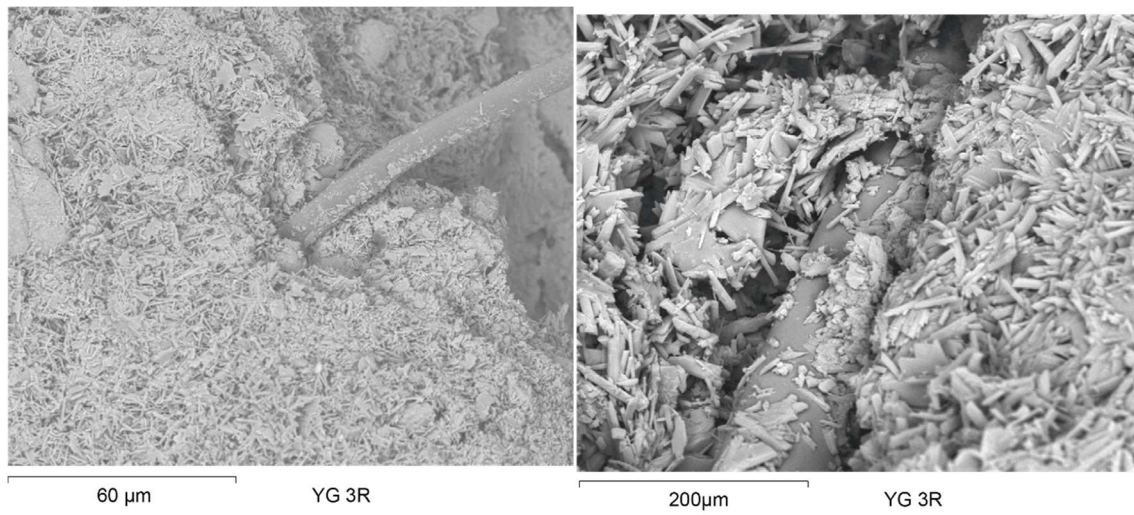


Imagen 28: Microscopía de la muestra YG 3R 200 $\mu$ m (izquierda) 60 $\mu$ m(derecha).

La Imagen 28 muestra el mismo comportamiento en el patrón de cristalización que la Imagen 27 con la diferencia de que la cantidad de cristales adheridos en la fibra es mayor. La zona derecha de la imagen nos permite visualizar la interacción de los cristales de la matriz junto con los que se han adherido a la fibra.

A pesar de la aleatoriedad de la cristalización de la matriz formada por cristales con formas de lascas, agujas cortas y largas, la interacción con la fibra polimérica es mejor, dado que hace un solo cuerpo y el funcionamiento del material compuesto hace que sea mucho más homogéneo que si lo comparamos con el compuesto de fibra polimérica comercial.

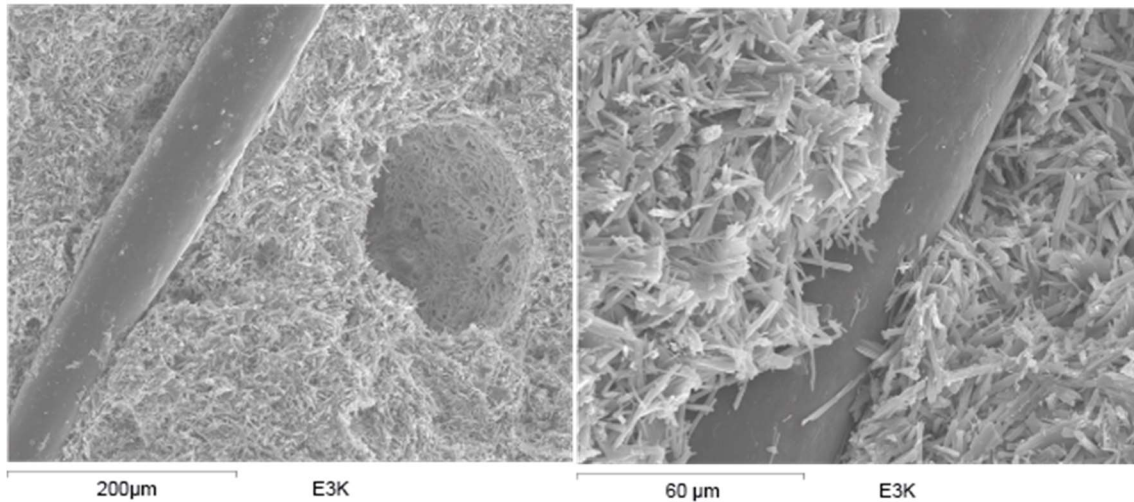


Imagen 29: Microscopía de la muestra E3K 200 $\mu$ m (izquierda) 60 $\mu$ m(derecha).

La Imagen 29 muestra la cristalización de la muestra de escayola con 3% de fibras poliméricas comerciales. En la parte izquierda se puede observar la cristalización uniforme con presencia de una oquedad que se presume presencia de aire en el momento de verter la mezcla en el molde. En la parte derecha de la imagen se pueden observar muy pocos cristales adheridos a la superficie de la fibra, lo que genera una adherencia menor en las fibras comerciales que en las fibras recuperadas.

Tanto en la Imagen 30 cómo en la Imagen 29 se puede confirmar la ausencia de impurezas, lo que confirma la gran pureza de la escayola en la cantidad de anhídrita con la que está conformada, junto a la presencia de cristales y fibras, sin que presenten oquedades ni espacios entre las fibras y la matriz de cristalización de la anhídrita.

La Imagen 30 expone la cristalización de la muestra de escayola con 3% de fibras poliméricas recuperadas de la muestra E3R. Se puede observar con claridad la matriz con una gran pureza a la hora de la cristalización del dihidrato. A la derecha de la Imagen 30 podemos observar la distribución de la cristalización del yeso dihidratado. La cristalización presenta formas de lajas y agujas, con dimensiones entre los 5-10 micras.

La imagen derecha permite observar una cantidad moderada de cristales adheridos en la superficie de la fibra, lo cual indica la mejora de la adherencia con respecto a las fibras comerciales.

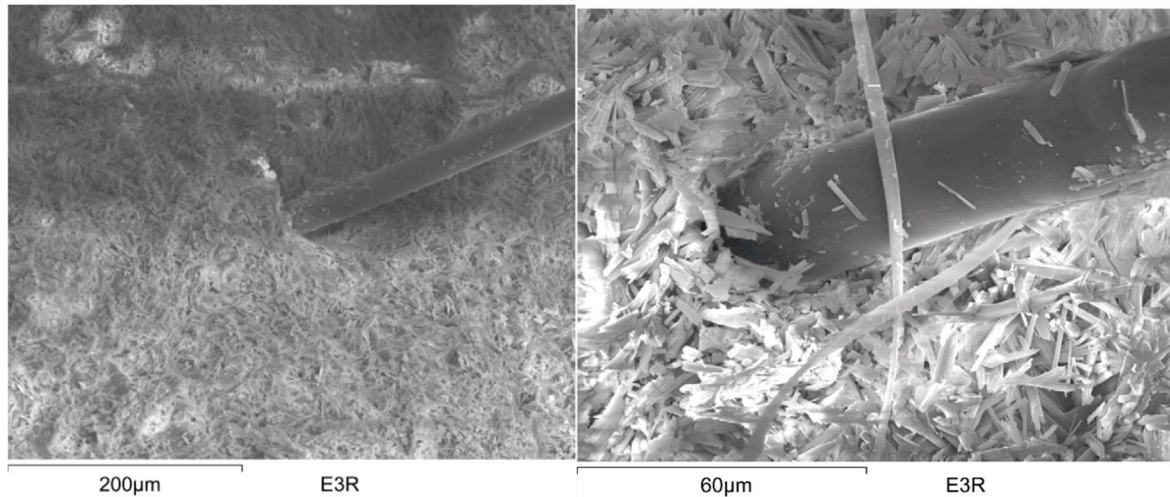


Imagen 30: Microscopía de la muestra E3R 200µm (izquierda) 60µm(derecha).

### 6.3.1. Aplicaciones de los compuestos seleccionados de yeso con fibras.

Una vez analizados los resultados obtenidos en los diferentes ensayos de los compuestos a base de yeso/escayola y fibras de polipropileno con origen en RCD, las aplicaciones adecuadas de estos compuestos son listadas a continuación:

- Revestimientos de tabiquería mediante sistema de proyectado mecánico sobre el soporte o mediante la aplicación manual de las mezclas. Esta aplicación está basada en la necesidad de compuestos que soporten choques puntuales e impactos por el uso del edificio, donde la muestra adecuada para esta aplicación es las de YG o E35 con 4% o 3% de fibras recuperadas.
- Elaboración de paneles machihembrados, destinados a tabiquería interior de separación de estancias o huecos de instalaciones. En estos paneles la muestra mas idónea es la de matriz YG o E35 con 3% de fibras recuperadas, las cuales poseen valores adecuados a la resistencia a compresión. La mezcla de 4% de fibras recuperadas deberá ser evitada ya que la resistencia a compresión está muy cerca al límite de la normativa vigente.
- Elaboración de placas macizas destinadas a falsos techos en sistemas modulares con estructura metálica o esparto. La mezcla idónea para este sistema constructivo es la de matriz E35 con incorporación de 4% de fibras recuperadas E-4-R al aprovechar la mayor resistencia a la flexión en paneles.

- Elaboración de placas aligeradas destinadas a falsos techos continuos con anclaje al forjado mediante esparto y yeso/escayola. En estos elementos constructivos la mezcla con mejor rendimiento es la de matriz E35 con 4% de fibras recuperadas E-4-R aprovechando su resistencia a la flexión en paneles que es la mayor de las ensayadas
- Fabricación de molduras de yeso/escayola. La incorporación de fibras poliméricas hace que tanto los elementos lineales como los superficiales resistan mejor la manipulación de éstos y no presenten una rotura frágil. Para estos elementos constructivos las mejores mezclas son E-3-R, dado que las resistencias tanto a compresión como a flexión son adecuadas y el rendimiento de la ejecución de estas molduras es mayor que las muestras con 4% de fibras debido a la mejor trabajabilidad de esta mezcla.

## 7. Conclusiones

Las conclusiones a las que se llegan en esta tesis están guiadas por los objetivos marcados en el capítulo 4 Objetivos y sustentados tanto en el capítulo 2 Estado de la cuestión cómo en los resultados de los ensayos realizados a las muestras elaboradas.

La conclusión principal a la que se llega con lo anteriormente expuesto es: las fibras de polipropileno procedentes de RCD pueden ser incorporadas en morteros y pastas de yeso y escayola, en porcentajes de hasta el 4%, evitando el desalojo de estos materiales a vertederos y su posterior incineración o desalojo en los vertederos, lo que conlleva a la reducción del impacto ambiental.

A continuación, se relacionan las distintas conclusiones alcanzadas para cada objetivo específico propuesto:

Objetivo 1:

- Tanto el yeso como la escayola utilizados presentan valores que están dentro del rango de valores establecidos en la normativa vigente. Teniendo en cuenta los valores obtenidos en ensayos de la materia prima en otros estudios se puede indicar que estadísticamente los valores son iguales que los obtenidos en este estudio.
- Las fibras recuperadas presentan homogeneidad de composición química y características físicas y mecánicas que convierten en apropiadas para la incorporación en composites de yeso y escayola.

Objetivo 2:

- Las investigaciones previas establecen que el tamaño máximo de fibra polimérica apta para una trabajabilidad adecuada es de 12mm. Esto evita la generación de aglomeraciones incómodas de fibras que reducen el tiempo de moldeado y generan una pérdida de tiempo total de fabricación de probetas.

- El porcentaje máximo de incorporación de fibras poliméricas comerciales y recuperadas ideal es del 3%. Se puede llegar a incorporar 4% de fibras con un control de calidad exhaustivo y el manejo de esta mezcla no es favorable en temas de rendimiento de mano de obra por la dificultad a la hora de la mezcla y moldeado de ésta.
- Tanto la relación agua/yeso, trabajabilidad y porcentaje de fibras incorporadas presentan independencia del origen de las fibras poliméricas, obteniendo valores muy parecidos.
- En cuanto a los resultados de los ensayos de dureza Shore C tienen un descenso inicial e incrementa en función de la incorporación de fibras.
- Los resultados de la resistencia a flexión superan lo mínimo requerido, diferenciando a las muestras con fibras recuperadas que presentan mejores valores obtenidos que las muestras con fibras comerciales. Mientras que la adherencia que presentan los compuestos se ven reducidos en función de la cantidad de fibras que sean añadidas, sin diferencias el origen de estas fibras.
- Adicionalmente los valores del coeficiente de conductividad térmica en todas las muestras presentan valores menores al marcado por la normativa. Estos valores aumentan con la incorporación de fibras entre el 3.01% al 15.66% en probetas a base de yeso y 3.60% al 9.79% en las probetas a base de escayola.
- En cuanto a la incorporación de fibras reduce el ascensión de agua por capilaridad, sin distinguir el origen de las fibras. El porcentaje de reducción de la ascensión está entre el 2.40% y 9.63% en probetas a base de yeso y 3.57% y 14.28% en probetas a base de escayola.
- En cuanto a la resistencia al choque/impacto de las muestras mejora en función del porcentaje de fibras añadidas, destacando las muestras con matriz de E35, que tienen menores penetraciones que las muestras de YG. Esta mejora corresponde al rango de 19.18% y 33.72% en probetas de yeso y 3.88% y 7.76% en probetas de escayola.
- Finalmente, la resistencia a flexión de los paneles mejora con la incorporación de fibras, las muestras elaboradas con E35 presentan un

## Conclusiones

incremento mayor que las muestras con YG. La mejora de esta resistencia corresponde al rango de 10.11% al 45.95% en probetas a base de yeso y de 11.25% a 76.90% en probetas a base de escayola.

### Objetivo 3: Compuestos más apropiados para la aplicación en obra.

- La aplicación óptima de las mezclas de yeso y escayola corresponden con la incorporación del 3% de fibras poliméricas, donde se convergen el incremento de resistencias físicas y mecánicas con el aprovechamiento óptimo del factor humano, influenciado por la trabajabilidad de la mezcla, que podrían ser utilizados en revestimientos de tabiquería, elaboración de paneles de tabiquería interior o elaboración de placas tanto macizas como aligeradas destinadas a falsos techos así como la fabricación de molduras prefabricadas.
- El análisis microscópico de las muestras idóneas seleccionadas refleja una mayor superficie de contacto entre la matriz de yeso y la fibra, lo que explica la mejora de resistencias de las muestras con incorporación de este tipo de fibras.
- Las muestras que mejores resultados físico mecánicos poseen son las muestras YG-4K e YG-4R, así como las muestras E-4K y E-4R. Estas muestras poseen las características más altas y el condicionante que la trabajabilidad de ésta se ve reducida y presenta conjuntos de fibras que no se dispersan con facilidad desde la jarra de batido hacia los moldes correspondientes.



## 8. Futuras líneas de investigación

Las futuras líneas de investigación que son planteadas después del desarrollo de esta Tesis Doctoral caben destacar las siguientes:

- Analizar las características acústicas de pastas y morteros de yeso/escayola con adición de fibras RCD y comerciales.
- Analizar el comportamiento frente al fuego de pastas y morteros de yeso/escayola con la adición de fibras RCD y comerciales.
- Analizar las características físicas y mecánicas de paneles de yeso laminado y su aplicación en la edificación, tanto en tabiquería como en falsos techos.
- Generar un proceso industrial mediante el cual se introduzcan eslingas RCD y se obtengan fibras recortadas de dimensión uniforme, separadas y homogeneizadas, listas para la utilización en la incorporación en pastas y morteros.
- Cuantificación del coste de la implementación de un sistema mecánico de fabricación de fibras poliméricas de origen RCD.
- Estudiar las características físicas y mecánicas y acústicas de morteros de cemento y/o hormigones con incorporación de fibras RCD y fibras comerciales con el establecimiento del porcentaje máximo de fibras a incorporar.
- Estudio de la cantidad de materia prima natural que puede reducirse por la incorporación de fibras de RCD y el análisis del ciclo de vida del material.
- Análisis del proceso de recuperación y reciclaje del material elaborado



## Referencias

- [1] L. A. López Ruiz, "the circular economy in the construction and demolition waste sector a review of initiatives in Spain," presented at the International congress on Project Management Engineering
- [2] T. d. R. Argüello Méndez and A. Cuchí Burgos, "Análisis del impacto ambiental asociado a los materiales de construcción empleados en las viviendas de bajo coste del programa 10 x10 Con Techo-Chiapas del CYTED," *Informes de la construcción*, vol. 60, no. 509, pp. 25-34, 2008.
- [3] J. Wang, H. Wu, H. Duan, G. Zillante, J. Zuo, and H. Yuan, "Combining life cycle assessment and Building Information Modelling to account for carbon emission of building demolition waste: A case study," *Journal of Cleaner Production*, vol. 172, pp. 3154-3166, 2016/5// 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.11.087.
- [4] E. Commission. "Waste statistics - 2020." [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Waste\\_statistics#Total\\_waste\\_generation](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Waste_statistics#Total_waste_generation) (accessed noviembre 11, 2023).
- [5] K. Chen, J. Wang, B. Yu, H. Wu, and J. Zhang, "Critical evaluation of construction and demolition waste and associated environmental impacts: A scientometric analysis," *Journal of Cleaner Production*, vol. 287, 2021/3// 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.125071.
- [6] E. Wittig Victoria, "Quantifying the impact of current and future tropospheric ozone on tree biomass, growth, physiology and biochemistry a quantitative meta - analysis Enhanced Reader," *Global Change Biology*, vol. 15, no. 10.1111/j.1365-2486.2008.01774.x, 2009.
- [7] A. Dimoudi and C. Tompa, "Energy and environmental indicators related to construction of office buildings," *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 53, no. 1-2, pp. 86-95, 2008/12// 2008, doi: 10.1016/j.resconrec.2008.09.008.
- [8] M. del Rio Merino, "Dispersebility degree of glass fibre E in the mechanical behaviour and workability of plaster," *Materiales de la construcción*, vol. 51, no. 261, pp. 33-44, 2001/3// 2001, doi: <https://doi.org/10.3989/mc.2001.v51.i261.378>.
- [9] D. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto, "Informe de

- inventario nacional de gases de efecto invernadero," 2022.
- [10] "EIONET ES-2022-GHG-Inventory-MMR-(1990-2020)-March 2022," ed.
- [11] J. Ahmad, A. Majdi, A. F. Deifalla, N. Ben Kahla, and M. A. El-Shorbagy, "Concrete Reinforced with Sisal Fibers (SSF): Overview of Mechanical and Physical Properties," *Crystals*, vol. 12, no. 7, doi: 10.3390/cryst12070952.
- [12] Y. Li, Y.-W. Mai, and L. Ye, "Sisal fibre and its composites: a review of recent developments," *Composites Science and Technology*, vol. 60, no. 11, pp. 2037-2055, 2000/08/01/ 2000, doi: [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(00\)00101-9](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(00)00101-9).
- [13] *Directive 2008/98/EC*, 2008.
- [14] A. Alcaide Tur, *Residuos sólidos urbanos. Una consecuencia de la vida*. 2012.
- [15] *Decisión de la Comisión 2014/955/UE*, 2014.
- [16] P. Villoria Sáez and M. Osmani, "A diagnosis of construction and demolition waste generation and recovery practice in the European Union," *Journal of Cleaner Production*, vol. 241, 2019/12// 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.118400.
- [17] A. Hidalgo and C. Alonso, "Evaluación del impacto ambiental debido a la lixiviación de productos de base cemento," in *I Jornadas de Investigación en Construcción (Instituto de Ciencias de la Construcción "Eduardo Torroja"*, ed. Madrid, 2005, pp. 571-581.
- [18] Eurostat, "Management of waste by waste management operations and type of material," in *2023*, ed, 2023.
- [19] *Ley 7/2022*, 2022.
- [20] España, "Orden MAM/304/2002, de 8 de febrero por la que se publican las operaciones de valorización y eliminación de residuos y la lista europea de residuos," *Boletín Oficial del Estado*, no. 19 de febrero de 2002 (43), pp. 6494-6515, 2002.
- [21] Ine, "Generación de residuos agregados por tipos de residuos, peligrosidad y sectores de actividad económica," ed, 2020.
- [22] R. Santos Jiménez, "Reciclaje de residuos de construcción y demolición (RCD) de tipo cerámico para nuevos materiales de construcción sostenibles," Doctor, Universidad Politécnica de MADrid, 2018, 2018.
- [23] C. European, "COM (2010) A strategy for smart, sustainable and inclusive growth Europe 2020," 2010.

## Referencias

- [24] *Accelerating the transition to a climate prepared and resilient Europe. Interim Report of the Mission Board for adaptation to climate change, including societal transformation*, 2020.
- [25] C. European, "COM (2011)571 final. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and social Committee and the Committee of the regions," ed, 2011, pp. 31-31.
- [26] E. Consejo Superior de Arquitectura Técnica de, *Ratios Nacionales. Generación de residuos de construcción y demolición*. 2020, pp. 32-32.
- [27] P. Villoria Sáez and M. d. R. M. Paola Villoria Sáez, "Sistema de gestión de residuos de construcción y demolición en obras de edificación residencial . Buenas prácticas en la ejecución de obra Tesis Doctoral," ed, 2014, pp. 1-397.
- [28] *Directiva (UE) 2018/851 del Parlamento Europeo y del Consejo, por la que se modifica la Directiva 2008/98/CE sobre los residuos*, 2018.
- [29] A. y. M. a. Ministerio de Agricultura, "Plan estatal marco de Gestión de Residuos (PEMAR)," in *2015*, ed, 2015, pp. 117395-117397.
- [30] H. Yuan, "Key indicators for assessing the effectiveness of waste management in construction projects," *Ecological Indicators*, vol. 24, pp. 476-484, 2013/1// 2013, doi: 10.1016/j.ecolind.2012.07.022.
- [31] C. A. Velis, "Circular economy and global secondary material supply chains," in *Waste Management and Research* vol. 33, ed: SAGE Publications Ltd, 2015, pp. 389-391.
- [32] D. Lazarevic, E. Aoustin, N. Buclet, and N. Brandt, "Plastic waste management in the context of a European recycling society: Comparing results and uncertainties in a life cycle perspective," *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 55, no. 2, pp. 246-259, 2010/12// 2010, doi: 10.1016/j.resconrec.2010.09.014.
- [33] D. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto, "Estrategia Española de Economía Circular. ESPAÑA CIRCULAR 2030." [Online]. Available: [www.miteco.es](http://www.miteco.es)
- [34] M. Geissdoerfer, S. N. Morioka, M. M. de Carvalho, and S. Evans, "Business models and supply chains for the circular economy," *Journal of Cleaner Production*, vol. 190, pp. 712-721, 2018/7// 2018, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2018.04.159.
- [35] C. European, "Closing the loop. An EU action for the Circular Economy," in *2015*, ed, 2015.

- [36] *COM (2014) 398 final*, 2014.
- [37] *COM (2014) 398 final/2*, 2014.
- [38] J. Korhonen, C. Nuur, A. Feldmann, and S. E. Birkie, "Circular economy as an essentially contested concept," *Journal of Cleaner Production*, vol. 175, pp. 544-552, 2018/2// 2018, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2017.12.111.
- [39] F. Pacheco-Torgal, "Eco-efficient construction and building materials research under the EU Framework Programme Horizon 2020," *Constr. Build. Mater.*, vol. 51, no. 2014, pp. 151-162, 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.10.058.
- [40] *UNE 40901. Eslingas textiles. Seguridad. Eslingas de cintas tejidas planas, fabricadas con fibras químicas, para uso no reutilizable*, C. Asociación Española de Normalización y, 2007.
- [41] *UNE 40901 Eslingas textiles*, C. Asociación Española de Normalización y, 2007.
- [42] Vasen, "Vasen PPR piping system," ed, 2010, pp. 92-92.
- [43] N. Dominguez, "Polipropileno," ed, 2016.
- [44] H. Shent, R. J. Pugh, and E. Forssberg, "A review of plastics waste recycling and the flotation of plastics," *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 25, no. 2, pp. 85-109, 1999, doi: 10.1016/S0921-3449(98)00017-2.
- [45] E. Commission, *Horizon Europe Strategic Plan 2025-2027 Analysis*. European Commission 2023.
- [46] F. J. González Madariaga and J. L. Macia, "Mezclas de residuos de poliestireno expandido (EPS) conglomerados con yeso o escayola para su uso en la construcción," *Informes de la Construcción*, vol. 60, no. 509, pp. 35-43, 2008, doi: 10.3989/ic.2008.v60.i509.589.
- [47] Atedy, *MANUAL DE EJECUCIÓN REVESTIMIENTOS CON YESO*. 2017.
- [48] *UNE-EN 13279-1. . Yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción. Parte 1: Definiciones y especificaciones. , C. Asociación Española de Normalización y*, 2009.
- [49] E. J. Tarbuck and F. K. Lutgens, *Ciencias de la Tierra*, Octava ed. (Geology). Person, 2005, pp. 686-686.
- [50] L. Novo de Miguel, *El yeso en la construcción* (Materiales de Construcción). 1970.

## Referencias

- [51] J. A. Perez Meca. "Minerales de la colección Arqueocerámica." <https://4.bp.blogspot.com/-cJRCFAFZC I/Wwqe4c6G4 I/AAAAAAAAAFZ8/HEPGR2Ec1XkcuxEvB9vgdsHi2lpZZ1iuACLcBGAs/s1600/yeso%2Bespejuelo%2BPetrer%2BARqueocer%25C3%25A1mica.jpg> (accessed mayo 23, 2022).
- [52] D. B. Minerales. "Yesos de Castrillo del Val, Burgos." <https://mineralesdb.blogspot.com/2018/02/yesos-de-castrillo-del-val-burgos.html> (accessed mayo 13, 2022).
- [53] A. Del Ramo and Guillén. "Las Rocas- Yeso." <http://prmdos.pruebas.f-integra.org/servlet/s.SI?sit=c.365,m.2012&r=ReP-8178-DETALLE REPORTAJES> (accessed marzo 12, 2023).
- [54] "Colección de Minerales de Marte: Yeso sobre alabastro, Fuentes de Ebro (Zaragoza)." <http://mineralesagus.blogspot.com/2013/12/yeso-sobre-alabastro-fuentes-de-ebro.html> (accessed marzo 1, 2023).
- [55] "Los minerales de Dewy: Yeso Selenita." <http://mineralesdewy.blogspot.com/2011/12/yeso-selenita.html> (accessed 06, 2021).
- [56] GMM. "Rosas del desierto." <https://gmmadrid.wordpress.com/2008/10/04/excursion-de-mineralogia-a-villalbilla-y-hoyo-del-manzanares-madrid-8-11-08/> (accessed enero 10, 2022).
- [57] *UNE 102001. Aljez o piedra de yeso.*, C. Asociación Española de Normalización y, 2014.
- [58] *UNE 102001: 86. Aljez o piedra de yeso.*, C. Asociación Española de Normalización y, 1986.
- [59] *UNE 102042:14 Yesos y escayolas de construcción. Otros métodos de ensayo.*, C. Asociación Española de Normalización y, 2014.
- [60] M. C. Diez Reyes, "EN TORNO AL YESO," *Informes de la Construcción*, vol. 56, no. 493, pp. 13-18, 2004.
- [61] J. Guillén, "Nuevas aplicaciones de recursos yesíferos. Desarrollo, caracterización y reciclado," *Universidad de Alcalá*, pp. 482-482, 2005. [Online]. Available: <http://oa.upm.es/439/1/06200503.pdf>.
- [62] J. I. Escavy, "Estudio geoeconómico de formaciones yesíferas de la España peninsular con potencial de explotación minera para aplicaciones industriales," pp. 208-208, 2013.
- [63] D. Sanz Arauz, "Análisis del yeso empleado en revestimientos exteriores mediante técnicas geológicas," in *Escuela Técnica Superior de*

- Arquitectura*, ed, 2009, pp. 294-294.
- [64] S. S. Chadwick, *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. 2000.
- [65] *UNE-EN 13279-2. Yesos de la construcción y conglomerados a base de yeso para la construcción. Parte 2: Métodos de ensayo.* , Asociación Española de Normalización y Certificación, 2014.
- [66] *UNE 102042:23. Yesos y escayolas de construcción. Aljez (o piedra de yeso). Otros métodos de ensayo.* , Asociación Española de Normalización y Certificación, Madrid, 2023.
- [67] C. Asociación Española de Normalización y, "UNE 102011. Escayolas para la construcción. Especificaciones," ed, 2013, pp. 8-8.
- [68] R. Federal Ministry Republic of Austria Agriculture and Tourism, *World Mining Data 2022*. 2022, pp. 95-96.
- [69] e. Ministerio para la transición, "Producción de minerales Industriales. MINERVA," ed, 2020.
- [70] M. Serhat Başpınar and E. Kahraman, "Modifications in the properties of gypsum construction element via addition of expanded macroporous silica granules," *Constr. Build. Mater.*, vol. 25, no. 8, pp. 3327-3333, 2011/8// 2011, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.03.022.
- [71] F. Hernández-Olivares, M. R. Bollati, M. del Río, and B. Parga-Landa, "Development of cork–gypsum composites for building applications," *Constr. Build. Mater.*, vol. 13, no. 4, pp. 179-186, 1999/6// 1999, doi: [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(99\)00021-5](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(99)00021-5).
- [72] A. García Santos, "Escayola reforzada con fibras de polipropileno y aligerada con perlas de poliestireno expandido," *Materiales de Construcción*, vol. 59, no. 293, pp. 105-124, 2009/1// 2009, doi: 10.3989/mc.2009.41107.
- [73] M. del Río Merino, "Nuevas aplicaciones del corcho en el campo de la edificación," in *III Encuentro Eurocork 2005*, 2005.
- [74] Z. Jin *et al.*, "Preparation of eco-friendly functional lightweight gypsum: Effect of three different lightweight aggregates," *Constr. Build. Mater.*, vol. 400, pp. 132875-132875, 2023/10// 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132875>
- [75] I. de Oteiza San José, "Study of the Behaviour of Sisal Fiber Reinforced Hemihydrated Gypsum As Components in Low Cost Housing," pp. 135-144, 1993, doi: [doi.org/10.3989/ic.1993.v45.i425-426.1190](https://doi.org/10.3989/ic.1993.v45.i425-426.1190)
- [76] A. W. Fonseca Coelho, R. M. da Silva Moreira Thiré, and A. C. Araujo,

- "Manufacturing of gypsum–sisal fiber composites using binder jetting," *Additive Manufacturing*, vol. 29, no. June, pp. 100789-100789, 2019, doi: 10.1016/j.addma.2019.100789.
- [77] F. Iucolano, L. Boccarusso, and A. Langella, "Hemp as eco-friendly substitute of glass fibres for gypsum reinforcement: Impact and flexural behaviour," *Composites Part B: Engineering*, vol. 175, no. June, pp. 107073-107073, 2019, doi: 10.1016/j.compositesb.2019.107073.
- [78] F. Iucolano, B. Liguori, P. Aprea, and D. Caputo, "Thermo-mechanical behaviour of hemp fibers-reinforced gypsum plasters," *Constr. Build. Mater.*, vol. 185, pp. 256-263, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.07.036.
- [79] L. Boccarusso, M. Durante, F. Iucolano, D. Mocerino, and A. Langella, "Production of hemp-gypsum composites with enhanced flexural and impact resistance," *Constr. Build. Mater.*, vol. 260, pp. 120476-120476, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120476.
- [80] S. Awang Ngah, B. Dams, M. P. Ansell, J. Stewart, R. Hempstead, and R. J. Ball, "Structural performance of fibrous plaster. Part 1: Physical and mechanical properties of hessian and glass fibre reinforced gypsum composites," *Constr. Build. Mater.*, vol. 259, pp. 120396-120396, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120396.
- [81] J. Zhang, X. Guan, X. Song, H. Hou, Z. Yang, and J. Zhu, "Preparation and properties of gypsum based energy storage materials with capric acid–palmitic acid/expanded perlite composite PCM," *Energy and Buildings*, vol. 92, pp. 155-160, 2015/4// 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.01.063>.
- [82] P. Zak, T. Ashour, A. Korjenic, S. Korjenic, and W. Wu, "The influence of natural reinforcement fibers, gypsum and cement on compressive strength of earth bricks materials," *Constr. Build. Mater.*, vol. 106, pp. 179-188, 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.12.031.
- [83] A. Braiek, M. Karkri, A. Adili, L. Ibos, and S. Ben Nasrallah, "Estimation of the thermophysical properties of date palm fibers/gypsum composite for use as insulating materials in building," *Energy and Buildings*, vol. 140, pp. 268-279, 2017, doi: 10.1016/j.enbuild.2017.02.001.
- [84] L. Rovero, S. Galassi, and G. Misseri, "Experimental and analytical investigation of bond behavior in glass fiber-reinforced composites based on gypsum and cement matrices," *Composites Part B: Engineering*, vol. 194, no. February, pp. 108051-108051, 2020, doi: 10.1016/j.compositesb.2020.108051.
- [85] C. Martias, Y. Joliff, and C. Favotto, "Effects of the addition of glass fibers, mica and vermiculite on the mechanical properties of a gypsum-based

- composite at room temperature and during a fire test," *Composites Part B: Engineering*, vol. 62, pp. 37-53, 2014, doi: 10.1016/j.compositesb.2014.02.019.
- [86] M. Y. Durgun, "Effect of wetting-drying cycles on gypsum plasters containing ground basaltic pumice and polypropylene fibers," *Journal of Building Engineering*, vol. 32, no. September, pp. 101801-101801, 2020, doi: 10.1016/j.jobe.2020.101801.
- [87] N. Flores Medina and M. M. Barbero-Barrera, "Mechanical and physical enhancement of gypsum composites through a synergic work of polypropylene fiber and recycled isostatic graphite filler," *Constr. Build. Mater.*, vol. 131, pp. 165-177, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.11.073.
- [88] G. Vasconcelos, P. B. Lourenço, A. Camões, A. Martins, and S. Cunha, "Evaluation of the performance of recycled textile fibres in the mechanical behaviour of a gypsum and cork composite material," *Cement and Concrete Composites*, vol. 58, pp. 29-39, 2015, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2015.01.001.
- [89] M. I. Romero Gómez, M. A. Pedreño Rojas, F. Pérez Gálvez, and P. Rubio de Hita, "Characterization of gypsum composites with polypropylene fibers from non-degradable wet wipes," *Journal of Building Engineering*, vol. 34, pp. 2352-7102, 2021/2// 2021, doi: 10.1016/J.JOBE.2020.101874.
- [90] Y.-H. Deng and T. Furuno, "Properties of gypsum particleboard reinforced with polypropylene fibers," *The Japan Wood Research Society*, no. April 2000, pp. 445-450, 2001, doi: <https://doi.org/10.1007/BF00767896>.
- [91] F. Parres, J. E. Crespo-Amorós, and A. Nadal-Gisbert, "Mechanical properties analysis of plaster reinforced with fiber and microfiber obtained from shredded tires," *Constr. Build. Mater.*, vol. 23, no. 10, pp. 3182-3188, 2009, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2009.06.040.
- [92] F. Suárez, L. Felipe-Sesé, F. A. Díaz, J. C. Gálvez, and M. G. Alberti, "On the fracture behaviour of fibre-reinforced gypsum using micro and macro polymer fibres," *Constr. Build. Mater.*, vol. 244, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118347.
- [93] M. A. Pedreño-Rojas, C. Rodríguez-Liñán, I. Flores-Colen, and J. De Brito, "Use of Polycarbonate Waste as Aggregate in Recycled Gypsum Plasters," *Materials*, 2020, doi: 10.3390/ma13143042.
- [94] S. Eve, M. Gomina, A. Gmouh, A. Samdi, R. Moussa, and G. Orange, "Microstructural and mechanical behaviour of polyamide fibre-reinforced plaster composites," *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 22, no. 13, pp. 2269-2275, 2002/12// 2002, doi: 10.1016/S0955-2219(02)00014-6.

## Referencias

- [95] P. V. Sáez, M. del Río Merino, M. Sorrentino, C. P. Amores, J. S. Cruz Astorqui, and C. V. Arrebola, "Mechanical characterization of gypsum composites containing inert and insulation materials from construction and demolition waste and further application as a gypsum block," *Materials*, vol. 13, no. 1, 2020/1// 2020, doi: 10.3390/ma13010193.
- [96] L. Alameda, V. Calderón, C. Junco, A. Rodríguez, J. Gadea, and S. Gutiérrez-González, "Characterization of gypsum plasterboard with polyurethane foam waste reinforced with polypropylene fibers," *Materiales de Construcción*, vol. 66, no. 324, 2016, doi: 10.3989/mc.2016.06015.
- [97] M. del Río Merino, R. Santos, M. González, J. Santa Cruz Astorqui, J. García, and P. Villoria Sáez, "Preliminary study of the mechanical behavior of gypsum plastering mortars with ceramic waste additions," *Journal of materials in civil Engineering* 2022, doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004076.
- [98] M. del Río Merino, J. Santa Cruz Astorqui, P. Villoria Sáez, R. Santos Jiménez, and M. González Cortina, "Eco plaster mortars with addition of waste for high hardness coatings," *Constr. Build. Mater.*, vol. 158, pp. 649-656, 2018/1// 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.10.037.
- [99] A. Vidales Barriguete, M. del Río Merino, E. Atanes Sánchez, C. Piña Ramírez, and C. Viñas Arrebola, "Analysis of the feasibility of the use of CDW as a low-environmental-impact aggregate in conglomerates," *Constr. Build. Mater.*, vol. 178, pp. 83-91, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.05.011.
- [100] A. Jiménez Rivero, A. De Guzmán Báez, and J. G. Navarro, "New composite gypsum plaster – ground waste rubber coming from pipe foam insulation," *Constr. Build. Mater.*, vol. 55, pp. 146-152, 2014/3// 2014, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2014.01.027.
- [101] Z. Jin, C. Cui, and Z. Wan, "Preparation of eco-friendly functional lightweight gypsum: Effect of three different lightweight aggregates," *Construction and Building Materials*, vol. 400, 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.132875.
- [102] M. del Río Merino, J. D. Domínguez, and F. Hernández Olivares, "Escayola aligerada con sólidos celulares," *Informes de la Construcción*, vol. 50, no. 458, pp. 43-60, 1998, doi: 10.3989/ic.1998.v50.i458.878.
- [103] S. Xie, Z. Ji, Y. Yang, G. Hou, and J. Wang, "Electromagnetic wave absorption enhancement of carbon black/gypsum based composites filled with expanded perlite," *Composites Part B: Engineering*, vol. 106, pp. 10-19, 2016, doi: 10.1016/j.compositesb.2016.09.014.
- [104] O. Gencil *et al.*, "Properties of gypsum composites containing vermiculite

- and polypropylene fibers: Numerical and experimental results," *Energy and Buildings*, vol. 70, pp. 135-144, 2014, doi: 10.1016/j.enbuild.2013.11.047.
- [105] C.-R. Anabel Patricia, "Compuestos de yeso con adición de fibras textiles de algodón recicladas," *Anales de la construcción*, vol. 8, 2022, doi: 10.20868/ade.2022.5092.
- [106] M. del Río Merino, "Elaboración y aplicaciones constructivas de paneles prefabricados de escayola aligerada y reforzada con fibras de vidrio E y otros aditivos," 1999.
- [107] E. Sophie, "Microstructural and mechanical behaviour of polyamide fibre-reinforced plaster composites," *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 22, doi: /10.1016/S0955-2219(02)00014-6.
- [108] D. Yu-He and T. Fururo, "Properties of gypsum particleboard reinforced with polypropilene fibers," *Journal of wood Science*, vol. 47, 2001, doi: 10.1007/BF00767896.
- [109] S. F, "On the fracture behaviour of fibre-reinforced gypsum using micro and macro polyme fibres," *Construction and building Materials*, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118347.
- [110] A. García Santos, "Comportamiento mecánico de yeso reforzado con polímeros sintéticos," ed, 1988.
- [111] A. Oliver Ramírez, "Integración de materiales de cambio de fase en placas de yeso reforzadas con fibras de polipropileno," in (*PhD-Tesis*), ed, 2009, pp. 386-386.
- [112] J. E. Roca Girón, *Estudio de las propiedades y aplicaciones industriales del polietileno de alta densidad (PEAD)*. 2005, pp. 126-126.
- [113] S. Gutiérrez-González, M. M. Alonso, J. Gadea, A. Rodríguez, and V. Calderón, "Rheological behaviour of gypsum plaster pastes with polyamide powder wastes," *Constr. Build. Mater.*, vol. 38, pp. 407-412, 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.08.034.
- [114] H. C. Wu, Y. M. Xia, X. Y. Hu, and X. Liu, "Improvement on mechanical strength and water absorption of gypsum modeling material with synthetic polymers," *Ceramics International*, vol. 40, no. 9 PART B, pp. 14899-14906, 2014, doi: 10.1016/j.ceramint.2014.06.085.
- [115] E. Marvin and W. M. Division, *Gypsum Wallboard Recycling and Reuse Opportunities in the State of Vermont* (Processing). 2000.
- [116] A. Rodríguez Orejón, "Adición de residuos de yeso laminado tratado, en el yeso de construcción," ed, 2010, pp. 68-68.

## Referencias

- [117] M. J. Morales-Conde, C. Rodríguez-Liñán, and M. A. Pedreño-Rojas, "Physical and mechanical properties of wood-gypsum composites from demolition material in rehabilitation works," *Constr. Build. Mater.*, vol. 114, no. 2016, pp. 6-14, 2016/7// 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.03.137.
- [118] S. Hansen and P. Sadeghian, "Recycled gypsum powder from waste drywalls combined with fly ash for partial cement replacement in concrete," *Journal of Cleaner Production*, vol. 274, pp. 122785-122785, 2020/11// 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.122785.
- [119] R. H. Geraldo *et al.*, "Gypsum plaster waste recycling: A potential environmental and industrial solution," *Journal of Cleaner Production*, vol. 164, pp. 288-300, 2017/10// 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.06.188.
- [120] M. A. Pedreño-Rojas, J. De Brito, I. Flores-Colen, M. F. C. Pereira, and P. Rubio-de-Hita, "Influence of gypsum wastes on the workability of plasters: Heating process and microstructural analysis," *Journal of Building Engineering*, vol. 29, no. August 2019, 2020, doi: 10.1016/j.jobbe.2019.101143.
- [121] S. Beldjilali, A. Bougara, J. Aguiar, N. E. Bouhamou, and R. Dabbebi, "Properties of a new material based on a gypsum matrix incorporating waste brick," *Constr. Build. Mater.*, vol. 259, pp. 120416-120416, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120416.
- [122] A. Jimenez Rivero, "New composite gypsum plaster - ground waste rubber coming from pipe foam insulation," *Construction and building Materials*, vol. 55, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.01.027.
- [123] A. Vidales Barriguete, "Caracterización fisicoquímica y aplicaciones de yeso con adición de residuo plástico de cables mediante criterios de economía circular," 2019. [Online]. Available: <http://oa.upm.es/57437/>
- [124] S. Romaniega Piñeiro, "Refuerzo de la escayola mediante fibras de lana mineral procedentes de reciclaje de RCD," 2016.
- [125] C. Piña Ramírez, E. Atanes Sánchez, M. del Río Merino, C. Viñas Arrebola, and A. Vidales Barriguete, "Feasibility of the use of mineral wool fibres recovered from CDW for the reinforcement of conglomerates by study of their porosity," *Constr. Build. Mater.*, vol. 191, pp. 460-468, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.10.026.
- [126] L. Fusade, H. Viles, C. Wood, and C. Burns, "The effect of wood ash on the properties and durability of lime mortar for repointing damp historic buildings," *Constr. Build. Mater.*, vol. 212, pp. 500-513, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.326.
- [127] M. A. Pedreño-Rojas, M. J. Morales-Conde, F. Pérez-Gálvez, and C.

- Rodríguez-Liñán, "Eco-efficient acoustic and thermal conditioning using false ceiling plates made from plaster and wood waste," *Journal of Cleaner Production*, vol. 166, pp. 690-705, 2017/11// 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.08.077.
- [128] M. A. Pedreño-Rojas, M. J. Morales-Conde, P. Rubio-de-Hita, and F. Pérez-Gálvez, "Impact of wetting-drying cycles on the mechanical properties and microstructure of wood waste-gypsum composites," *Materials*, vol. 12, no. 11, 2019, doi: 10.3390/ma12111829.
- [129] P. Villoria Sáez, M. del Río Merino, E. Atanes Sánchez, J. Santa Cruz Astorqui, and C. Porrás-Amores, "Viability of Gypsum Composites with Addition of Glass Waste for Applications in Construction," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 31, no. 3, 2019/3// 2019, doi: 10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002604.
- [130] Eurostat, "Waste generation by economic activities and households, EU, 2020," in *September*, ed, 2022.
- [131] N. Benmansour, B. Agoudjil, A. Gherabli, A. Kareche, and A. Boudenne, "Thermal and mechanical performance of natural mortar reinforced with date palm fibers for use as insulating materials in building," *Energy and Buildings*, vol. 81, pp. 98-104, 2014, doi: 10.1016/j.enbuild.2014.05.032.
- [132] A. Cevahir, *Glass fibers* (Fiber Technology for Fiber-Reinforced Composites). Elsevier Ltd., 2017, pp. 99-121.
- [133] T. Raghavendra and B. C. Udayashankar, "Engineering properties of controlled low strength materials using fly ash and waste gypsum wall boards," *Constr. Build. Mater.*, vol. 101, pp. 548-557, 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.10.070.
- [134] O. Gencil, J. J. Del Coz Diaz, M. Sutcu, F. Koksal, F. P. Álvarez Rabanal, and G. Martínez-Barrera, "A novel lightweight gypsum composite with diatomite and polypropylene fibers," *Constr. Build. Mater.*, vol. 113, pp. 732-740, 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.03.125.
- [135] A. de San Antonio Gonzalez, "Caracterización de compuestos eco-eficientes de yeso aligerado con residuo de poliestireno extruido ( XPS ) Tesis Doctoral," 2017.
- [136] *UNE-EN 520: 2005. Placas de yeso laminado. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo.*, AENOR, 2005.
- [137] *UNE-EN 520: 2005+A1. Placas de yeso laminado. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo*, AENOR, 2010.
- [138] *UNE-EN 12859. Paneles de yeso. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo*, N. Asociación Española de, 2012. [Online]. Available:

## Referencias

[www.aenor.es](http://www.aenor.es)

- [139] G. Ehrenstein, G. Riedel, and P. Trawiel, *Thermal analysis of plastics*. 2004.
- [140] A. Jiménez Rivero, A. d. Guzmán Báez, J. García Navarro, and M. González Cortina, "Nuevos Materiales de Base Yeso con Incorporación de Residuos de Caucho: Caracterización Físico-Mecánica," *Actas de IX Jornadas Iberoamericanas de Materiales de Construcción / IX Jornadas Iberoamericanas de Materiales de Construcción / 08/08/2011 - 10/08/2011 / Quito, Ecuador*, 2011.
- [141] A. A. Khalil, A. Tawfik, A. A. Hegazy, and M. F. El-Shahat, "Effect of some waste additives on the physical and mechanical properties of gypsum plaster composites," *Constr. Build. Mater.*, vol. 68, pp. 580-586, 2014/10/15/ 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.06.081>.
- [142] S. Gutiérrez-González, J. Gadea, A. Rodríguez, C. Junco, and V. Calderón, "Lightweight plaster materials with enhanced thermal properties made with polyurethane foam wastes," *Constr. Build. Mater.*, vol. 28, no. 1, pp. 653-658, 2012/03/01/ 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.10.055>.
- [143] M. M. Del Río, F. H. Olivares, and P. C. Almenara, "Estado del arte sobre el comportamiento físico-mecánico de la escayola reforzada con fibras de vidrio E," *Materiales de la construcción*, pp. 33-37, 2004, doi: <https://doi.org/10.3989/ic.2004.v56.i493.437>.
- [144] S. Romaniega Piñeiro, M. Del Río Merino, and C. Pérez García, "New Plaster Composite with Mineral Wool Fibres from CDW Recycling," *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2015, 2015, doi: 10.1155/2015/854192.
- [145] S. Gutiérrez-González, J. Gadea, A. Rodríguez, M. T. Blanco-Varela, and V. Calderón, "Compatibility between gypsum and polyamide powder waste to produce lightweight plaster with enhanced thermal properties," vol. 34, pp. 179-185, 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.02.061.
- [146] A. Gallardo Pujante, "Evaluación de las propiedades en estado fresco y endurecido (mecánicas, termofísicas y reacción al fuego) del yeso con PCM mediante tres métodos diferentes de inclusión de PCM," ed. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya, 2014.
- [147] J. A. Domínguez Lepe and D. Guemez Pacheco, "Fabricación y evaluación de paneles aplicables a la industria de la construcción a partir del reciclaje de envases multicapa (tetra brik)," (in Español), *Ingeniería*, vol. 14, no. 3, pp. 191-195, 2010. [Online]. Available: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=46715742007>.

- [148] F. Rouquerol, J. Rouquerol, K. Sing, P. Llewellyn, and G. Maurin, *Adsorption by powders and porous solids, Elsevier Collection, 2014*. 2014.
- [149] F. Rouquerol, J. Rouquerol, K. S. W. Sing, P. Llewellyn, and G. Maurin, *Adsorption by powders and porous solids principles. Methodology and Applications* (Adsorption by Powders and Porous Solids (Second Edition)). Oxford: Academic Press, 2014, p. iv.
- [150] Aly Ahmed, U. Keizo, and K. Takeshi, "Investigation of recycled gypsum in conjunction with waste plastic trays for ground improvement," *Construction and Building Materials*, pp. 208-217, 2011, doi:doi:10.1016/j.conbuildmat.2010.06.036.

## Publicaciones generadas

Las publicaciones realizadas correspondientes a los resultados obtenidos en esta Tesis Doctoral se indican a continuación:

- Congreso Internacional: Efecto de la incorporación de fibras de polipropileno procedentes de RCD en morteros de yeso.

D. Tasán Cruz, P. Villoria Sáez, and M. González Cortina, "Efectos de la incorporación de fibras de polipropileno procedentes de RCD en morteros de yeso," in *CITE 2021 Abstracts Book*, vol. 6. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 2021, pp. 159-161.

- Congreso internacional: Mechanical study of mortars with gypsum/plaster matrix with addition of fibers from CDW

D. Tasán Cruz, P. Villoria Sáez, M. González Cortina, and A. Asadi, "Mechanical study of mortars with gypsum/plaster matrix with addition of fibers from CDW," in *CIRMAT SIMPOSIUM Abstract Book*. Madrid: Universidad Carlos III de Madrid, 2022, pp. 94-95.

- Artículo Indexado: Mechanical Characterization of Gypsum-Based Composites with Single-Use Sling Waste Fibers from Construction and Demolition Waste

D. Tasan Cruz, P. Villoria Sáez, M. González Cortina, A. Asadi, and E. Atanes-Sanchez, "Mechanical characterization of Gypsum-Based composites with single-use sling waste fibers from construction and demolition waste," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 36, no. 5, 2024/02/20 2023, doi: <https://doi.org/10.1061/JMCEE7.MTENG-15873>.

## **Anexos**

Anexo 1. Ficha técnica de yeso grueso YG

YESOS Y PLASTES

IBERPLAST YG



Iberplast es un producto en base yeso constituido por sulfato cálcico semihidratado de elevada pureza, obtenido a partir de mineral de la mejor calidad.

Es un yeso de construcción de granulometría gruesa y fraguado rápido, de aplicación manual, que se utiliza para trabajos de albanilería en general; cierre de pequeños huecos y recibido de elementos auxiliares como reglas, marcos, cajas, etc.

También denominado yeso negro rápido o yeso tosco rápido.

PRESTACIONES



Fácil aplicación



Aplicación interior

NORMATIVA Y HOMOLOGACIONES

Iberplast es conforme a la norma **UNE-EN 13.279-1:2009**. "Yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción", designado como tipo **B1** (Yeso de construcción) según la denominación europea y como **YG** (Yeso grueso o rápido) según la denominación tradicional.

Esta en posesión de la marca **N** de **AENOR**, según se establece en el Reglamento Particular **RP 35.01**.



REACCIÓN AL FUEGO

Iberplast está clasificado como **Euroclase A1 (no contribución al fuego)**, al tener menos de un 1% en peso o volumen de materia orgánica, según la directiva 89/106/CEE relativa a productos de construcción.

\*Determinación de la conductividad térmica según las pautas definidas en la UNE-EN 13.279-1:2009 correspondiente a material seco aplicado en interiores (20°C y 50% de humedad relativa). Valor para el cálculo de parámetros característicos y particiones interiores según el CTE-DB HE-2.

AHORRO DE ENERGÍA Y AISLAMIENTO TÉRMICO

Coefficiente de conductividad térmica  $\lambda$  (w/mk)\* **0,3**

Factor resistencia difusión al vapor de agua  $\mu$  **6**

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

Resultados obtenidos en nuestros centros productivos.

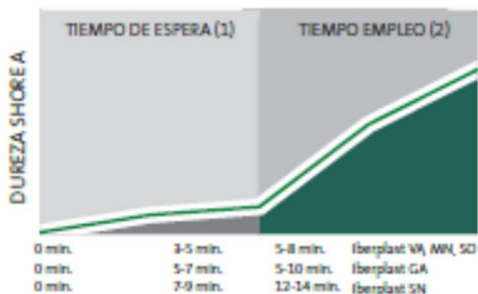
- Índice de pureza (%) **>75**
- Granulometría (mm) **0-2**
- Relación A/Y (SO)(Litros/Kg) **1,2**
- Relación A/Y (MN)(Litros/Kg) **1,0**
- Relación A/Y (VA, GA, SN)(Litros/Kg) **1,0-1,2**
- Dureza superficial (unidades Shore C) **≥45<sup>[1]</sup>**
- Tipo de soporte recomendado **ST<sup>[2]</sup>**
- Resistencia mecánica a compresión **>2N/mm<sup>2</sup>**
- Resistencia mecánica a flexión **>2N/mm<sup>2</sup>**
- Adherencia **>0,1N/mm<sup>2</sup>**
- PH **>6**

[1] Valor medio en laboratorio, según Anexo K del RP 25.01 (Reglamento particular de Yesos para la construcción III).  
[2] Soporte tradicional: ladrillo cerámico, hormigón y bloques pisa.

Iberplast se fabrica en nuestras plantas industriales de Viguera VA, Gelba GA, Sonaja SQ, Mordán MN y San Martín SN.



TIEMPOS DE EMPLEO



(1) Tiempo de espera entre el amasado del producto y su comienzo de uso.  
 (2) Tiempo durante el cual la pasta de yeso tiene la consistencia adecuada para poder ser aplicada.

Nota: los tiempos de empleo pueden sufrir variaciones en función del tipo de soporte, temperatura ambiente y del soporte, relación A/Y empleada y Ph del agua empleada.

PUESTA EN OBRA



**1** Echar agua en un recipiente adecuado a la cantidad que se desea preparar, luego espolvorear el yeso sobre el agua hasta que ya no se humedece.



**2** Se amasará a mano en pequeñas cantidades en función del elemento que queramos sujetar.



**3** Iberplast se utiliza para la sujeción de instalaciones y elementos auxiliares.

APLICACIÓN

• PREPARACIÓN DEL SOPORTE

Limpieza: La superficie se encontrará libre de polvo, partículas, eflorescencias, desencofrantes y otros residuos que comprometan la adherencia del revestimiento, para lo que se procederá a su limpieza en caso que se considere necesario.

• DECORACIÓN Y PINTADO

La aplicación posterior de pinturas deberá realizarse siguiendo las recomendaciones del fabricante de pinturas.

ACONDICIONAMIENTO



Iberplast  
 72 sacos/palé  
 17kg/saco

ALMACENAJE Y CONSERVACIÓN

Los sacos deberán ser almacenados sobre superficies planas y nunca a la intemperie, manteniendo el material a cubierto resguardado de la luz solar y de la humedad.

INDICACIONES IMPORTANTES

La temperatura de aplicación recomendada es de 5°C a 40°C.

Notas legales:

Esta información, y en particular las recomendaciones relativas a la aplicación y datos técnicos, están basadas en nuestra experiencia y conocimiento actuales, así como en los usos previstos y aplicaciones más habituales de nuestros productos, estando sujetas a las condiciones finales de obra o de aplicación.

La última versión actualizada de la hoja técnica de producto, se encontrará disponible en la página web [www.placo.es](http://www.placo.es)

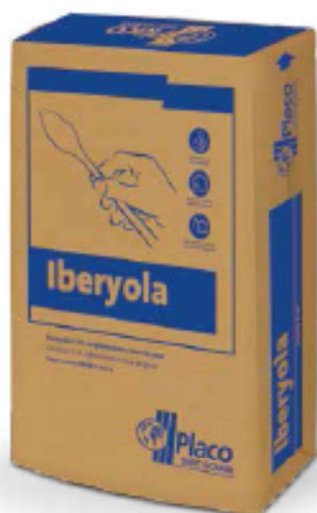
Existen hojas de seguridad de todos nuestros productos a su disposición.



Anexo 2. Ficha técnica de escayola E-35

YESOS Y PLASTES

IBERYOLA E-30/E35



Iberyola es una escayola para la realización de elementos prefabricados, para el agarre de dichos elementos y para trabajos de repaso y acabado; es un producto de gran finura que permite un acabado de elevada blancura y perfección.

Iberyola se fabrica en dos versiones que poseen un tiempo de trabajo ligeramente diferente: Iberyola de fraguado lento, especial para trabajos de acabado y repaso, también denominada escayola de construcción, e Iberyola de fraguado rápido, apta para uso en cadenas de producción de elementos prefabricados, como placa lisa, molduras, paneles para tabiquería, etc.

PRESTACIONES



Aplicación interior



Buen acabado estético



Fácil aplicación

NORMATIVA Y HOMOLOGACIONES

Iberyola es conforme a la norma **UNE-EN 13.279-1:2009**. "Yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción", designado como tipo **A** (Conglomerante a base de yeso para la construcción) según la denominación europea y como **E** (Escayola) según la denominación tradicional.

Esta en posesión de la marca **N** de **AENOR**, según se establece en el Reglamento Particular **RP 35.02**.



**E-30/E-35**

REACCIÓN AL FUEGO

Iberyola está clasificado cada como **Euroclase A1 (no contribución al fuego)**, al tener menos de un 1% en peso o volumen de materia orgánica, según la directiva 89/106/CEE relativa a productos de construcción.

\* Determinación de la conductividad térmica según las pautas definidas en la UNE-EN 12.279-1:2009 correspondiente a material seco aplicado en tableros (23°C y 50% de humedad relativa). Valor para el cálculo de parámetros característicos y particiones interiores según el CTE DB HE-1.

AHORRO DE ENERGÍA Y AISLAMIENTO TÉRMICO

Coefficiente de conductividad térmica  $\lambda$  (w/mk)\*

(GA, SO, MN y SN) **0,30**

(VA) **0,34**

Factor resistencia difusión al vapor de agua  $\mu$  **6**

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

Resultados obtenidos en nuestros centros productivos.

- Índice de pureza (%) (MN, SN y VA) **>90**
- Índice de pureza (%) (GA y SO) **>92**
- Granulometría (mm) **0-0,2**
- Relación A/Y (Litros/Kg) (GA, MN y VA) **0,8-1,0**
- Relación A/Y (Litros/Kg) (SN y SO) **0,7-0,8**
- Resistencia mecánica Flexión (MN, SN Y VA) **>3N/mm<sup>2</sup>**
- Resistencia mecánica a flexión (GA y SO) **>3,5N/mm<sup>2</sup>**
- PH **>6**

Valores medio según Anexo del RP 35.05 (Reglamento particular de Yesos de construcción CA)

Iberyola se fabrica en nuestras plantas industriales de Viguera VA, Galba GA, Soneja SO, Morón MN y San Martín SN.



YESOS Y PLASTES

TIEMPOS DE EMPLEO

IBERYOLA RÁPIDA



IBERYOLA LENTA



PUESTA EN OBRA



**1** Espolvorear la Iberyola sobre el agua, en la relación A/Y recomendada en los datos técnicos.



**2** Amasar de forma manual hasta que la pasta tome un aspecto homogéneo.



**3** Aplicar el producto con una llana sobre la superficie hasta conseguir el acabado deseado.

APLICACIÓN

• PREPARACIÓN DEL SOPORTE

La superficie a enlucir se encontrará libre de polvo, partículas, eflorescencias, desencofrantes y otros residuos que comprometan la adherencia del revestimiento, para lo que se procederá a su limpieza en caso que se considere necesario.

• DECORACIÓN Y PINTADO

La aplicación posterior de pinturas deberá realizarse siguiendo las recomendaciones del fabricante de pinturas.

ACONDICIONAMIENTO



ALMACENAJE Y CONSERVACIÓN

Los sacos deberán ser almacenados sobre superficies planas y nunca a la Intemperie, manteniendo el material a cubierto resguardado de la luz solar y de la humedad.

INDICACIONES IMPORTANTES

La temperatura de aplicación recomendada es de 5°C a 40°C.

Notas legales:

Esta información, y en particular las recomendaciones relativas a la aplicación y datos técnicos, están basadas en nuestra experiencia y conocimiento actuales, así como en los usos previstos y aplicaciones más habituales de nuestros productos, estando sujetas a las condiciones finales de obra o de aplicación.

La última versión actualizada de la hoja técnica de producto, se encontrará disponible en la página web [www.placo.es](http://www.placo.es)

Existen hojas de seguridad de todos nuestros productos a su disposición.



Anexo 3. Ficha técnica de SIKAFIBER



## HOJA DE DATOS DEL PRODUCTO

# SikaFiber® M-12

### MICROFIBRA DE POLIPROPILENO PARA HORMIGÓN Y MORTERO

#### DESCRIPCION DEL PRODUCTO

SikaFiber® M-12 es una fibra de polipropileno monofilamento de 12 mm de longitud para la confección de hormigones y morteros.

#### USOS

Para diversos tipos de hormigón y morteros cementosos no estructurales que necesitan reducir la incidencia de la fisuración por retracción:

- Losas de hormigón.
- Hormigón y mortero de revestimiento en túneles, cavernas, estructuras enterradas como protección pasiva al fuego.
- Morteros.
- Revocos de fachada.
- Elementos prefabricados de hormigón.
- Revestimiento de canales.

Sustituye a la armadura destinada a absorber las tensiones que se producen durante el fraguado y endurecimiento del hormigón. En cambio no sustituye a las armaduras principales obtenidas mediante cálculo.

#### CARACTERISTICAS / VENTAJAS

- Perfecta dispersión en la masa del hormigón o mortero.
- Asegura la distribución homogénea y uniforme de las tensiones en la masa de hormigón o mortero, evitando la formación de fisuras y los consiguientes puntos débiles.
- Debido a su coeficiente de esbeltez y a su composición, es perfecta para reducir el fenómeno de spalling provocado en los hormigones/morteros sometidos a muy altas temperaturas.
- La red de canales generados dentro del hormigón una vez desaparecido el material, permiten un escape perfecto del vapor de agua generado en el interior del hormigón o mortero.
- Reduce la fisuración por retracción.
- Aumenta la impermeabilidad.
- Reduce el riesgo de disgregación de la masa.
- Mejora la resistencia a compresión y a tracción.
- Aumenta la resistencia al impacto, reduciendo la fragilidad.

#### CERTIFICADOS / NORMAS

Marcado CE y Declaración de Prestaciones según EN 14889-2: Fibras poliméricas para hormigón. Clase 1-a: "Microfibra Monofilamentosa"

#### INFORMACION DEL PRODUCTO

Declaración de Producto	Clase 1a: Monofilamento	(EN 14889-2)
Base Química	100 % polipropileno	
Presentación	Bolsas de 600 g. Autodestruibles en la masa de hormigón o mortero. Caja de 30 bolsas	
Conservación	24 meses desde su fecha de producción si están almacenadas correctamente, sin abrir, sin dañar, y en su empaquete cerrado original.	

Hoja De Datos Del Producto  
SikaFiber® M-12  
Julio 2023, Versión 03.01  
021438021010000154

Condiciones de Almacenamiento	El producto debe ser almacenado en su empaquetado original, sin abrir y sin dañar, en condiciones secas y a temperaturas entre + 5 °C y + 30 °C.
Dimensiones	• Diámetro: 33 µm • Longitud: 12 mm
Densidad	~0,91 g/cm <sup>3</sup>
Punto de Fusión	~163 °C

#### INFORMACION TECNICA

Specific tensile strength	31.9 cN/tex
---------------------------	-------------

#### INFORMACION DE APLICACIÓN

Dosificación Recomendada	Para mejorar la fisuración por retracción: Una bolsa de 600 gramos por cada metro cúbico de hormigón o mortero. Como protección pasiva frente al fuego: - Entre 0,5 a 3 kg por cada metro cúbico de hormigón o mortero. (Se recomienda la realización de ensayos previos para la determinación de la dosificación adecuada). <u>Nota:</u> la dosificación más genérica dada en proyectos suele ser 2kg/m <sup>3</sup>
--------------------------	---

#### NOTAS

Todos los datos técnicos indicados en estas Hojas de Datos de Producto estén basados en ensayos de laboratorio. Las medidas reales de estos datos pueden variar debido a circunstancias más allá de nuestro control.

#### LIMITACIONES

- Para obtener buenos resultados use un hormigón/mortero de buena calidad.
- Las fibras no mejoran la calidad de un hormigón o mortero pobre.
- SikaFiber® M-12 es compatible con otros aditivos Sika.
- No usar para sustituir armado metálico.

#### ECOLOGIA, SEGURIDAD E HIGIENE

Para cualquier información referida a cuestiones de seguridad e higiene en el uso, manejo, almacenamiento y eliminación de residuos de productos químicos, los usuarios deben consultar la Hoja de Seguridad del producto, que contiene los datos físicos, ecológicos, toxicológicos y demás cuestiones relacionadas con la seguridad.

#### RESTRICCIONES LOCALES

Tenga en cuenta que como resultado de las regulaciones locales específicas, el funcionamiento del producto puede variar de un país a otro. Por favor, consulte la Hoja de Datos de Producto local para la descripción exacta de los campos de aplicación.

## NOTAS LEGALES

Esta información y, en particular, las recomendaciones relativas a la aplicación y uso final del producto, están dadas de buena fe, basadas en el conocimiento actual y la experiencia de Sika de los productos cuando son correctamente almacenados, manejados y aplicados, en situaciones normales, dentro de su vida útil y de acuerdo con las recomendaciones de Sika. En la práctica, las posibles diferencias en los materiales, soportes y condiciones reales en el lugar de aplicación son tales, que no se puede deducir de la información del presente documento, ni de cualquier otra recomendación escrita, ni de consejo alguno ofrecido, ninguna garantía en términos de comercialización o idoneidad para propósitos particulares, ni obligación alguna fuera de cualquier relación legal que pudiera existir. El usuario debe ensayar la conveniencia de los productos para la aplicación y la finalidad deseadas. Sika se reserva el derecho de modificar las propiedades de sus productos. Se reservan los derechos de propiedad de terceras partes. Los pedidos son aceptados en conformidad con los términos de nuestras vigentes Condiciones Generales de Venta y Suministro. Los usuarios deben conocer y utilizar la versión última y actualizada de las Hojas de Datos de Productos, copias de las cuales se mandarán a quién las solicite.

**ORIGENES CENTRALES Y FABRICA**  
Carretera de Fuencarral, 73  
P. I. Alcobendas  
Madrid 28108 - Alcobendas  
Tels.: 916 57 23 75

**ORIGENES CENTRALES Y CENTRO  
LOGÍSTICO**  
C/ Aragoneses, 17  
P. I. Alcobendas  
Madrid 28108 - Alcobendas  
Tels.: 916 57 23 75  
Fax: 916 62 19 38



**Hoja De Datos Del Producto**  
SikaFiber® M-S2  
Julio 2023, Versión 03.01  
021436021010000154

3 / 3

SikaFiberM-S2-es-03-(07-2023)-2-1.pdf

**BUILDING TRUST**



Anexo 4. Ficha técnica eslingas de un solo uso

## No reutilizables

### Información del producto















- Eslingas de un solo uso, según normativa UNE 40901
- Factor de seguridad 7
- Color blanco
- No reutilizables

Disponibles en un amplio rango de cargas máximas de utilización y longitudes.



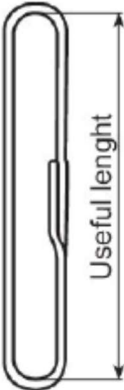
### Datos técnicos

WLL del componente cinta cosida	Ancho cinta	Color del componente cinta cosida	Límites de la carga de trabajo en toneladas	Choker lifting	Elevación estrangulada	Eslinga de 2 ramales	Eslinga de 3 y 4 ramales
				Paralelo	$\beta = 0$ to $45^\circ$	$\beta = 45$ to $60^\circ$	$\beta = 45$ to $60^\circ$
						$\beta = 45$ to $45^\circ$	$\beta = 45$ to $60^\circ$

t	mm	M = 1	M = 0,8	M = 2	M = 1,4	M = 1	M = 1,4	M = 1	M = 1,4	M = 1	M = 1,4	M = 1	M = 1,4	M = 1	M = 1,4
															
1	25/40	Violeta	0,8	2	1,4	1	1,4	1	1,4	1	1,4	1	1,4	1	1,4
1,5*	50	Rosa	1,2	3	2,1	1,5	2,1	1,5	2,1	1,5	2,1	1,5	2,1	1,5	2,1
2	60	Verde	1,6	4	2,8	2	2,8	2	2,8	2	2,8	2	2,8	2	2,8
2,5*	75	Verde oscuro	2	5	3,5	2,5	3,5	2,5	3,5	2,5	3,5	2,5	3,5	2,5	3,5
3	90	Amarillo	2,4	6	4,2	3	4,2	3	4,2	3	4,2	3	4,2	3	4,2
4	120	Gris	3,2	8	5,6	4	5,6	4	5,6	4	5,6	4	5,6	4	5,6
5	140/150	Rojo	4	10	7	5	7	5	7	5	7	5	7	5	7
6	150/180	Marrón	4,8	12	8,4	6	8,4	6	8,4	6	8,4	6	8,4	6	8,4
8	240	Azul	6,4	16	11,2	8	11,2	8	11,2	8	11,2	8	11,2	8	11,2
10	250/300	Anaranjado	8	20	14	10	14	10	14	10	14	10	14	10	14
> 10		Anaranjado													

M = Factor de forma para carga simétrica. Tolerancia de manipulación para eslingas o partes de eslingas indicadas como verticales = 6°.  
 \*Valores no normalizados.

Plano



Anexo 5. Características del agua



SUBDIRECCION DE CALIDAD DE LAS AGUAS  
ANÁLISIS COMPLETO

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

AÑO: 2023

PARÁMETROS ORGANOLÉPTICOS	VALOR	V.P *	PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS (Cont.)	VALOR	V.P *
Olor/Sabor (ID a 25°C)	0 - 1	3	Fluoruro (mg/L)	< 0,10	1,5
Color (mg Pt-Co/L)	0 - 5	15	Cianuro total (µg/L)	< 1,5	50
Turbidez (U.N.F.)	< 0,3	4	Aluminio (µg/L)	18 - 122	200
<b>PARÁMETROS MICROBIOLÓGICOS</b>			Hierro (µg/L)	< 50	200
Recuento de colonias a 22°C (UFC/mL)	< 50	100	Manganeso (µg/L)	< 20	50
Bacterias coliformes (UFC/100 mL)	0	0	Boro (mg/L)	< 0,20	1,5
Escherichia coli (UFC/100 mL)	0	0	Cobre (mg/L)	< 0,050	2,0
Enterococo intestinal (UFC/100 mL)	0	0	Antimonio (µg/L)	< 2,5	10
Clostridium perfringens (UFC/100 mL)	0	0	Arsénico (µg/L)	< 2,5	10
<b>PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS</b>			Cadmio (µg/L)	< 2,5	5,0
pH (unidades)	7,1 - 8,9	6,5 - 9,5	Cromo total (µg/L)	< 2,5	50
Conductividad (µS/cm 20 °C)	87 - 160	2.500	Níquel (µg/L)	< 2,5	20
Amonio (mg/L)	0,19 - 0,49	0,50	Plomo (µg/L)	< 2,5	10
Nitrato (mg/L)	1,0 - 3,7	50	Selenio (µg/L)	< 2,5	20
Nitritos (mg/L)	< 0,10	0,50	Mercurio (µg/L)	< 0,1	1,0
Cloro libre residual (mg/L)	< 0,15	1,0	Benzo (a) pireno (µg/L)	< 0,002	0,010
Cloro combinado residual (mg/L)	0,6 - 1,6	2,0	4 H.P.A. (µg/L)	0,01	0,10
Oxidabilidad (mg/L)	0,6 - 2,4	5,0	Acrilamida (µg/L)	< 0,03	0,10
Carbono Orgánico Total (mg/L)	1,6 - 2,5	5,0	Bisfenol a (µg/L)	< 0,75	2,5
Cloruro (mg/L)	10 - 21	250	Uranio (µg/L)	< 5,0	30
Sulfato (mg/L)	4,0 - 18	250	Epiclorhidrina (µg/L)	< 0,003	0,10
Calcio (mg/L)	7,4 - 16	100	Plaguicidas Totales (µg/L)	< 0,05	0,5
Magnesio (mg/L)	1,2 - 2,5	30	4 Trihalometanos (µg/L)	37	100
Sodio (mg/L)	5,7 - 14	200	Bromato (µg/L)	< 4,0	10
Potasio (mg/L)	0,6 - 1,5	10	Benceno (µg/L)	< 0,25	1,0
Dureza total (mg/L CO <sub>3</sub> Ca)	10 - 50	500	1,2-Dicloroetano (µg/L)	< 0,3	3,0
Índice de Langelier	-0,5	Unid. pH	Tricloroetano + Tetracloroetano (µg/L)	< 0,5	10
Microcistina - LR (µg/L)	< 0,2	5	Clorato (mg/L)	0,1	0,7
			Clorito (mg/L)	< 0,1	0,7
			<b>RADIATIVIDAD</b>		
			Actividad α total (Bq/L)	< 0,04	0,1
			Actividad β resto (Bq/L)	< 0,08	1,0
			Tritio (Bq/L)	< 10	100
			Dosis indicativa (mSv)	< 0,1	0,10

\* Valor Paramétrico o Valor de Referencia (establecido en el R.D. 3/2023 de 10 de Enero).

Temperatura media del agua en los diferentes meses del año

E	F	M	Ab	My	Jn	Jl	Ag	S	O	N	D	
9,5	8,1	9,9	12,7	14,9	16,6	18,7	19,9	18,6	16,8	13,7	10,7	°C



Madrid, 08 de Enero de 2024



SUBDIRECCIÓN DE CALIDAD DE LAS AGUAS

DUREZA MEDIA DEL AGUA EN EL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN. AÑO 2023

Grado Francés ° FH	Grado Inglés ° Clarke	Grado Alemán ° dH	Miligramos de Ca mg/L	Millimoles de Ca m moles/L	Miligramos de CO <sub>3</sub> Ca mg/L
1,0 – 5,0	0,70 – 3,5	0,56 – 2,8	4,0 – 20	0,10 – 0,50	10 – 50



Madrid, 11 de Enero de 2024