



Universidad de Burgos

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIONES ARQUITECTÓNICAS E
INGENIERÍA DE LA CONSTRUCCIÓN Y DEL TERRENO

TESIS DOCTORAL

Placas de yeso laminado aligeradas con residuos poliméricos reforzadas con fibras de polipropileno. Fabricación y puesta en obra.

Burgos, Diciembre 2014

AUTORA:

Lourdes Alameda Cuenca-Romero

DIRECTORAS:

Dra. Verónica Calderón Carpintero

Dra. Sara Gutiérrez González



Dña. Verónica Calderón Carpintero, Profesora Titular Doctora y **Dña. Sara Gutiérrez González**, Profesora Ayudante Doctora, del Área de Construcciones Arquitectónicas del Departamento de Construcciones Arquitectónicas e Ingeniería de la Construcción y del Terreno de la Escuela Politécnica Superior de la Universidad de Burgos,

INFORMAN:

Que la presente Memoria titulada “**Placas de yeso laminado aligeradas con residuos poliméricos reforzadas con fibras de polipropileno. Fabricación y puesta en obra**” se ha realizado en el Departamento de Construcciones Arquitectónicas e Ingeniería de la Construcción y del Terreno de la Universidad de Burgos, bajo su dirección, por la Ingeniera de Edificación y Arquitecta Técnica Dña. **Lourdes Alameda Cuenca-Romero** y autorizan su presentación para que sea calificada como TESIS DOCTORAL.

Burgos, 19 de Diciembre de 2014

Fdo.: Dra. Verónica Calderón
Carpintero

Fdo.: Dra. Sara Gutiérrez
González

A Pablo, mi otra mitad
A Santiago, nuestro pequeño milagro

A Carmen, Javier y Minerva
A todos los que están por llegar

Agradecimientos

Tengo que comenzar estos agradecimientos, con mis directoras de Tesis la Dra. Verónica Calderón Carpintero y la Dra. Sara Gutiérrez González. Verónica fue el principio de todo, ella me dio el empujón inicial para comenzar a desarrollar esta investigación y ha estado acompañándome durante todo el camino. Sara es el final, sin su dedicación, respaldo y ánimos, jamás hubiera podido terminar este trabajo.

A José Luis Díez del Campo y Pablo Luis Campos de la Fuente, quiero agradecerles su ayuda en los trabajos de laboratorio, siempre con una solución frente a mis continuas preguntas y demandas. Y a Francisco, Alba y Jesús por su colaboración en la realización de los ensayos.

A Ángel Rodríguez Sáiz por preocuparse por mí, por todo y por todos.

A Carlos Junco Petrement por sus ideas, interés y ánimos.

Y muy especialmente, quiero agradecer a mi madre la ayuda que me ha prestado cuidando a mi pequeño en la recta final de este trabajo, proporcionándome esos ratos libres tan necesarios.

Gracias a todos.

Resumen

La continua demanda en los países industrializados, así como en aquellos en vías de desarrollo, de materias primas, energía y agua, conlleva un permanente incremento en la generación de residuos. La gestión de estos residuos, tanto industriales como de ámbito urbano, provoca graves problemas, entre los cuales destaca el notable impacto ambiental debido al depósito en vertederos de la mayoría de estos residuos, y a la carga económica de su gestión-eliminación.

Esta Tesis Doctoral plantea un estudio pormenorizado de la posibilidad de incorporación de diversos residuos poliméricos de origen industrial (espumas de poliuretano, poliamida), para la elaboración de nuevos productos prefabricados a base de yeso de uso en edificación, buscando así una salida a estos residuos industriales, al mismo tiempo que se mejoran las propiedades del prefabricado (placas de yeso laminado).

En una primera fase se trabaja con mezclas en distintas concentraciones de residuos poliméricos, estudiando sus propiedades en estado fresco y en estado endurecido, hallando la relación agua/yeso, los tiempos de principio de fraguado, su densidad, capacidad de retención de agua y absorción por capilaridad, la dureza Shore C, resistencias a flexión y compresión, la adherencia y la permeabilidad al vapor de agua. Realizando la caracterización térmica, referida a valores de reacción al fuego, tga y resistencia térmica de las mezclas con mejores prestaciones a nivel físico-mecánico.

Se seleccionan las dosificaciones con mejores resultados con el fin de elaborar placas de yeso laminado, las cuales se someten a un programa de ensayos para tratar de identificar sus propiedades y características, además de sus cualidades y limitaciones. Estos ensayos permiten conocer su resistencia a flexión, su dureza superficial, la capacidad de absorción de agua de la placa y la densidad del material.

También se trabaja con la incorporación de fibras con el objetivo de mejorar el comportamiento mecánico de las placas y su resistencia al impacto.

Es importante la simulación de puesta en obra del material, que permite confirmar la viabilidad de uso del material en un sistema de placa de yeso laminado para tabiquería. Además el estudio económico avala como las placas fabricadas en esta investigación son competitivas respecto a las placas comerciales.

El análisis del reciclado de las placas de yeso laminado fabricadas, tiene como objetivo dar una solución al cierre del ciclo de vida de los residuos que integran el material investigado.

Abstract

Continuous demand in both industrialized and developing countries for raw materials, energy and water, has meant a permanent increase in the generation of waste products. Management of these waste products, both industrial and urban, causes serious problems, among which their notable environmental impact, due to the disposal of the majority of these residues in landfill sites and the economic cost of their management-neutralization.

This doctoral thesis sets out a detailed study of the possibility of incorporating various polymer waste products of industrial origin (polyurethane, polyamide foam) in the preparation of new pre-fabricated gypsum-based products for use in building; searching in this way for an application for these industrial waste products, at the same time as improving the properties of the pre-fabricated product (sheets of laminated plaster).

In a first phase, mixtures with different concentrations of polymer waste were prepared and their properties in both a fresh and a hardened state were studied, establishing the water/gypsum ratio, the setting onset times, their density, water retention capacity and capillarity absorption rates, the Shore C hardness, resistance to bending and compression, and adherence and permeability. A thermal characterization was also performed, detailing fire reaction times, TGA values and the fire resistance of the mixtures with the best performance at a physical-mechanical level.

The dosages with the best results were selected so as to prepare laminated gypsum boards, which were subjected to a test programme to try to identify their properties, characteristics and qualities, as well as their limitations. These tests established their bending resistance, surface hardness, water absorption capacity and the density of the material.

Work also took place on the incorporation of fibres with the objective of improving the mechanical behavior of the boards and their impact resistance.

Simulation of on-site installation of the material is important, as it confirms the viability of the use of the material in a system of laminated plasterboard for partitions. In addition, the economic study validates the

competitiveness of the plasterboard manufactured in this investigation, in comparison with commercial plasterboard.

Recycling analysis of the manufactured laminated plasterboard has the objective of providing a solution to the end of the life cycle of the waste product that constitutes part of the material under investigation.

Nomenclaturas

Química del yeso:

Ca(SO₄)	Sulfato cálcico
Ca(SO₄)(H₂O)_½	Sulfato cálcico hemihidratado
Ca(SO₄)(H₂O)₂	Sulfato cálcico dihidratado

Técnicas y procedimientos experimentales:

CNHS	Análisis elemental
DRX-M	Difracción de Rayos X
SEM	Microscopía electrónica de barrido
TGA	Análisis termogravimétrico

Materias primas:

PYL	Placa de yeso laminado
Y	Yeso
A	Agua
W	Espuma de poliuretano blanco
G	Espuma de poliuretano gris
PA	Poliamida en polvo
GM	Mixto de poliuretano gris
F1	Fibras de polipropileno (SikaCim®)
F2	Fibras de polipropileno (Paviland®)

Dosificaciones de mezclas:

RF	1 Parte de yeso
1/0,5 W	1 Parte de yeso y 0,5 de espuma de poliuretano blanco
1/1 W	1 Parte de yeso y 1 de espuma de poliuretano blanco
1/2 W	1 Parte de yeso y 2 de espuma de poliuretano blanco
1/3 W	1 Parte de yeso y 3 de espuma de poliuretano blanco
1/4 W	1 Parte de yeso y 4 de espuma de poliuretano blanco
1/0,5 G	1 Parte de yeso y 0,5 de espuma de poliuretano gris
1/1 G	1 Parte de yeso y 1 de espuma de poliuretano gris
1/2 G	1 Parte de yeso y 2 de espuma de poliuretano gris
1/3 G	1 Parte de yeso y 3 de espuma de poliuretano gris
1/4 G	1 Parte de yeso y 4 de espuma de poliuretano gris

1/0,5 PA	1 Parte de yeso y 0,5 de poliamida en polvo
1/1 PA	1 Parte de yeso y 1 de poliamida en polvo
1/2 PA	1 Parte de yeso y 2 de poliamida en polvo
1/3 PA	1 Parte de yeso y 3 de poliamida en polvo
1/4 PA	1 Parte de yeso y 4 de poliamida en polvo
1/0,5 GM	1 Parte de yeso y 0,5 de mixto de poliuretano gris
1/1 GM	1 Parte de yeso y 1 de mixto de poliuretano gris
1/2 GM	1 Parte de yeso y 2 de mixto de poliuretano gris
1/3 GM	1 Parte de yeso y 3 de mixto de poliuretano gris
1/4 GM	1 Parte de yeso y 4 de mixto de poliuretano gris

Dosificaciones de placas de yeso laminado:

PYL ST	Placa de yeso laminado estándar
PYL RF	Placa de yeso laminado con 1 parte de yeso
PYL W 0,5	Placa de yeso laminado con 1 parte de yeso y 0,5 de espuma de poliuretano blanco
PYL W 1	Placa de yeso laminado con 1 parte de yeso y 1 de espuma de poliuretano blanco
PYL W 2	Placa de yeso laminado con 1 parte de yeso y 2 de espuma de poliuretano blanco
PYL G 0,5	Placa de yeso laminado con 1 parte de yeso y 0,5 de espuma de poliuretano gris
PYL G 1	Placa de yeso laminado con 1 parte de yeso y 1 de espuma de poliuretano gris
PYL G 2	Placa de yeso laminado con 1 parte de yeso y 2 de espuma de poliuretano gris
PYL PA 0,5	Placa de yeso laminado con 1 parte de yeso y 0,5 de poliamida en polvo
PYL PA 1	Placa de yeso laminado con 1 parte de yeso y 1 de poliamida en polvo
PYL PA 2	Placa de yeso laminado con 1 parte de yeso y 2 de poliamida en polvo
PYL GM 0,5	Placa de yeso laminado con 1 parte de yeso y 0,5 de mixto de poliuretano gris
PYL GM 1	Placa de yeso laminado con 1 parte de yeso y 1 de mixto de poliuretano gris

PYL GM 2 Placa de yeso laminado con 1 parte de yeso y 2 de mixto de poliuretano gris

Dosificaciones de placas de yeso laminado con fibras:

PYL RF (F2) 0% Placa de yeso laminado con 1 parte de yeso y 0% de fibras de polipropileno Paviland®

PYL RF (F2) 2% Placa de yeso laminado con 1 parte de yeso y 2% de fibras de polipropileno Paviland®

PYL RF (F2) 4% Placa de yeso laminado con 1 parte de yeso y 4% de fibras de polipropileno Paviland®

PYL RF (F2) 6% Placa de yeso laminado con 1 parte de yeso y 6% de fibras de polipropileno Paviland®

PYL W 0,5 (F2) 0% Placa de yeso laminado con 1 parte de yeso, 0,5 de espuma de poliuretano blanco y 0% de fibras de polipropileno Paviland®

PYL W 0,5 (F2) 2% Placa de yeso laminado con 1 parte de yeso, 0,5 de espuma de poliuretano blanco y 2% de fibras de polipropileno Paviland®

PYL W 0,5 (F2) 4% Placa de yeso laminado con 1 parte de yeso, 0,5 de espuma de poliuretano blanco y 4% de fibras de polipropileno Paviland®

PYL W 0,5 (F2) 6% Placa de yeso laminado con 1 parte de yeso, 0,5 de espuma de poliuretano blanco y 6% de fibras de polipropileno Paviland®

PYL W1 (F2) 0% Placa de yeso laminado con 1 parte de yeso, 1 de espuma de poliuretano blanco y 0% de fibras de polipropileno Paviland®

PYL W1 (F2) 2% Placa de yeso laminado con 1 parte de yeso, 1 de espuma de poliuretano blanco y 2% de fibras de polipropileno Paviland®

PYL W1 (F2) 4% Placa de yeso laminado con 1 parte de yeso, 1 de espuma de poliuretano blanco y 4% de fibras de polipropileno Paviland®

PYL W1 (F2) 6% Placa de yeso laminado con 1 parte de yeso, 1 de espuma de poliuretano blanco y 6% de fibras de polipropileno Paviland®

PYL W2 (F2) 0% Placa de yeso laminado con 1 parte de yeso, 2 de espuma de poliuretano blanco y 0% de fibras de polipropileno Paviland®

PYL W2 (F2) 2%	Placa de yeso laminado con 1 parte de yeso, 2 de espuma de poliuretano blanco y 2% de fibras de polipropileno Paviland®
PYL W2 (F2) 4%	Placa de yeso laminado con 1 parte de yeso, 2 de espuma de poliuretano blanco y 4% de fibras de polipropileno Paviland®
PYL W2 (F2) 6%	Placa de yeso laminado con 1 parte de yeso, 2 de espuma de poliuretano blanco y 6% de fibras de polipropileno Paviland®
PYL G1 (F2) 4%	Placa de yeso laminado con 1 parte de yeso, 1 de espuma de poliuretano gris y 4% de fibras de polipropileno Paviland®
PYL G2 (F2) 4%	Placa de yeso laminado con 1 parte de yeso, 2 de espuma de poliuretano gris y 4% de fibras de polipropileno Paviland®
PYL PA1 (F2) 4%	Placa de yeso laminado con 1 parte de yeso, 1 de poliamida en polvo y 4% de fibras de polipropileno Paviland®
PYL PA2 (F2) 4%	Placa de yeso laminado con 1 parte de yeso, 2 de poliamida en polvo y 4% de fibras de polipropileno Paviland®
PYL GM1 (F2) 4%	Placa de yeso laminado con 1 parte de yeso, 1 de mixto de poliuretano gris y 4% de fibras de polipropileno Paviland®
PYL GM2 (F2) 4%	Placa de yeso laminado con 1 parte de yeso, 2 de mixto de poliuretano gris y 4% de fibras de polipropileno Paviland®

Dosificaciones del reciclado:

RC	Mezclas con material reutilizado al 33%
PYL W1 (F2) 4% RC 5%	Placa de yeso laminado con 1 parte de yeso, 1 de espuma de poliuretano blanco, 4% de fibras de polipropileno Paviland® y un 5% de material reciclado
PYL W2 (F2) 4% RC 5%	Placa de yeso laminado con 1 parte de yeso, 2 de espuma de poliuretano blanco, 4% de fibras de polipropileno Paviland® y un 5% de material reciclado



Capítulo 1. Introducción	1
1.1. Justificación del tema elegido	4
1.2. El yeso como materia prima	5
1.3. Antecedentes históricos del yeso	9
1.4. Prefabricados de yeso.....	11
1.4.1. Placas de yeso laminado	12
1.4.2. Paneles de yeso	16
1.4.3. Productos en staff (yeso fibroso).....	17
1.4.4. Placas de escayola para techos suspendidos	18
1.4.5. Placas de yeso laminado reforzadas con fibras	19
1.4.6. Elementos decorativos.....	20
1.5. Materiales poliméricos.....	21
1.5.1. Clasificación.....	21
1.5.2. Producción y demanda	23
1.5.3. Residuos	26
1.5.4. Materiales poliméricos utilizados en la Tesis Doctoral.....	28
1.5.4.1. Espuma de poliuretano.....	28
1.5.4.2. Poliamida en polvo.....	30
Capítulo 2. Objetivos	31
2.1. Objetivos.....	33
Capítulo 3. Estado del arte.....	35
3.1. Yesos aligerados	37
3.1.1. Áridos ligeros	37
3.1.2. Residuos de naturaleza orgánica e inorgánica	38
3.2. Prefabricados de yeso aligerado.....	42
3.2.1. Aireantes y espumantes	42
3.2.2. Arcilla expandida.....	42
3.2.3. Perlita expandida.....	43
3.2.4. Humo de sílice	43
3.2.5. Corcho natural	43
3.2.6. Papel reciclado y partículas de madera de pino	44
3.2.7. Residuos de vidrio	45



3.2.8.	Sarmiento de viña	45
3.2.9.	Material de cambio de fase (PCM)	45
3.2.10.	Poliestireno expandido (EPS)	46
3.2.11.	Polietilvinilacetato (EVA)	47
3.2.12.	Espuma de Poliuretano	47
3.2.13.	Polvo de cuero.....	47
3.2.14.	Polvo de caucho triturado	48
Capítulo 4. Procedimiento experimental		49
4.1.	Materias Primas.....	51
4.1.1.	Análisis elemental (CHNS)	51
4.1.2.	Difracción de Rayos X (DRX-M)	51
4.1.3.	Granulometría por difracción de rayos laser.....	52
4.1.4.	Microscopía electrónica de barrido (SEM)	52
4.1.5.	Análisis termogravimétrico (TGA)	53
4.1.6.	Densidad real	54
4.1.7.	Densidad aparente.....	55
4.1.8.	Digestión de muestras	55
4.2.	Mezclas	56
4.2.1.	Relación agua/yeso. Método de la mesa de sacudidas.	56
4.2.2.	Principio de fraguado. Método del cono de Vicat	56
4.2.3.	Densidad aparente.....	57
4.2.4.	Capacidad de retención de agua.....	57
4.2.5.	Dureza Shore C sobre probeta	58
4.2.6.	Resistencia a flexión y compresión	58
4.2.7.	Absorción por capilaridad	59
4.2.8.	Adherencia.....	60
4.2.9.	Permeabilidad al vapor de agua	60
4.2.10.	Microscopía electrónica de barrido (SEM)	61
4.2.11.	Conductividad térmica	61
4.2.12.	Ensayo de reacción al fuego de productos. Ensayo de no combustibilidad.	62
4.3.	Placas de yeso laminado	64



4.3.1.	Densidad.....	64
4.3.2.	Resistencia a flexión (expresada como carga de rotura a flexión)	64
4.3.3.	Capacidad de absorción total de agua	65
4.3.4.	Dureza superficial.....	65
Capítulo 5. Caracterización de materias primas		67
5.1.	Yeso.....	69
5.1.1.	Densidad real.....	70
5.1.2.	Granulometría por difracción de rayos láser	70
5.1.3.	Difracción de Rayos X (DRX-M)	71
5.2.	Agua.....	72
5.3.	Residuos	73
5.3.1.	Espuma de poliuretano blanco (W)	73
5.3.2.	Espuma de poliuretano gris (G)	75
5.3.3.	Poliamida en polvo (PA)	77
5.3.4.	Mixto de poliuretano gris (GM)	79
5.3.5.	Comparativa de resultados.....	80
5.4.	Cartón.....	82
5.5.	Fibras.....	83
5.5.1.	Fibras de polipropileno (SikaCim®)	84
5.5.2.	Fibras de polipropileno (Paviland®)	85
Capítulo 6. Caracterización de mezclas		87
6.1.	Mezclas de yeso con residuos de espuma de poliuretano y poliamida	89
6.2.	Mezclas de yeso con residuo mixto de poliuretano gris.....	94
6.2.1.	Justificación del porcentaje de sustitución	94
6.2.2.	Proceso de fabricación	95
6.2.3.	Relación Agua/(Yeso+Residuo). Método de la mesa de sacudidas.....	96
6.2.4.	Principio de fraguado. Método del cono de Vicat.....	97
6.2.5.	Densidad aparente	99
6.2.6.	Capacidad de retención de agua	100
6.2.7.	Dureza Shore C	101



6.2.8. Resistencia a flexión y compresión	103
6.2.9. Absorción por capilaridad	105
6.2.10. Adherencia.....	106
6.2.11. Permeabilidad al vapor de agua	108
6.2.12. Microscopía electrónica de barrido (SEM)	109
6.3. Caracterización térmica de mezclas	111
6.3.1. Conductividad térmica	111
6.3.2. Análisis termogravimétrico (TGA)	115
6.4. Conclusiones.....	117
Capítulo 7. Fabricación y caracterización de placas de yeso laminado.....	119
7.1. Justificación de las dosificaciones elegidas.....	121
7.2. Proceso de fabricación	123
7.2.1. Equipos necesarios para la fabricación de probetas	123
7.2.2. Procedimiento.....	124
7.2.3. Papel empleado para la fabricación de placas de yeso.....	126
7.3. Caracterización de placas de yeso laminado.....	129
7.3.1. Resultados placas comerciales.....	129
7.3.2. Densidad	129
7.3.3. Resistencia a flexión (expresada como carga de rotura a flexión).....	131
7.3.4. Capacidad de absorción total de agua.....	133
7.3.5. Dureza superficial	134
7.3.6. Microscopía electrónica de barrido (SEM)	136
7.4. Caracterización térmica de las placas de yeso	137
7.4.1. Resistencia térmica	137
7.4.2. Ensayo de reacción al fuego de productos. Ensayo de no combustibilidad	138
7.5. Conclusiones.....	142
Capítulo 8. Refuerzos con fibras.....	143
8.1. Yesos con fibras. Estado del arte	145
8.1.1. Fibras de origen natural	145



8.1.2. Fibras artificiales.....	147
8.2. Fabricación y caracterización de placas de yeso laminado reforzadas con fibras.....	149
8.2.1. Densidad.....	151
8.2.2. Resistencia a flexión (expresada como carga de rotura a flexión)	152
8.2.3. Capacidad de absorción total de agua	153
8.2.4. Dureza superficial.....	154
8.2.5. Relación recorrido-carga y relación con la interfase a nivel microscópico	156
8.2.6. Ensayo de reacción al fuego de productos. Ensayo de no combustibilidad.....	160
8.3. Conclusiones	161
Capítulo 9. Puesta en obra.....	163
9.1. Sistemas de placa de yeso laminado	165
9.1.1. Exigencias del Código Técnico de la Edificación.....	165
9.1.2. Sistemas de construcción seca para tabiques y trasdosados	168
9.2. Sistemas con las placas de yeso laminado objeto de la investigación. Puesta en obra.....	170
9.2.1. Placa con residuo de poliuretano blanco.....	172
9.2.2. Placa con residuo de poliuretano gris.....	174
9.2.3. Placa con residuo de poliamida	175
9.2.4. Resultados	176
9.2.5. Conclusiones.....	179
Capítulo 10. Reciclaje de las placas de yeso laminado de la investigación.....	181
10.1. Procedimiento experimental para el reciclaje.....	185
10.1.1. Triturado de las placas de yeso	185
10.1.2. Tamizado del material	185
10.1.3. Desechado	188
10.2. Caracterización de mezclas con material reutilizado	189
10.2.1. Resultados	191
10.2.2. Conclusiones.....	192



10.3. Caracterización de placas de yeso con material reutilizado .	193
10.3.1. Resultados.....	194
10.3.2. Conclusiones	196
10.4. Conclusiones finales.....	197
Capítulo 11. Estudio económico	199
11.1. Valoración cuantitativa. Estudio de costes	201
11.1.1. Coste de las materias primas de la placa objeto de investigación	202
11.1.2. Composición de placas estudiadas	206
11.1.3. Análisis del coste de una pared de 1m ²	207
11.1.4. Coste del sistema	209
11.2. Valoración cualitativa o Análisis cualitativo	211
11.2.1. Gestión del residuo	211
11.2.2. Beneficio medioambiental del nuevo material	212
11.3. Conclusiones	212
Capítulo 12. Conclusiones finales Futuras líneas de investigación	213
12.1. Conclusiones finales.....	215
12.2. Futuras líneas de investigación.....	218
Anexo 1. Producción científica.....	219
Anexo 2. Bibliografía	225

Capítulo 1.

Introducción



El progreso y riqueza alcanzada en los países industrializados genera, además de consecuencias positivas, efectos no deseados. Hay una demanda creciente y no sostenible de materias primas, energía y agua, así como un aumento progresivo de los residuos, tanto los procedentes de la industria como los de ámbito urbano.

La gestión de residuos provoca graves problemas, como un notable impacto en el medio ambiente debido al depósito en vertederos de la mayoría de los residuos, o la elevada carga económica que supone su eliminación.

Un primer paso en la reducción de estos residuos plantea la gestión adecuada de los recursos, tratando de prolongar el ciclo de vida de los mismos. Si se trata de materias primas de origen natural hay que asegurar la continuidad de su renovación, y si son de origen industrial deben ser convenientemente reciclados. Por otro lado hay que reducir el consumo de materiales no renovables, gestionando su uso de forma eficaz y responsable.

La premisa en la que basarse debe ser la búsqueda de soluciones que cumplan con las exigencias de proteger el medio ambiente y que además no comporten un coste elevado.

Una posible vía de actuación para garantizar el desarrollo sostenible es la reutilización de los residuos, volviéndolos a incluir en el ciclo industrial, con la misma finalidad que inicialmente tenían. Y si esto no es posible, buscándoles una nueva utilidad, reciclándolos como materia prima para otros productos, teniendo en cuenta sus características físicas, químicas y mecánicas.

En el ámbito de la construcción se lleva investigando desde finales del siglo XX, en la idea de introducir en un material tradicional residuos o materiales reciclados, buscando mejorar alguna prestación del material tradicional, hallando por añadidura una salida distinta al depósito en vertedero para ese residuo, ahorrando materia prima y contribuyendo de esta forma a una construcción sostenible.

Esta Tesis Doctoral plantea el estudio pormenorizado de la posibilidad de incorporación de diversos residuos poliméricos de origen industrial (espumas de poliuretano, poliamida), para la elaboración de nuevos productos prefabricados a base de yeso de uso en edificación, centrando la investigación en las placas de yeso laminado. Se exponen los resultados de los diversos ensayos realizados, planteando posibles usos reales de los materiales obtenidos.



1.1. Justificación del tema elegido

Se ha elegido el yeso como base en este estudio por su extenso uso en la construcción, su abundancia, disponibilidad y bajo coste. El yeso se encuentra de forma importante en la península ibérica, de manera que en España se ubica la 2ª mayor cantera de yesos del mundo, en la localidad Almeriense de Los Yesares, donde se producen y exportan 3 millones de toneladas al año¹, siendo de esta forma el segundo productor mundial de yeso tras EEUU. Además de líder en Europa en producción y exportación, España también es uno de los principales consumidores para su uso en construcción.

Por otro lado es innegable el beneficio de aprovechar residuos industriales: al reutilizar materia prima, la demanda de recursos naturales disminuye, con lo que la huella ecológica de esa industria y/o producto también se ve reducida. Además aparece un ahorro económico en la empresa, ya que necesita adquirir menos materia prima y los costes de la eliminación de esos residuos desaparecen. Sin olvidar toda la nueva legislación aprobada en las últimas décadas por distintas administraciones, con el fin de aumentar el reciclaje y paliar el problema de los residuos^{2,3,4}.

La elección de los residuos de poliamida en polvo y espumas de poliuretano para esta investigación, viene dada por la presencia de industrias generadoras de los mismos en nuestra Comunidad Autónoma (Castilla y León).

Existen antecedentes en la aplicación de materiales poliméricos en una matriz de yeso en prefabricados, materiales aligerados a base de yeso o escayola aligerada con corcho natural o con corcho artificial, y mezclas de yeso y escayola aligerados con gránulos de poliestireno expandido, pero prácticamente no existen referencias al empleo de residuos de poliamida en polvo y de residuos de espumas de poliuretano como aligerante.

¹ Productos. Placo Saint – Gobain (2014). www.placo.es

² Directiva Marco de Residuos. Parlamento Europeo y del Consejo. D 2008/98/CE.

³ Programa Estatal de Prevención de Residuos 2014-2020. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, Gobierno de España. BOE-A-2014-679.

⁴ Plan Nacional Integral de Residuos de España (PNIR). 2008-2015. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, Gobierno de España. BOE-A-2009-3243.



1.2. El yeso como materia prima

Con el término yeso denominamos por un lado, al mineral o roca natural llamada piedra de yeso o Aljez, y por otro, al producto en polvo de origen industrial obtenido por calcinación y molienda del mismo.

Este **mineral de yeso** (Imagen 1.1.), se forma a partir de la evaporación de las sales que se encuentran disueltas en el agua del mar y en los lagos salados, produciéndose una precipitación química, la cual origina depósitos sedimentarios.



Imagen 1.1. Variedades de mineral de yeso

Las reservas actuales de yeso se originaron hace 200 millones de años tras la desecación de diversos mares, que formaban parte de lo que actualmente son nuestros continentes. Es un mineral de color blanco, pero debido a la presencia de impurezas puede tornarse gris, castaño o rosado.

Está compuesto químicamente por sulfato cálcico dihidratado $[\text{Ca}(\text{SO}_4)(\text{H}_2\text{O})_2]$, pudiendo presentar diversas impurezas (arcillas, sílice, dolomía, etc). De escasa dureza (con un valor de 2 en la escala de Mohs) y poco resistente a la intemperie. Se obtiene directamente de la naturaleza sin sufrir alteraciones importantes, siendo necesario emplear poca energía en su transformación.

El **yeso de origen industrial** (Imagen 1.2.), está compuesto esencialmente por sulfato cálcico hemihidratado $[\text{Ca}(\text{SO}_4)(\text{H}_2\text{O})_{1/2}]$, obtenido por la deshidratación parcial del mineral de yeso o Aljez, en hornos industriales a altas temperaturas.

Es un conglomerante, es decir, es un compuesto capaz de unir distintos materiales entre sí o a una base, al amasarse recupera el agua que perdió en la cocción, convirtiéndose así en un material plástico con el que se puede trabajar, pero que endurece en el aire mediante un proceso físico-químico denominado fraguado.



Imagen 1.2. Yeso de origen industrial

Su empleo está muy extendido en el campo de la **edificación**, siendo muy utilizado como revestimiento interior (guarnecidos, enlucidos y revocos), empleándose como conglomerante auxiliar en obra, productos autonivelantes, elementos prefabricados, como adición del cemento, etc. Todo ello debido a sus elevadas prestaciones:

- Se trata de un material muy versátil, capaz de adaptarse a las formas y diseños más complejos.
- Debido a su estructura microporosa, los revestimientos de yeso regulan la humedad del ambiente y absorben rápidamente la humedad en exceso, para restituirla al ambiente cuando el aire está más seco. Esta elevada permeabilidad, no permite su empleo en exteriores.
- Es un buen aislante térmico, posee una gran inercia térmica, tiene un bajo coeficiente de conductividad térmica, reduce los puentes térmicos y elimina el fenómeno de pared fría.
- Regula el sonido, creando zonas silenciosas en las viviendas.
- Es incombustible, bajo la acción del fuego sólo evapora agua contenida en sus poros, por lo que no desprende gases ni vapores de carácter tóxico. Tras su deshidratación continua protegiendo el elemento constructivo que reviste, por lo que se le puede considerar una protección pasiva frente al fuego. Con ciertos espesores es capaz de retardar la propagación del fuego durante unas 3 horas.
- Destaca su buena adherencia a materiales pétreos naturales y artificiales (material cerámico), muy buena al hierro (lo oxida) y nula a la madera.
- Es muy agresivo con el cemento en ambientes húmedos, como en las cimentaciones, pero leve en ambientes secos.



La industria del yeso no ha dejado de investigar en la búsqueda de nuevos usos de este material, perfeccionando la elaboración de prefabricados y tratando de eliminar las limitaciones propias del material, manipulándolo a través de la incorporación de diversos agregados. Algunos ejemplos de agregados son: fibras para mejorar las resistencias mecánicas, áridos ligeros para reducir el peso de las mezclas, retardadores de fraguado para aplicar el yeso mediante proyección y otros productos químicos que consiguen impermeabilizarlo.

Atendiendo a la clasificación de la norma UNE-EN 13279-1:2009⁵, se puede observar que el conglomerante de yeso una vez procesado, puede utilizarse como yeso de construcción, yeso para aplicaciones especiales, o bien para elementos prefabricados (Figura 1.1.).

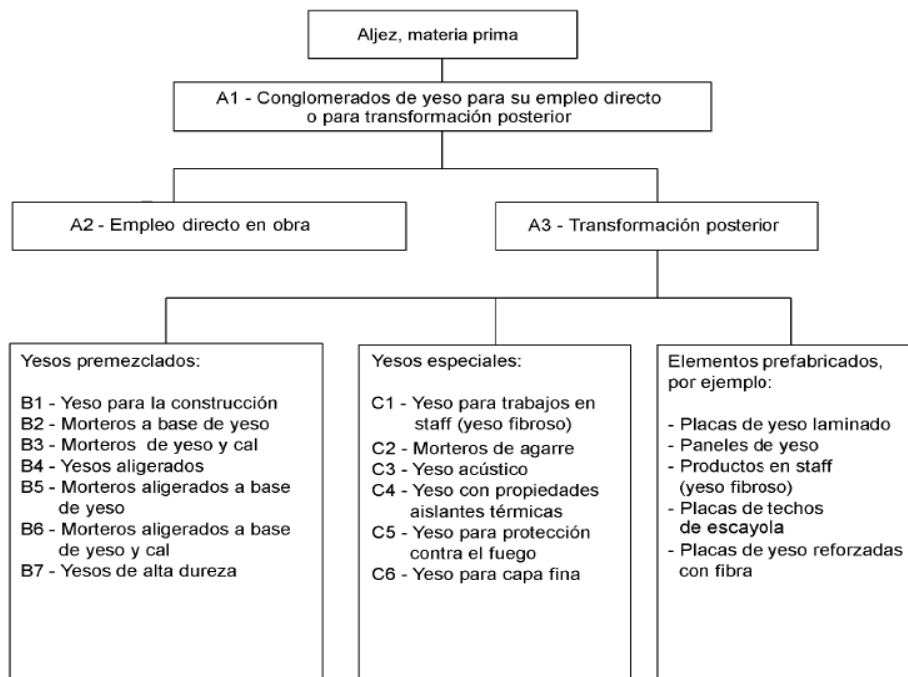


Figura 1.1. Familia de los yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción

⁵ UNE-EN 13279-1:2009. Yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción. Parte 1: Definiciones y especificaciones.



Además de emplearse en la construcción, el yeso se utiliza en otros muchos campos, siendo estas áreas de lo más diversas:

- **Medicina:** para la elaboración de vendas de yeso, en la fabricación de moldes quirúrgicos y odontológicos y en la producción de pasta dentífrica.
- **Cerámica:** necesario en la elaboración de moldes de aparatos sanitarios y vajillas, tizas y esculturas artísticas.
- **Agricultura:** utilizado con el fin de mejorar las tierras de cultivo, como abono y desalinizador. Para la eliminación de elementos contaminantes (especialmente metales pesados) en terrenos industriales.
- **Producción del cemento Portland:** actuando como elemento retardador del fraguado, también es utilizado para obtener ácido sulfúrico y como material fundente en la industria.
- **Industria química y farmacéutica:** como fuente de calcio, componente en medicamentos y lápices labiales, en tratamientos corporales y faciales.
- **Industria alimentaria,** en el tratamiento de agua, limpieza de vinos, refinado de azúcar, vegetales enlatados y alimentos para animales⁶.

⁶ Bustillo, M., Calvo, J.P., Fueyo, L. (2001). «Rocas Industriales. Tipología, aplicaciones en la construcción e industrias del sector». Editorial Rocas y minerales, Madrid, 410 pp.



1.3. Antecedentes históricos del yeso

El yeso se emplea desde la antigüedad en la construcción, los primeros rastros del uso de este material aparecen en Catal-Huyuk (Turquía) durante el IX milenio a.C.⁷, donde existen guarnecidos de yeso y cal que soportan pinturas al fresco. En el VI milenio a.C. aparecen moldeados de yeso en Jericó (Israel).

Durante la época faraónica en Egipto el yeso se utiliza como revoco en paramentos pétreos de tumbas y templos, y como relleno de juntas entre los sillares de las construcciones de cantería. Un ejemplo sería la pirámide de Keops, datada en el 2.800 a.C.

En la civilización griega aparece en los revestimientos de suelos y paredes del palacio de Knossos⁸ (Creta), entre 2.600 y 2.200 a.C.. Siendo en Grecia donde aparece la primera referencia escrita del "gypso", que significa tierra más agua en griego, y que se utilizó para referirse al yeso y a la cal.

En Pompeya aparecieron importantes decoraciones y revestimientos de yeso, lo que corrobora el uso de este material en época del Imperio Romano, entre el siglo I a.C. y el siglo V d.C. En los escritos de Catón, Columela y Plinio el viejo también aparecen referencias a las aplicaciones del yeso. Así como en "Los diez libros de Arquitectura" de Vitruvio, arquitecto y tratadista romano.

La civilización romana generalizó su uso en Europa y posteriormente, los españoles (a través de la herencia árabe) lo introdujeron en América Latina.

Donde más se utilizó el yeso fue en Persia (aprox. siglo VI a.C.), como ejemplo tenemos el Alcázar Omeya construido sobre la ciudadela de Amman (Jordania), donde aparecen piezas prefabricadas de yeso en los arcos⁹.

En época medieval también encontramos en Europa ejemplos del uso del yeso, destacando la región de París (Francia), donde se utilizaba en revestimientos, forjados de pisos, en tabiquería y chimeneas. En España durante los siglos XII al XV, hay que destacar la tradición de las

⁷ De Villanueva, L. (2004). «Evolución histórica de la construcción con yeso». Informes de la Construcción Vol.56, nº 493.

⁸ Bustillo Revuelta, M., Calvo Sorando, J.P. (2005). «Materiales de construcción». Fuego Editores, Madrid, 148 pp.

⁹ Almagro, A., (2001). «Un aspecto constructivo de las bóvedas en Al-Andalus. Al-Qantara». Revista de estudios árabes, Vol. XXII, pp. 147-170.



yaserías (obras hechas con yeso, con un alto valor decorativo) tanto en el Reino Nazarí de Granada, como en Aragón, Toledo y Sevilla. Este arte perduró durante la primera mitad del siglo XVI, siendo el Paraninfo de la Universidad de Alcalá, un ejemplo del mejor plateresco.

Durante el renacimiento fue muy utilizado el arte del estuco, donde a partir de un enlucido de yeso se llegaba a obtener un aspecto mármoleo sin necesidad de pintura¹⁰. En el barroco se empleaba abundantemente el yeso para la decoración de interiores, en molduras u otros motivos ornamentales de gran precisión, llegándose a mezclar yeso con fibras vegetales durante la máxima expresión del rococó en Francia.

La Imagen 1.3. presenta una muestra de algunos trabajos con yeso de época nazarí, renacentista y barroca.



Imagen 1.3. Diversos trabajos con yeso

A partir del siglo XVIII comienza el proceso de industrialización, se mecanizan los sistemas de extracción y trituración previa y aparecen nuevos hornos. Los aditivos (retardadores de fraguado) comienzan a introducirse en fábrica, con lo que se consiguen yesos mucho más homogéneos de los que hasta entonces se aplicaban, ya que la adición en obra se vuelve mucho más complicada.

Tras la segunda guerra mundial, comienzan a añadirse nuevos agregados en los yesos, se trata de la perlita y la vermiculita, con los que se obtenían productos aligerados y capaces de mejorar el aislamiento térmico de los revestimientos.

Posteriormente se ha investigado en yesos capaces de ser proyectados mecánicamente y en mejorar los tiempos de fraguado, en encontrar yesos de mayor dureza o de mayor resistencia al fuego.

¹⁰ Gárate Rojas, I. (1999). «Artes de los Yesos. Yaserías y estucos». Instituto Español de Arquitectura. Universidad de Alcalá de Henares, 381 pp.



1.4. Prefabricados de yeso

La prefabricación es la fabricación previa a la puesta en obra, o construcción industrializada¹¹. Podemos definir como materiales prefabricados a aquellos elementos capaces de ser ensamblados entre sí en obra y que han sido manufacturados previamente en fábrica o en otro sitio cercano a la obra (moldeados, endurecidos, etc.) mediante una producción mecanizada y en serie, los cuales conforman una parte de un edificio tras una fase de montaje. Existen prefabricados de hormigón, acero, madera, yeso, cal, cemento, etc.

El uso de estos elementos implica numerosas ventajas: se incrementa la velocidad de ejecución¹² así como la calidad del producto, ya que el material se produce bajo unas condiciones exhaustivas y estrictos controles de calidad, siendo mucho más eficaz la gestión de los residuos en estos entornos controlados de producción. Es más sencillo el control económico de la obra ya que el dimensionado es más preciso siendo mucho menor el desperdicio de material, aspecto que repercute favorablemente en el medio ambiente.

Los prefabricados de yeso se confeccionan a partir de un conglomerante, amasado generalmente con agua y luego moldeado, extrusionado, laminado, etc., para dar al producto la forma definitiva. El endurecimiento se va a realizar mediante el fraguado del conglomerante.

Atendiendo a la normativa vigente, establecemos la siguiente clasificación:

- Placas de yeso laminado
- Paneles de yeso
- Productos en staff (yeso fibrosos)
- Placas de escayola para techos suspendidos
- Placas de yeso laminado reforzadas con fibras
- Elementos decorativos

¹¹ Salas, J. (2008). «From closed system precasting to the subtle industrialization of building construction: keys to technological change». Informes de la Construcción, Vol.60, 512, 19-34.

¹² Escrig, C. (2010) «Evolución de los sistemas de construcción industrializados a base de elementos prefabricados de hormigón». Comunicación del Departamento de Resistencia de Materiales y Estructuras a la Ingeniería de la Universidad Politécnica de Cataluña.



1.4.1. Placas de yeso laminado

Este tipo de tabiquería tiene una larga tradición en Estados Unidos y en diversos países del norte de Europa. El origen de la placa de yeso laminado está en Estados Unidos a principios del siglo XX, fue la solución que se dio para disminuir los riesgos de incendio que tenía el empleo de tableros de madera, aumentando de esta forma la resistencia al fuego de la estructura¹³. Su uso en otros países, sobre todo de la zona mediterránea, ha originado la industrialización de este sistema constructivo. Aunque en España se emplea sobre todo en edificación no residencial, su aplicación en viviendas es reducido si lo comparamos con el resto de Europa. Sin embargo, esta tendencia poco a poco se va invirtiendo, ya que las nuevas exigencias del Código Técnico en el ámbito del aislamiento acústico¹⁴, imponen la necesidad de colocar estos sistemas para cumplir los requisitos mínimos de aislamiento.

Las placas de yeso laminado (PYL) (Imagen 1.4.), también llamadas paneles de cartón-yeso, vienen definidas en la norma UNE-EN 520:2005+A1¹⁵, están formadas por un alma de yeso íntimamente ligada a dos láminas de cartón para formar placas rectangulares y lisas. Las superficies del cartón pueden variar en función de la utilización de cada tipo de placa, y el alma puede contener aditivos que le confieran propiedades adicionales.

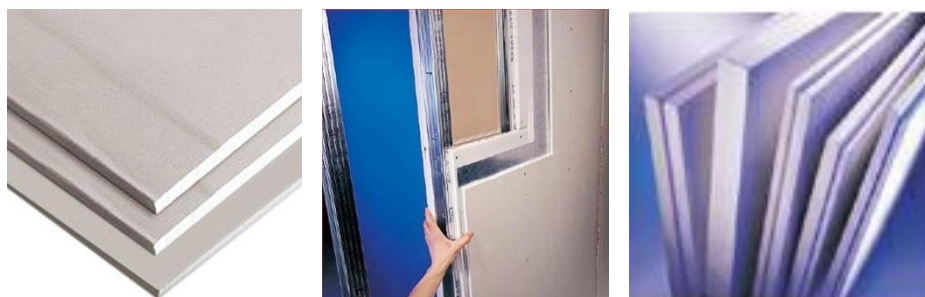


Imagen 1.4. Placas de yeso laminado

Durante el proceso de fabricación, la pasta de yeso se vierte sobre una lámina de cartón continua y se tapa con otra, haciendo pasar el conjunto por unos cilindros laminadores donde se calibra el espesor de

¹³ Maroto, P. (2014). «La placa de yeso laminado como material sostenible». Jornadas sobre materiales aislantes y eficiencia energética. Fundación de la energía (Madrid)

¹⁴ Código Técnico de la Edificación. DB – HR: “Protección frente al ruido”.

¹⁵ UNE-EN 520:2005+A1. Placas de yeso laminado. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo.



la placa, al tiempo que discurren por una cinta sin fin hasta que fragua el yeso y puede cortarse con una máquina cizalladora con las medidas correspondientes. Para terminar el proceso se introducen en un túnel de secado, a cuya salida se produce el empaquetado y posterior almacenaje para su venta. Generalmente, el espesor de las placas varía entre los 12,5 y 18 mm con anchuras de 1,20 m y alturas de 2,50 m.

Atendiendo a la norma UNE-EN 520:2005+A1, la clasificación de las placas de yeso laminado es la siguiente:

- **PYL tipo A:** En una de cuyas caras puede aplicarse una terminación decorativa.
- **PYL tipo H:** Con capacidad de absorción de agua reducida.
- **PYL tipo E:** Especialmente fabricadas para su utilización en revestimientos de paramentos exteriores.
- **PYL tipo F:** Con la cohesión del alma mejorada a altas temperaturas.
- **PYL tipo P:** Tienen una cara preparada para recibir un enlucido de yeso.
- **PYL tipo D:** Con densidad controlada.
- **PYL tipo R:** Con resistencia mejorada.
- **PYL tipo I:** Con dureza superficial mejorada.

Algunas de sus propiedades fundamentales se basan en su ligereza, por lo que son fácilmente manejables y no aportan tanto peso a la estructura. Se adaptan con facilidad, instalándose con rapidez, es un sistema limpio y no es necesario tiempo de secado por lo que se acelera la recepción de los trabajos. Adecuadas a la protección frente al fuego, tienen buenas prestaciones acústicas y térmicas, son materiales estables y duraderos, con buena resistencia a flexión. Todas estas características han convertido a las placas de yeso laminado en imprescindibles para albañilería (albañilería en seco), y para trabajos de rehabilitación, restauración y decoración interior.

El sistema de colocación varía según el uso que se pretenda dar a la placa de yeso laminado¹⁶. Para utilizarla en **tabiquería** (Imagen 1.5.), es necesario una estructura autoportante formada por perfiles de acero galvanizado, a la que se atornillan los paneles de cartón-yeso,

¹⁶ Asociación Técnica y Empresarial del Yeso (ATEDY) (2014). www.atedyplacayeso.com



permitiendo dividir, aislar o generar espacios de forma rápida y limpia. La cámara de aire que genera la estructura metálica puede ir rellena de material aislante, lo que mejora sensiblemente el aislamiento acústico del tabique, superando en este sentido las soluciones tradicionales de tabiques de fábrica.

Se puede instalar directamente sobre diferentes muros como **trasdosado** (Imagen 1.6.), utilizando para ello pastas especiales o perfilaría, reforzando el aislamiento frente a los cambios de temperaturas y ruidos exteriores.

Otra opción es su empleo en suelos como **solera seca** (Imagen 1.7.), aislando del ruido y aportando confort y ahorro de energía a la estancia. El sistema debe instalarse sobre una base de nivelación, sobre la cual se colocan dos capas de placas colocadas a matajuntas y en direcciones contrarias, unidas ambas mediante una pasta de fijación. Como acabado final admite el pegado de revestimientos continuos (moquetas, pvc), tarimas, solados tradicionales, etc.

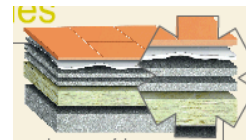
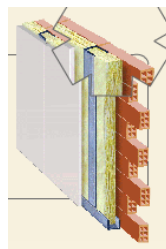
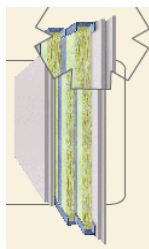


Imagen 1.5. Tabiquería PYL Imagen 1.6. Trasdosado PYL Imagen 1.7. Suelo PYL

A partir de las placas de yeso laminado, se derivan una serie de productos (Figura 1.2.) definidos en la norma UNE-EN 520:2005+A1, son los llamados: productos prefabricados procedentes de procesos secundarios y productos auxiliares.

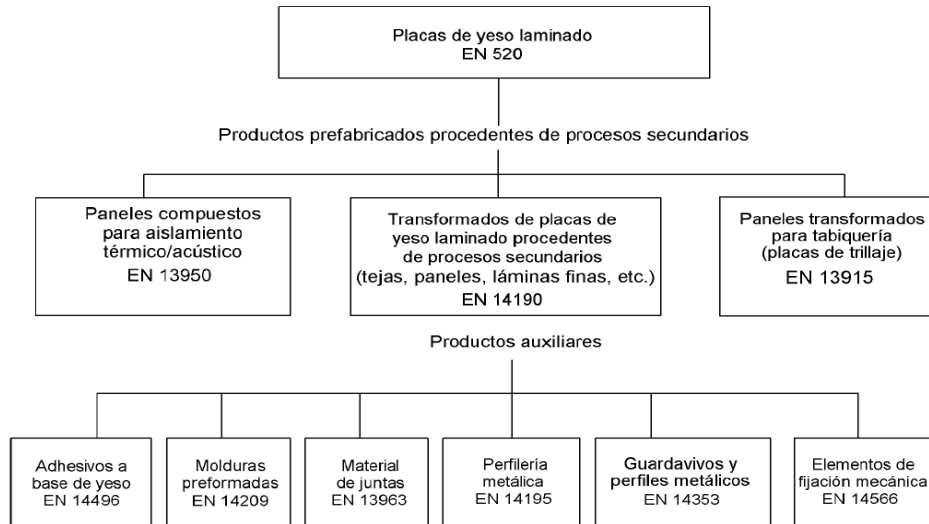


Figura 1.2. Familia de productos auxiliares

Dentro de los productos prefabricados procedentes de procesos secundarios se engloban:

- Paneles compuestos para aislamiento térmico/acústico (UNE-EN 13950:2006¹⁷): se trata de un producto compuesto por una placa de yeso laminado y un material aislante pegado a una de sus caras (EPS, XPS, PUR, PIR, PF, MW), con o sin barrera de vapor, utilizado básicamente como aislamiento (térmico y/o acústico) de paredes (Imagen 1.8.).
- Transformados de placas de yeso laminado procedentes de procesos secundarios (UNE-EN 14190:2006¹⁸): se trata de placas de yeso laminado a las que se le somete a algún tipo de transformación, recorte, perforación, perfilado de cantos, decoración y pegado de láminas de otros materiales con fines decorativos o funcionales, colocación de fijaciones, etc. Usándose para revestimiento de paredes, suelos y techos.

¹⁷ UNE-EN 13950:2006. Transformados de placa de yeso laminado con aislamiento térmico acústico. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo.

¹⁸ UNE-EN 14190:2006. Transformados de placa de yeso laminado procedentes de procesos secundarios. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo.



- Paneles transformados con placas de yeso laminado con alma celular de cartón (UNE-EN 13915:2009¹⁹), también denominadas placas de trillaje: producto formado por dos placas de yeso laminado y un alma de cartón celular, cuyo uso previsto son los tabiques ligeros, trasdosados y revestimientos, para uso general en edificios (Imagen 1.9.).

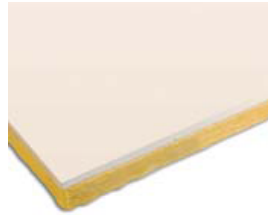


Imagen 1.8. Panel compuesto para aislamiento



Imagen 1.9. Placa de trillaje

1.4.2. Paneles de yeso

Según la norma UNE-EN 12859:2012²⁰ se define el panel de yeso como aquel elemento constructivo prefabricado elaborado con sulfato cálcico y agua, al que se le pueden incorporar fibras, cargas, áridos y otros aditivos, y que se puede colorear mediante pigmentos. También son conocidos como bloques de yeso (Imagen 1.10.).

Se emplean para ejecutar paramentos no portantes, divisiones interiores en todo tipo de ambientes, revestimiento interior de tabiques, como doble pared de muro exterior, tabiques sanitarios o tabiques cortafuegos, huecos de ascensores, etc. No se utilizan para la ejecución de techos. Son de forma paralelepípedica, macizos o perforados, tienen sus bordes machihembrados para conseguir un perfecto encastre entre los mismos, con espesores superiores a 5 cm, sus caras son planas y pulidas, por lo que no es necesario realizar un revoco posterior. La instalación se realiza en seco mediante el uso de adhesivos y masillas.

Se fabrican por moldeo, vertiendo la pasta previamente mezclada y homogeneizada, con una consistencia fluida, en un molde tratado con desencofrante. Tras el fraguado se introducen en túneles para eliminar la humedad residual.

¹⁹ UNE-EN 13915:2009. Paneles transformados con placas de yeso laminado con alma celular de cartón. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo.

²⁰ UNE-EN 12859:2012. Paneles de yeso. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo.



La aplicación de estos productos busca asegurar un buen aislamiento térmico y acústico, una resistencia adecuada frente al fuego y una dureza elevada.



Imagen 1.10. Paneles de yeso

El uso de este tipo de material posee numerosas ventajas: tiene un menor coste que la pared tradicional, menor peso que la pared de ladrillo, cuenta con excelentes propiedades ignífugas y al eliminarse la elaboración de mezclas aumenta la velocidad de ejecución.

1.4.3. Productos en staff (yeso fibroso)

Se define un elemento moldeado en staff, según la norma UNE-EN-13815:2012²¹, como aquel producto fabricado en moldes, con un yeso específico mezclado con agua y reforzado con fibras (yute, sisal, de vidrio), telas (yute), enlistonados y listones (de coníferas) o refuerzos metálicos (tela, varilla, perfiles), pudiendo contener aditivos, cargas o áridos.

Se pueden clasificar en tres grupos, definidos por sus funciones, formas y configuraciones principales:

- **Piezas para arquitectura interior (decorativo):** pieza en staff con cualquier forma o configuración geométrica, para trabajos arquitectónicos, como techos con casetones, bóvedas, cúpulas o pórticos.
- **Piezas con prestaciones técnicas:** pieza en staff con cualquier forma o configuración geométrica, con prestaciones técnicas, como conductos para la extracción de humos o encofrados cortafuegos de estructura metálica.

²¹ UNE-EN 13815:2012. Productos en staff (yeso fibroso). Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo.



- **Placas:** pieza en staff, rectangular y lisa para techos suspendidos.

1.4.4. Placas de escayola para techos suspendidos

Según la norma UNE-EN 14246:2006²², las placas de escayola para techos suspendidos son productos prefabricados a partir de escayola (sulfato cálcico) y yeso, al que se les pueden incorporar aditivos, agregados, fibra mineral, fibra de vidrio o fibra de tejido. Se definen dos tipos: placas de escayola para techos continuos y placas de escayola desmontables (registrables) para techos suspendidos. La fabricación de placas para techos tiene su origen en España, siendo exportado este producto a nivel mundial.

Los **techos con placas de escayola para techos continuos** (Imagen 1.11.), necesitan para su puesta en obra de una estructura metálica ligera fijada al forjado, sobre la cual se atornillan las placas de yeso, o bien se colocan con el sistema tradicional de varillas o tirantes de estopa. Es recomendable el enlucido posterior para garantizar la homogeneidad de la misma. Se puede utilizar la placa tradicional sin ningún tipo de prestación, placas con mayor resistencia al fuego o para ambientes húmedos, placa con un acabado decorativo a base de formas geométricas con prestaciones acústicas, etc. Tiene formatos similares a los utilizados en las PYL usadas en tabiquería.



Imagen 1.11. Placa de escayola para techos continuos

Los **techos con placas de escayola desmontables para techos suspendidos** (Imagen 1.12.), se caracterizan por tener un sistema de perfilaría metálica, que crea un entramado sobre el que descansan las placas, que son elementos cuadrados o rectangulares con formatos reducidos (60x60 cm, 50x50 cm...). Se comercializan placas con diversos acabados decorativos, las hay con altas prestaciones acústicas, e incluso hay productos tratados para combatir bacterias y hongos.

²² UNE-EN 14246:2006. Placas de escayola para techos suspendidos. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo.

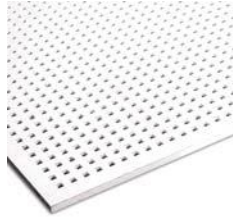


Imagen 1.12. Placa de escayola desmontable para techos suspendidos

1.4.5. Placas de yeso laminado reforzadas con fibras

La clasificación de estos productos se divide en dos grupos: placas de yeso laminado reforzadas con tejido de fibra (UNE EN 15283-1+A1:2009²³), y placas de yeso laminado reforzadas con fibra (UNE EN 15283-2+A1:2009²⁴).

Las **placas de yeso laminado reforzadas con tejido de fibra**, son aquellas compuestas por un alma de yeso íntimamente ligada a un velo o tejido de fibras inorgánicas u orgánicas colocado en el interior o justo bajo las caras. El velo puede estar formado por una o varias hojas y puede estar reforzado con filamentos o membranas de fibra. Las caras pueden variar dependiendo de su aplicación y el alma puede también contener fibras, aditivos o fillers para obtener propiedades adicionales. Pueden tener un acabado decorativo superficial o un enlucido de yeso. Se utilizan en soleras, conductos de ventilación y salida de humos, conducciones para cables, sistemas de falsos techos, acabados aislantes en paredes, forrado de vigas y columnas estructurales.

Por otro lado las **placas de yeso laminado con fibras**, se componen de un alma de yeso fraguado que incorpora dentro del alma de yeso fibras inorgánicas u orgánicas. Pueden llevar aditivos o fillers para obtener propiedades adicionales. Las superficies pueden variar dependiendo del uso. Pueden utilizarse en situaciones que requieren protección al fuego, aislamiento térmico o acústico, o resistencia al esfuerzo cortante.

²³ UNE EN 15283-1+A1:2009. Placas de yeso laminado reforzadas con fibras: Definiciones, requisitos y métodos de ensayo. Parte 1: Placas de yeso laminado reforzadas con tejido de fibra.

²⁴ UNE EN 15283-2+A1:2009. Placas de yeso laminado reforzadas con fibras: Definiciones, requisitos y métodos de ensayo. Parte 2: Placas de yeso laminado con fibras.



1.4.6. Elementos decorativos

Dentro de los prefabricados con escayola, existe una gran variedad de productos utilizados con fines decorativos: molduras, cornisas, plafones, frisos, angulares, baquetones, pilastras, ménsulas y capiteles.

Se colocan de forma fácil con adhesivo o con mortero adhesivo sobre cualquier soporte, ya sea sobre el enlucido tradicional o sobre las placas de yeso laminado, antes de los trabajos de pintura o revestimiento.



1.5. Materiales poliméricos

Un material polimérico o polímero, es aquel formado por pequeñas unidades llamadas monómeros y que se combinan entre sí mediante reacciones de polimerización, dando lugar a moléculas de gran tamaño.

Aparte de las peculiaridades de cada uno, los polímeros son por lo general, materiales ligeros, resistentes a la corrosión, insolubles en agua, solubles en su mayoría en disolventes orgánicos, muy versátiles de color, poseen una baja conductividad térmica (entre 100 y 1000 veces menor que los metales) y baja conductividad eléctrica. El coeficiente de dilatación es muy superior al de los metales, con una elevada capacidad calorífica. Sufren envejecimiento por acción del oxígeno y la luz solar.

1.5.1. Clasificación

La clasificación de polímeros se puede realizar atendiendo a diferentes parámetros:

De acuerdo al **origen** de los polímeros existen:

- **Polímeros naturales** de gran valor comercial (seda, caucho, algodón, celulosa).
- **Polímeros sintéticos** la mayoría de los utilizados en nuestra vida diaria.

Según el **proceso de obtención**, los polímeros se pueden dividir en dos grandes grupos:

- **Polímeros de condensación o por etapas:** se forman a partir de la unión de monómeros a través de la eliminación de alguna pequeña molécula. Algunos ejemplos son: poliamidas, poliimidas, poliésteres, poliuretanos, policarbonatos, etc.
- **Polímeros de adición o en cadena:** resultan de la unión de monómeros por medio de enlaces múltiples, sin la pérdida de moléculas pequeñas. Algunos de los más conocidos son: polietileno, polipropileno, policloruro de vinilo, poliestireno, etc.

Según el **comportamiento frente al calor**, comprobando si el material funde y fluye o por el contrario no lo hace. Este comportamiento depende de su estructura. Así, los polímeros se clasifican en tres familias:



- **Polímeros termoplásticos:** tienen como característica esencial que se “ablandan” por la acción del calor llegando a fluir, volviendo a recuperar sus propiedades cuando baja la temperatura, por lo que pueden ser moldeados adquiriendo diferentes formas varias veces permitiendo así su reciclaje. Entre los termoplásticos se encuentran los plásticos de mayor uso en la industria del envase y del embalaje. El 80% de los plásticos pertenecen a este grupo.
 - Polietileno (PE) de alta densidad (HDPE – PEAD)
 - Polietileno (PE) de baja densidad (LDPE – PEBD)
 - Polietileno de ultra-alto peso molecular (HHMW)
 - Polipropileno (PP)
 - Policloruro de vinilo (PVC):
 - Poliestireno (PS), poliestireno expandido (PS-E, EPS) y extrusionado (XPS).
 - Politereftalato de etilo (PET)
 - Policarbonato (PC)
 - Polimetacrilato de etilo (PMMA)
 - Politetrafluoretileno (Teflón, PTFE)
 - Poliamida (Nailon)

- **Polímeros termoestables:** no pueden volver a moldearse o fundirse, con la acción del calor se descomponen y carbonizan. Son duros y más rígidos que los anteriores, pero son frágiles (al intentar doblarlos se fracturan). Los más comunes son:
 - Resinas fenólicas, la más conocida es la baquelita (PF)
 - Amino-resinas, las más conocidas son las de melanina-formaldehído (MF) y la de urea-formaldehído (UF)
 - Resinas alquídicas
 - Resinas de poliuretano
 - Resinas de poliéster y resinas epoxi.
 - Espumas de poliuretano (PU)
 - Poliamida (PA)

- **Polímeros elastómeros:** este tipo de polímeros presentan una alta deformación elástica al aplicar una fuerza sobre ellos, pudiendo



recuperar total o parcialmente su forma cuando cesa la fuerza.
Destacamos:

- Caucho natural (NR)
- Caucho butadieno-estireno (SBR)
- Cauchos etileno-propileno (EPM – EPDM)
- Cauchos de cloropreno (CR)
- Poliuretano (pinturas, fibras textiles)
- Silicona (SI)

1.5.2. Producción y demanda

A partir de la 2ª mitad del siglo XX, los polímeros pasaron a ser parte esencial de nuestra sociedad, su uso se fue extendiendo progresivamente, llegando a considerarse un material indispensable en todas las facetas de nuestra vida.

En el año 2012 la industria de los plásticos supuso 1,4 millones de puestos de trabajo para la Unión Europea más Noruega y Suiza (EU-27+2), con una cifra de negocio de unos 300 billones de euros²⁵. Esto se traduce en una cuota de un 20,4% de la producción mundial de plásticos, situándonos en un segundo puesto tras China (23,9%) (Figura 1.3.).

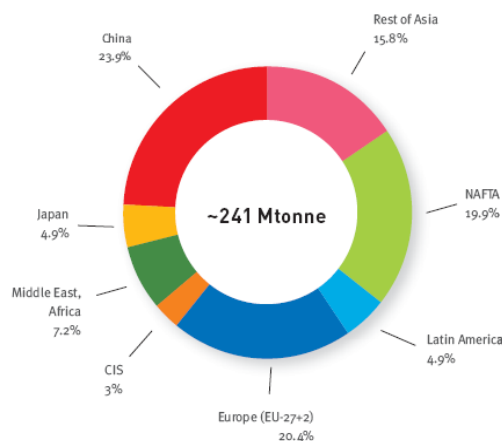


Figura 1.3. Producción mundial de plásticos 2012

²⁵ Plastics – the Facts 2013. An analysis of European latest plastics production, demand and waste data. <http://www.plasticseurope.org>



La tendencia de producción europea ha sido creciente en los últimos 60 años. No obstante si comparamos los datos de los dos últimos años, observamos un descenso de un 3% entre la producción del año 2011 frente a la del 2012 (Figura 1.4.).

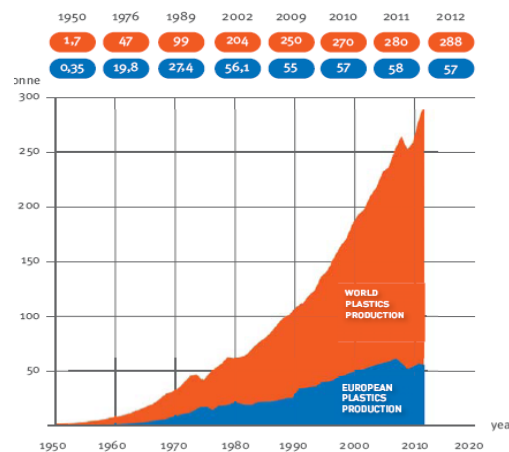


Figura 1.4. Producción mundial de plásticos 1950-2012

La demanda de plásticos en Europa conlleva una producción de 45,9 millones de toneladas. Los datos por sectores, presenta a la industria del embalaje como el mayor demandante con una cuota de mercado del 39,4 %, seguido por la edificación y construcción (20,3 %). El sector del automóvil se encuentra en tercera posición (8,2%), seguido por la electricidad y las aplicaciones electrónicas (5,5%), la agricultura (4,2%), cerrando esta demanda un conjunto de aplicaciones como mobiliario, productos médicos, consumo familiar (22,4%) (Figura 1.5.).

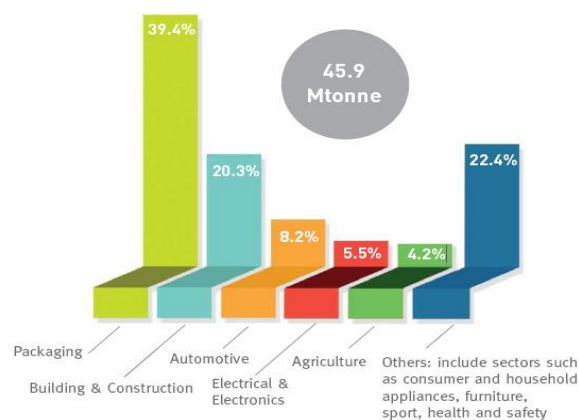


Figura 1.5. Demanda europea de plásticos por sectores 2012



Si se clasifica la demanda por tipo de polímero, el polipropileno está en cabeza, con una cuota del 18,8%, seguido por el polietileno (17,5%) y el PVC (10,7%) (Figura 1.6.).

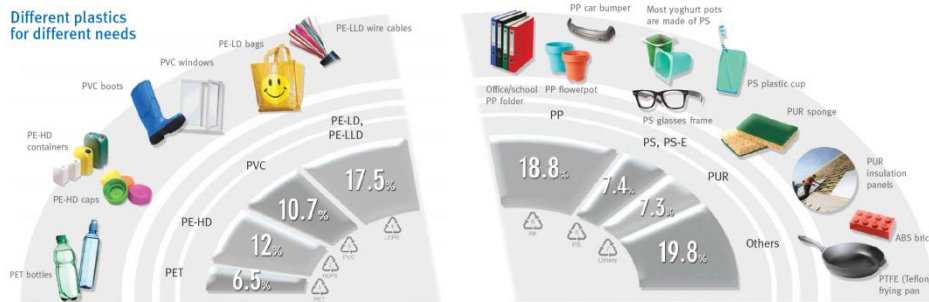


Figure 6: European plastics demand* by resin type 2012
Source: PlasticsEurope (PEMRG) / Consultic / ECBB
* EU-27+NH

Figura 1.6. Demanda europea de plásticos por tipo de polímero 2012

El polímero más demandado en el sector de la edificación y construcción, es el policloruro de vinilo (PVC), seguido por el polietileno de alta densidad (HDPE – PEAD), el poliestireno expandido (PS-E) y el poliuretano (PUR). De los 45,9 MTn de plásticos producidos en Europa, el 7,3 % es poliuretano (unos 6,35 MTn). De este volumen de producción aproximadamente el 70% se presenta en forma de espuma (1,3 MTn en espuma flexible y 1,1 MTn en espuma rígida) (Figura 1.7.).

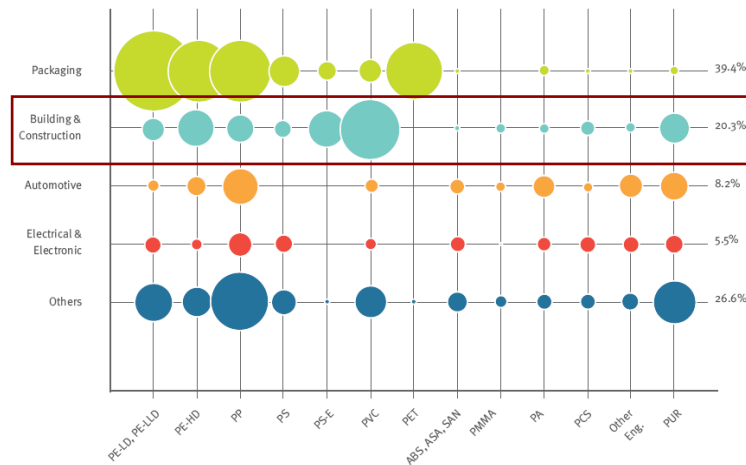


Figura 1.7. Demanda europea de plásticos por tipo de polímero y sector 2012



1.5.3. Residuos

Tras cualquier actividad industrial, aparece la generación de residuos los cuales pueden tener diferentes salidas. La primera opción (a evitar) es el depósito en vertederos, otra sería la combustión para recuperación de energía y por último la reutilización o reciclaje del residuo (dando así una segunda vida al material).

Los 45,9 millones de toneladas de producción plástica en Europa en el año 2012, generaron tras su consumo una cifra de 25,2 millones de toneladas de residuos. De esta cifra, 9,6 millones de toneladas fueron depositadas en vertederos (38,1%) y el resto (61,9%) se recuperó: el 26,3% (6,6 millones de toneladas) a partir de plantas de reciclaje y el otro 35,6% (8,9 millones de toneladas) en combustión para recuperación de energía (Figura 1.8.).

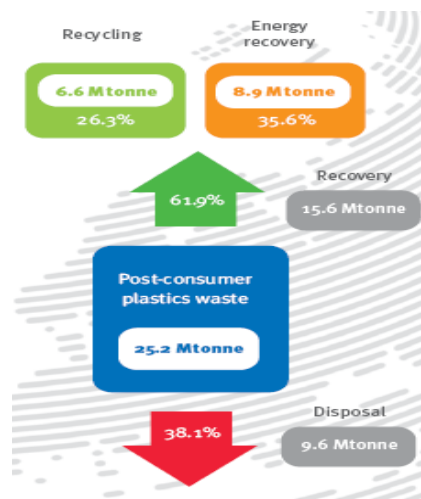


Figura 1.8. Residuos plásticos en Europa 2012

Si se analizan los datos del destino de los residuos plásticos de los últimos 6 años en Europa (Figura 1.9.), se constata una tendencia positiva de los mismos, donde el depósito en vertederos se ha ido reduciendo, aumentando por el otro lado el reciclaje y la combustión para recuperación de energía.

Si comparamos las cifras de los dos últimos años, en el año 2011, la recuperación de plásticos fue de un 59,6%, incrementando hasta un 61,9% en el año 2012. El depósito en vertederos se redujo un 5,5%, el reciclaje experimentó un incremento del 4,7% y la combustión para recuperación de energía aumentó un 3,3%.

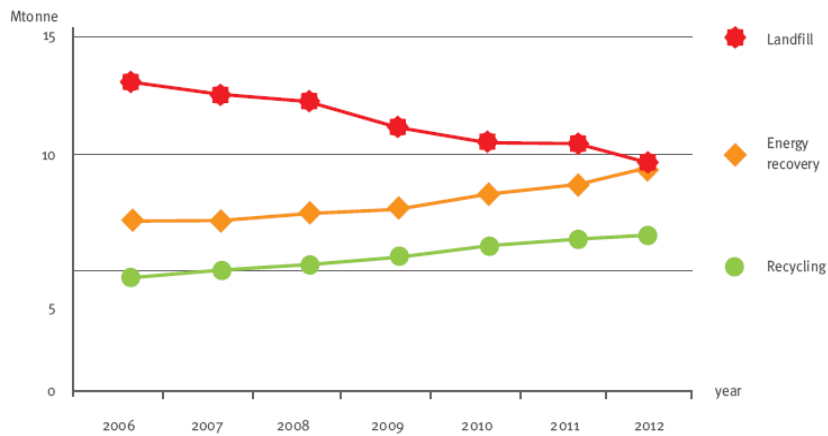


Figura 1.9. Destino de los residuos plásticos en Europa 2006-2012

En España durante el año 2012, el tratamiento de residuos se dividió de la siguiente forma: el sector del reciclaje obtuvo una cifra del 28%, en combustión para recuperación de energía se alcanzó el 17%, abarcando un 55% el depósito en vertederos. Si se compara por tipo de valorización de residuos, el reciclaje en España tiene niveles semejantes a Alemania, Suecia, Austria..., siendo el campo de la valorización energética donde estos países nos superan ampliamente, lo que traducido supone que en España aún se depositan en vertedero altísimas cantidades de residuos de esta naturaleza (Figura 1.10.).

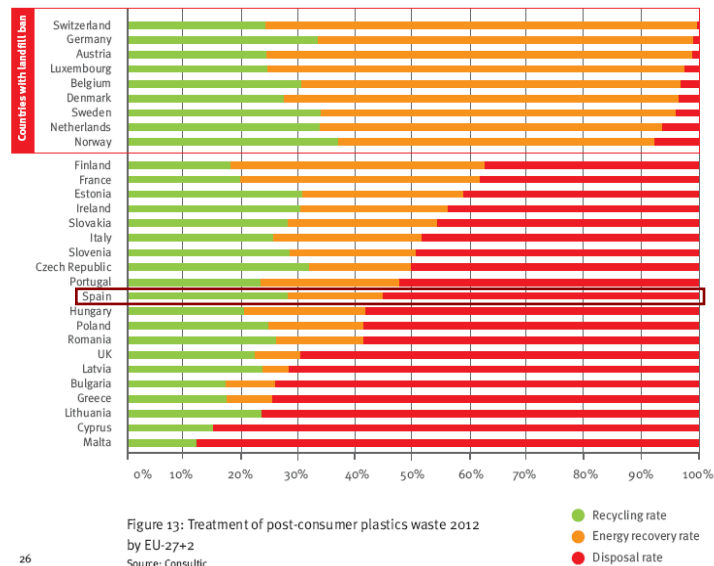


Figure 13: Treatment of post-consumer plastics waste 2012 by EU-27+2
Source: Consultic

Figura 1.10. Tratamiento de residuos plásticos por países (EU-27+2) 2012



1.5.4. Materiales poliméricos utilizados en la Tesis Doctoral

En esta investigación se han utilizado dos residuos de polímeros que se encuentran en grandes cantidades y en numerosas zonas geográficas, lo que permite una disponibilidad adecuada para su recuperación: el poliuretano (PU) y la poliamida (PA). A continuación se amplían las particularidades de estos materiales.

1.5.4.1. Espuma de poliuretano

El poliuretano (PU) es el nombre genérico de los materiales fabricados mediante la polimerización de un poliol y un isocianato, aunque su formulación necesita y admite múltiples variantes y aditivos, consiguiendo de esta forma materiales con características muy distintas, destinadas a usos muy diferentes. Puede ser flexible o rígido.

El poliuretano flexible (Imagen 1.13.) también se conoce como, "Espuma", "Hule esponja", "Hule Espuma", "Espuma de Poliuretano", "Poliuretano Espumado", "Esponja" y "Gomaespuma. En inglés se conoce como PUFF (Polyurethane Flexible Foam) o solamente "Foam". Es un material muy elástico, cuando se retira la carga a la que ha sido sometido, recupera instantáneamente su forma original. Es sumamente ligero y con una alta permeabilidad al aire, dependiendo de las materias primas escogidas en su fabricación y variando la formulación, podemos regular sus propiedades: la amortiguación, la característica elástica, la estructura celular, la densidad aparente y la dureza. Tiene múltiples usos en el mundo actual, algunos de ellos son:

- En colchones como relleno principal o como integrante de los acolchados.
- En mobiliario, en asientos de sofás y sillas, relleno de acolchados, etc.
- Como elemento de los asientos en la industria del automóvil.
- En muchos artículos como juguetes, prendas de vestir, esponjas, calzados, almohadas, cojines, envases y en general todo tipo de acolchados o rellenos.
- Aislamientos industriales.
- Para embalar equipos delicados, en artículos para hospitales, etc.



Imagen 1. 13. PU flexible

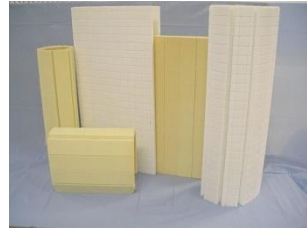


Imagen 1. 14. PUR rígido

El poliuretano rígido (Imagen 1.14.) se conoce como (Polyurethane Foam). Tiene magnífica resistencia al agua, a los aceites, a los ácidos muy diluidos y a soluciones alcalinas. No se ve afectada por hongos, bacterias y malos olores, absorbe ruidos excesivos. Estas son algunas de sus aplicaciones:

- En la construcción, como aislante térmico o como relleno.
- Aislamiento e impermeabilización de techos, losas, muros divisorios y acústicos.
- Frigoríficos y bodegas.
- Refuerzo estructural, paneles.
- Aislamiento de conductos de agua caliente, conductos de calefacción.
- Carrocerías de camiones y microbuses.
- Bases de firmes de azotea como antirruído e impermeabilizante.

A partir de los 2,40 MTn de espumas de PU producidas en Europa (datos de Plasticseurope), se generan un 27% de residuos (648.000 Tn), de los cuales el 21% es recuperado mediante técnicas de reciclado (136.080 Tn) y un 11% valorizado mediante técnicas de incineración (71.280 Tn). Esto supone un 68% de residuo de poliuretano espumado depositado en vertederos (440.640 Tn).

Debido a la composición del poliuretano, las técnicas de valorización mediante incineración, presenta desventajas medioambientales importantes, el proceso genera la emisión de sustancias contaminantes atmosféricas (NO₂, SO₂, dioxinas y emisión de partículas finas).



1.5.4.2. Poliamida en polvo

La poliamida posee una buena resistencia mecánica por lo que se ha utilizado tradicionalmente como refuerzo en forma de fibra en la fabricación de materiales de construcción y en la ingeniería civil, buscando con su incorporación una mejora de las resistencias a flexotracción²⁶. Además tiene una tenacidad (resistencia de un material a romperse o deformarse) y resistencia al impacto elevadas, con un buen comportamiento al deslizamiento y una buena resistencia al desgaste. Como desventaja hay que señalar su capacidad de absorber y despedir humedad de forma reversible, lo cual supone una variación de sus propiedades.

La poliamida en su forma pulverulenta se utiliza en automoción, para equipos industriales, en maquinaria y engranajes, herrajes, bisagras, cadenas de cierre, en muebles de exterior con recubrimiento protector, etc. También en el sinterizado láser para fabricación de piezas funcionales^{27,28}.

Es un material difícil de reciclar cuyo proceso conlleva un coste elevado, lo que muchas veces origina su depósito en vertederos. Por otro lado, el residuo en polvo de poliamida presenta unas características físicas muy interesantes. Posee una granulometría y una geometría propicia, para su inclusión en mezclas para acabados de capa fina y en elementos prefabricados, consiguiendo texturas agradables al tacto. Además al disponer de una estructura porosa, en principio, puede ser incorporada en espacios con algún tipo de requerimiento acústico o térmico.

²⁶ Calderón, V., Clemente, F., García, J.M., Maya, E., De La Peña, J.L. (2006). «Synthesis and Characterization of New Aromatic Polyamides Bearing Crown Ethers or their Dipodal Counterparts in the Pendant Structure (I): Benzo-12-crown-4 and ortho-bis (2-ethoxyethoxy) benzene». *Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry*, vol 44, 2006, 2270 – 2281.

²⁷ Beal, V., Paggi, R., Salmoria, G., Lago, A. (2009). «Statistical Evaluation of Laser Energy Density Effect on Mechanical Properties of Polyamide Parts Manufactured by Selective Laser Sintering». Wiley InterScience (www.interscience.wiley.com).

²⁸ Goodridge, R., Tuck, C., Hague, R. (2011). «Laser sintering of polyamides and other polymers». *Progress in Materials Science* 57, 229–267.

Capítulo 2.

Objetivos



Se ha podido confirmar, a partir de las investigaciones de diversos autores^{29,30}, la posibilidad del uso de residuos poliméricos de diversa naturaleza en la fabricación de yesos aligerados. Este trabajo acomete la tarea de avanzar en este campo, utilizando estos compuestos, ya ensayados y analizados, como materia prima en la elaboración de prefabricados.

2.1. Objetivos

Se pretende dosificar y fabricar placas de yeso laminado aligeradas a partir del uso de residuos de naturaleza polimérica (procedentes de residuos industriales no peligrosos) para obtener materiales con mejores prestaciones y que puedan ser utilizados en construcción.

Los objetivos de esta Tesis Doctoral se alcanzan con el desarrollo de los siguientes apartados:

- a) Realizar un análisis detallado de la viabilidad de elaboración de placas de yeso laminado a partir del reciclado de diversos residuos poliméricos de origen industrial, determinando las concentraciones de polímero adecuadas para la obtención de distintos materiales.
- b) Identificar las propiedades y características de las placas (comportamiento físico y mecánico) para conocer sus ventajas y limitaciones.
- c) Analizar el comportamiento térmico del material (resistencia térmica, reacción al fuego, análisis termogravimétrico), con el fin de conocer su capacidad aislante.
- d) Incorporar refuerzos a base de fibras en las dosificaciones con mejores resultados, con el objetivo de mejorar su comportamiento mecánico.
- e) Proponer formas de aplicación y soluciones constructivas a partir de puesta en obra de estos materiales.

²⁹ Gadea, J., Calderón, V., Rodríguez, A., Garabito J., Campos, P.L., Gutiérrez-González, S. Patente: Procedimiento de obtención de yeso aligerado con residuos de poliuretano espumado. Universidad de Burgos. (2013). N° de publicación: ES 2 381 726 A1

³⁰ Gutiérrez González, S., Gadea, J., Calderón, V., Rodríguez, A., Junco, C., Alameda, L., Serna, S. Patente: Procedimiento de obtención de yeso aligerado con residuos de poliamida en polvo. Universidad de Burgos. (2013). N° de publicación: ES 2396096A1.



- f) Analizar el cierre del ciclo de vida de los residuos utilizados en los materiales investigados a través del empleo de técnicas de reciclado.
- g) Estudiar la viabilidad económica de los productos obtenidos a partir de los materiales investigados.

La investigación se integra dentro del Grupo de Investigación de Materiales de Construcción del Departamento de Construcciones Arquitectónicas e Ingenierías de la Construcción y del Terreno, en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad de Burgos.

Capítulo 3.

Estado del arte



En este capítulo se busca describir los estudios de otros investigadores que tienen similitudes con la propuesta de este trabajo y resultan de especial interés por sus avances en la materia.

Se han encontrado diversas referencias a trabajos científicos donde se incorporan distintos materiales al yeso o escayola, para tratar de mejorar o modificar alguna de sus propiedades, tanto físicas como mecánicas, y obtener de esta forma yesos con propiedades mejoradas.

Por otro lado se analizan las investigaciones sobre el uso de estas u otras mezclas como materia prima para la elaboración de prefabricados de yeso, cuyas cualidades físico-mecánicas difieren de las primeras, lo cual supone un nuevo campo de trabajo, en el que se enmarca el estudio realizado en esta Tesis.

3.1. Yesos aligerados

En este primer apartado se exponen de forma somera los estudios de mezclas de yeso que incluyen agregados de baja densidad, con los que se pretende conseguir yesos con propiedades aligerantes.

3.1.1. Áridos ligeros

Existe una serie de productos con los que tradicionalmente se ha trabajado para aligerar el peso de distintos materiales utilizados en la construcción, se les denomina áridos ligeros (arcilla expandida, perlita expandida, vermiculita expandida). Diversos trabajos han analizado la compatibilidad de estos agregados con el yeso, para utilizarlos como cargas aligerantes³¹.

Para que la adherencia entre el yeso y la **arcilla expandida** sea suficiente deben emplearse granos de diámetro superior a 5 mm, y se debe añadir al menos un 1% de fibra de vidrio como refuerzo, para mejorar los resultados de las resistencias mecánicas. También existe una patente que describe un revestimiento ignífugo³², que gracias a la incorporación de arcilla expandida o perlita natural a su composición obtiene una mejora en la resistencia al fuego del material.

³¹ Del Río Merino, M., Hernández Olivares, F. (1998). «Escayola aligerada con sólidos celulares». Informes de la Construcción Vol.50, nº458. 43-60.

³² Rojas Gomáriz L. Patente: Revestimiento ignífugo aplicable en la edificación. (2000). Nº de publicación: ES 2 141 002 A1.



En el mercado se encuentran productos ya comercializados³³ de base yeso/escayola aligerados con **perlita expandida**. Estos materiales pueden aplicarse de forma manual o mediante proyección mecánica, tanto en techos como en paredes interiores. Constan resultados de estudios que sustentan las elevadas prestaciones acústicas, térmicas y de resistencia frente al fuego de este material, mezclas que son reforzadas con fibra de vidrio³⁴ y con fibra de polipropileno³⁵, para mejorar sus prestaciones mecánicas.

La **vermiculita expandida** también se ha estudiado como producto premezclado con yeso³⁶, encontrándose ya patentado un mortero de baja densidad con propiedades mecánicas mejoradas y baja conductividad térmica³⁷, estas características permiten utilizarlo para aislamientos térmicos y acústicos, y para aplicaciones ignífugas, además puede ser aplicado mediante cualquiera de los sistemas tradicionales existentes.

3.1.2. Residuos de naturaleza orgánica e inorgánica

En este apartado se detallan aquellos yesos aligerados con residuos de diversa procedencia industrial: fabricación de envases, sector del automóvil, de la construcción, etc.

Corcho natural

Los materiales compuestos yeso-corcho natural plantean el uso de desechos de corcho proporcionados por la industria³⁸. Se comprueba que en estas mezclas las propiedades mecánicas empeoran, excepto cuando se incluyen fibras de vidrio en la mezcla. La densidad aparente se ve reducida y se determina que la conductividad térmica se encuentra en valores competitivos, siendo estos dos factores los que pueden indicar las buenas propiedades térmico-acústicas del material.

³³ Placo Saint-Gobain. YPM/A (Proyal XXI, Prolite, Perlinor de Proyectar).

³⁴ Pireztegi, D. (1979). «High strength lightweight building blocks». Chem. Abstr 91, 95776.

³⁵ Manjit S., Mridul G. (1991). «Perlite based building materials a review of current applications». Construction & Building Materials Vol. 5, nº2, 75-81.

³⁶ Yongguang, X., Tongjiang, P., Haifeng, L., Jiming, C. (2011). «Preparation and properties of expanded vermiculite/gypsum thermal insulation boards». Adv Mater Res 178, 220–225.

³⁷ Román Alema, B. Patente: Mortero de yeso con vermiculita expandida y aditivado, y procedimiento para su obtención. (2010). Nº de publicación: WO 2009121984 A1.

³⁸ Hernández-Olivares, F., Bollati, M.R., Del Río, M., Parga - Landa, B. (1999). «Development of cork-gypsum composites for building applications». Construction and Building Materials nº13, 179 - 186.



Papel reciclado

El proceso de fabricación de papel genera considerables cantidades de residuo de pasta de papel. La idea de incorporar estos residuos en el yeso muestra una reducción en la densidad de las mezclas así como una mejora de las resistencias mecánicas³⁹. El hecho de conseguir mezclas homogéneas mediante un triturado previo de los residuos y un correcto secado del material, conlleva un incremento en las resistencias a flexión y a compresión del producto final, y una mejora en las propiedades reológicas del mismo.

Poliestireno expandido (EPS)

Añadir residuos de poliestireno al yeso supone una importante reducción en el peso del material, pero no existe suficiente adherencia entre los granos del aligerante y la matriz base, siendo necesario una gran cantidad de fibras de refuerzo para poder mejorar sus prestaciones mecánicas⁴⁰.

Politereftalato de etilo (PET)

La necesidad de buscar una salida a las ingentes cantidades de residuos de botellas de PET es la base de las investigaciones dentro de esta línea de trabajo⁴¹. Los residuos son triturados antes de introducirlos en la matriz de yeso. Se obtienen reducciones del peso del material en relación al volumen de residuo introducido, disminuyendo también las resistencias mecánicas a flexión, pero aumentando la capacidad aislante del material resultante.

Espuma de Poliuretano

Las conclusiones derivadas del estudio de yeso aligerado con residuos de poliuretano espumado⁴² presentan materiales con bajas densidades, pero que aun así cumplen con los requisitos mínimos en cuanto a los ensayos de flexión y compresión marcados por la normativa. Además el hecho de incluir este polímero en el yeso, supone

³⁹ Agulló, L., Aguado, A., García, T. (2006). «Study of the use of paper manufacturing waste in plaster composite mixtures». *Build Environ* 41, 821–827.

⁴⁰ González Madariaga, F.J., Lloveras Macía, J. (2008). «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, 35 – 43.

⁴¹ Karaman, S., Şahin, S., Günel, H., Örüng, I. (2006). «Stabilization of waste pet bottles with gypsum». *J Appl Sci* 6 (5), 1119–1122.

⁴² Gutiérrez-González, S., Gadea, J., Rodríguez, A., Junco, C., Calderón, V. (2012). «Lightweight plaster materials with enhanced thermal properties made with polyurethane foam wastes». *Construction and Building Materials* 28, 653 - 658.



una importante reducción del coeficiente de conductividad térmica, lo cual implica una mejora en la capacidad de aislamiento térmico del material elaborado.

Poliamida

Se conocen investigaciones, sobre la inclusión de poliamida en forma de fibra en diversos conglomerados de yeso, para incrementar sus propiedades mecánicas⁴³.

Se han llevado a cabo estudios sobre mezclas de yeso aligerado con residuos de poliamida en polvo cuyos resultados indican una mayor resistencia térmica del material a medida que se introduce residuo⁴⁴, a la par que disminuye la densidad mejoran las propiedades reológicas del material⁴⁵.

Escorias blancas

Se ha estudiado y confirmado la viabilidad del uso de escorias blancas de horno de cuchara como agregado en morteros de yeso⁴⁶.

Piedra artificial tipo cuarzo

El uso de fracciones de desecho de esta piedra artificial como sustituto del yeso con variaciones del 0% al 75% y con tamaños de partícula correspondientes a entre 1-4 mm, permite obtener productos de construcción de diferentes colores con prestaciones mejoradas respecto a los materiales de referencia⁴⁷.

⁴³ Eve, S., Gomina, M., Jernot, J.P., Ozouf, J.C., Orange, G. (2007). «Microstructure characterization of polyamide fibre/latex-filled plaster composites». *J Eur Ceram Soc*, 27, 17-25.

⁴⁴ Gutiérrez González, S., Gadea, J., Rodríguez, A., Blanco-Varela, V., Calderón, V. (2012). «Compability between gypsum and polyamide powder waste to produce lightweight plaster with enhanced thermal properties». *Construction and Building Materials* nº34, 179 - 185.

⁴⁵ Gutiérrez-González, S., Gadea, J., Rodríguez, A., Alonso, M.M., Calderón, V. (2012). «Rheological behaviour of gypsum plaster pastes with polyamide powder waste» *Construction and Building Materials* 38, 407 - 412.

⁴⁶ Rodríguez, A., Gutiérrez-González, S., Horgnies, M., Calderón, V. (2013). «Design and properties of plaster mortars manufactured with ladle furnace slag». *Materials and Design* 52, 987-994

⁴⁷ Adán, I., Calderón, V., Gadea, J., Rodríguez, A., Gutiérrez González, S., Alameda, L., Junco, C. Patente: Procedimiento de obtención de morteros de yeso de construcción con fracciones de rechazo de piedra artificial tipo cuarzo triturado. Número de publicación: ES2500051A1



Cáscara de arroz

Los trabajos con este material no aportan mejoras en las propiedades mecánicas de las mezclas, pero suponen una ayuda en cuanto a la eliminación de este tipo de residuos⁴⁸.

⁴⁸ Khalil, A., Tawfik, A., Hegazy, A., El-Shahat, M.. (2014). «Effect of some waste additives on the physical and mechanical properties of gypsum plaster composites». *Construction and Building Materials* 68, 580–586.



3.2. Prefabricados de yeso aligerado

En este apartado se presentan los trabajos sobre prefabricados de yeso con algún tipo de aligerante/residuo incluido en la matriz de yeso.

3.2.1. Aireantes y espumantes

La reducción en el peso del prefabricado facilitando de esta forma su transporte y puesta en obra, así como el indicio de mejora del aislamiento térmico, esta es la base sobre la que se fundamenta la idea de introducir aire o gas en el interior del yeso/escayola, en sustitución de los clásicos sólidos celulares (perlita y vermiculita).

Se han estudiado diversas opciones, utilizando agua carbonatada con adiciones de aireantes en las mezclas o con la incorporación de espumantes⁴⁹. De los resultados de estos trabajos se desprende que con el uso de espumantes en base resina pueden conseguirse resultados similares a los obtenidos con sólidos celulares, como la perlita y la vermiculita. Se ha registrado una patente de un panel de yeso ligero con un agente espumante junto a un látex natural o sintético con el que se han conseguido resultados de resistencia mecánica excelentes⁵⁰.

3.2.2. Arcilla expandida

La bibliografía encontrada para derivados de yeso con arcilla expandida, recoge dentro de los productos más novedosos un ladrillo o bloque prefabricado constituido exteriormente por una capa de escayola o yeso⁵¹, relleno interiormente por una mezcla de yeso y arcilla expandida (25% - 75%). Puede ser macizo o con huecos que permitan el paso de las instalaciones. Es un prefabricado ligero y resistente, con buenas propiedades aislantes (térmico y acústico).

⁴⁹ Del Río Merino, M., Hernández Olivares, F. (2004). «Escayola aligerada: propuestas alternativas a la adición de sólidos celulares». *Materiales de Construcción* Vol.54, nº275. 65-76.

⁵⁰ Jobbins, Richard M. Patente: Composiciones de yeso de bajo peso. (2002). Nº de publicación: ES 2 178 407 T3.

⁵¹ Méndez, Y. Patente: Ladrillo prefabricado para la construcción. (2005). Nº de publicación: ES 2 211 312 B1.



3.2.3. Perlita expandida

Desde finales de los años 70, se han acometido estudios sobre el uso de la perlita expandida en paneles prefabricados de yeso^{52,53,54}, elaborando productos con buenas resistencias frente al fuego, más ligeros y con capacidades aislantes mejoradas. Actualmente ya se comercializa placas con estas características⁵⁵.

3.2.4. Humo de sílice

El humo de sílice es un subproducto industrial que se origina en la reducción de cuarzo con carbón, durante los procesos de obtención de silicio metal y ferrosilicio en hornos eléctricos de arco. El uso de este residuo en pequeñas cantidades reduce la conductividad térmica del material, incrementando la resistencia a compresión y disminuyendo la densidad, siendo prometedores los resultados de resistencia frente al fuego⁵⁶.

3.2.5. Corcho natural

Dentro de los productos más interesantes fabricados con yeso y desechos granulados de corcho natural, se ha elaborado un elemento prefabricado para paneles de gran formato para su uso en la construcción^{57,58}. A nivel microscópico, la interfase de los materiales se realiza de forma mecánica, sin reacción química, pero es de gran solidez y estabilidad. Se obtiene un material de muy baja densidad, lo que supone una mayor facilidad en el transporte y en la puesta en obra.

⁵² Yutaka, W., Masaharu, N. (1976). «Gypsum based nonflammable lightweight plate». Japan Kokai Tokkyo Koho 760 4, 213 (Cl. Co 4B, B 28B)

⁵³ Yashushi, M., Yoshinobu, O., Yoshinobu, F. (1980). «Lightweight gypsum panels». Chem. Abstr (1980), 92. 134173.

⁵⁴ Mushashi Susumu. (1988). «Fire resistant building boards with improved humidification and dehumidification property». Japan.

⁵⁵ Placo Saint-Gobain. (Placo Phonique, Placoflam).

⁵⁶ Baux, C., Mélinge, Y., Lanos, C., Jauberthie, R. (2008). «Enhanced Gypsum Panels for Fire Protection». Journal of Materials in Civil Engineering. Vol. 20, 71-77.

⁵⁷ Del Río Merino, M., Santa Cruz Astorqui, J., Hernández Olivares, F. (2005). «New prefabricated elements of lightened plaster used for partitions and extrados». Construction and Building Materials 19, 487 – 492.

⁵⁸ Del Río Merino, M., Santa Cruz Astorqui, J., Hernández Olivares, F. Patente: Yeso aligerado con corcho y su aplicación en paneles para la construcción. Universidad Politécnica de Madrid. (2002). N° de publicación: ES 2170612 A1



La adición de fibra de vidrio aporta mejoras en la resistencia a flexotracción (hasta de un 50%). Mediante simulación de su comportamiento mecánico se constata que este material responde de forma óptima frente a las distintas deformaciones que un tabique debe resistir. Además, gracias al diseño de los paneles y a la alta absorción de la matriz que lo constituye, se origina una mejora en el aislamiento acústico.

Se fabrican paneles de partición formados por dos placas de escayola aligeradas con corcho, unidas mediante costillas, dejando en su interior una cámara intermedia. Se producen dos tipos de paneles para trasdosados: el primero formado por una placa del compuesto yeso-corcho, y otra de poliestireno expandido unidos al igual que las anteriores. Y un segundo constituido por una placa del compuesto yeso-corcho que lleva adherida una plancha de poliestireno expandido.

3.2.6. Papel reciclado y partículas de madera de pino

Se ha experimentado con adiciones de papel reciclado y partículas de madera de pino aglomeradas con yeso. En este trabajo se evalúan las propiedades que estas adiciones aportan a la resistencia de paneles aglomerados⁵⁹. Se trabaja con muestras de cuatro tipos diferentes: sin residuo alguno (solo yeso), con partículas de madera de pino, con papel de periódico y con papel de imprenta. Se concluye que estas adiciones mejoran las propiedades de las placas si las comparamos con las placas de yeso puro. En concreto se comprueba que la inclusión de partículas de madera reduce la densidad y aumenta la carga de rotura a flexión, mientras que el papel de periódico mejora sensiblemente la carga de rotura a flexión. Con el papel de imprenta no se producen mejoras significativas.

También existen investigaciones con pasta de papel (puede ser reciclado)⁶⁰, con virutas de madera reforzadas con poliisocianatos⁶¹, tableros con yeso y fibra de madera impregnado con silicona⁶² o con

⁵⁹ Haselein, C., Calegarí, L., Alberti, L., Minello, A., Anaximandro da Silva, P., Figueredo, R. (2002). «Manufacturing gypsum-bonded-particleboard with recycled paper and pine wood particles». *Ciencia Forestal* Vol.12, nº1, 81-88.

⁶⁰ Villaplana Sánchez, J. Patente. Procedimiento de fabricación de placas para la construcción. (2005). Nº de publicación. ES 2242535A1.

⁶¹ Kossatz, G., Sattler, H., Kammerer, R., Sachs, H., Schäpel, D. Patente: Placas de yeso reforzadas. (1992). Nº de publicación: ES 2 028 002 T3.

⁶² Englert, M. Patente: Proceso para la fabricación de productos de yeso y fibra de madera que tienen resistencia al agua mejorada. (2005). Nº de publicación: ES 2 224 289 T3.



emulsión de cera⁶³ que, entre otras cosas, incrementa su resistencia frente a la absorción agua.

3.2.7. Residuos de vidrio

A partir restos de vidrio de seguridad procedentes de los procesos del mecanizado de vidrio, se ha trabajado en la fabricación de bloques de yeso con contenidos residuos de vidrio en polvo de 0,5, 10 , 15 a 20% en peso. Los resultados del proceso experimental mostraron que la adición de este tipo de residuo podría mejorar la resistencia y la insolubilidad en agua de los bloques⁶⁴.

3.2.8. Sarmiento de viña

Este trabajo plantea el uso de residuos de sarmiento de viña como parte de la matriz de tableros de partículas de yeso. Los resultados obtenidos muestran que a partir de la selección de proporciones adecuadas de residuo, pueden obtenerse tableros con buenas propiedades físico-mecánicas⁶⁵.

3.2.9. Material de cambio de fase (PCM)

El empleo de PCM se fundamenta en su capacidad de almacenamiento de energía térmica, ya que son materiales que acumulan o ceden energía cuando cambian de fase, de estado de hidratación o de ordenación molecular. Este es el concepto sobre el que se basan las investigaciones en esta área⁶⁶. Se trata de aumentar la inercia térmica del material consiguiendo un acondicionamiento pasivo del espacio y reduciendo el gasto de calefacción y refrigeración.

⁶³ Song, W. Patente: Producto de fibra de madera y yeso que tiene una resistencia al agua mejorada. (2003). N° de publicación: ES 2 191 209 T3.

⁶⁴ Tounchuen, K., Buggakupta, W., Panpa, W..(2014). «Characteristics of Automotive Glass Waste-Containing Gypsum Bodies Made from Used Plaster Mould». Key Engineering Materials, Vol. 608, pp 91-96.

⁶⁵ Rangavar, h., Khosro, KH., Payan, m., Soltani, A.. (2014)«Study on the possibility of using vine stalk waste (vitis vinifera) for producing gypsum particleboards». Mechanics of Composite Materials, Vol. 50, No. 4.

⁶⁶ Favoino, F., Perino, M., Serra, V. (2012). «Improving thermal performance of plasters by means of recycled and phase change materials». 10th International Conference on Healthy Buildings. Brisbane, Australia.



La incorporación de PCM en placas de yeso laminado ha sido ampliamente estudiado, destacando una serie de investigaciones^{67,68}, donde se fabrica un panel de escayola con una incorporación de un 45% en peso de PCM, superando trabajos anteriores donde la tasa de incorporación es mucho menor (rondando el 20-25%), manteniendo las propiedades mecánicas y físicas exigidas en la normativa (gracias al uso de fibras de polipropileno y dispersión de melanina-formaldehído), y consiguiendo un aumento de la capacidad de almacenamiento térmico del panel de yeso de más del doble respecto a investigaciones anteriores.

3.2.10. Poliestireno expandido (EPS)

En el uso de residuos de EPS (poliestireno expandido) se ha trabajado con la utilización del producto triturado, agregándolo a la matriz de una placa de yeso laminado^{69,70}. El residuo proviene de la molienda de envases y embalajes que derivan del flujo de residuos municipales. Se consiguen materiales de gran ligereza, al añadir residuos molidos en las mezclas aumentando la relación A/Y, lo que supone una disminución de las resistencias mecánicas. El buen comportamiento de estas mezclas frente al fuego confirma su aptitud.

En un intento de ampliar las características mecánicas de este tipo de mezclas, se ha estado trabajando con la posibilidad de reforzar el compuesto yeso-perlas de poliestireno expandido con fibras cortadas de polipropileno^{71,72,73}, consiguiendo reducir la densidad a la mitad,

⁶⁷ Oliver Ramírez, A., Neila González, F.J., García Santos, A. (2010). «Caracterización térmica de placas de yeso con material de cambio de fase incorporado». *Materiales de Construcción* Vol.62, nº 519, 55 - 66.

⁶⁸ Neila González, J., Oliver Ramírez, A., García Santos, A. Patente: Elemento constructivo con matriz yeso o escayola. Universidad Politécnica de Madrid. (2011). Nº de publicación: ES 2 346 282 A1.

⁶⁹ González Madariaga, F.J. (2005). Tesis Doctoral: Caracterización de mezclas de residuos de Poliestireno expandido (EPS) conglomerados con yeso o escayola, su uso en la construcción. Universidad Politécnica de Cataluña

⁷⁰ Lloveras Macià J, González Madariaga F.J. Patente: Mezclas de yeso o escayola aligeradas con gránulos de plástico expandido. (2008). Nº de publicación: ES 2 277 776 B1.

⁷¹ García Santos, A. (2004). «Caracterización de compuestos de escayola reforzados, en relación con el tipo de refuerzo y la relación A/Y». *Informes de la Construcción* Vol.56 nº 493, 19 - 32.

⁷² García Santos, A. (2009). «Escayola reforzada con fibras de polipropileno y aligerada con perlas de poliestireno expandido». *Materiales de Construcción* Vol.59, nº 293, 105 – 124

⁷³ García Santos, A. Patente: Material de construcción de yeso o escayola aligerado y su uso en placas y paneles. Universidad Politécnica de Madrid. (2009). Nº de publicación: ES 2 292 309 B2.



manteniendo la resistencia a flexotracción, porosidad, dureza y tiempos de fraguado.

3.2.11. Polietilvinilacetato (EVA)

En la bibliografía existente se encuentran varias referencias sobre investigadores que han incorporado residuos de copolímero EVA al yeso para elaborar placas con capacidad aislante térmica^{74,75} con sustituciones de yeso por el polímero etileno-acetato de vinilo, producido en grandes cantidades como residuo en la industria del calzado. La aplicación de estos materiales en forma de placas, colocándolo con una cámara de aire sobre una pared convencional, supone en torno a un 40% de reducción en la transmisión de calor cuando se utiliza este composite yeso – EVA. Esto da una idea del aislamiento que estos materiales reciclados proporcionan.

3.2.12. Espuma de Poliuretano

Los estudios que incluyen este subproducto para la obtención de yeso ligero datan del año 1985, cuando se patenta una pieza de construcción (bloque, panel) constituida a base de mortero de yeso/escayola que incluye trozos o porciones de espuma rígida de poliuretano⁷⁶, con una distribución lo más homogénea posible en la masa de la pieza.

3.2.13. Polvo de cuero

Estos desechos sólidos industriales se utilizan como material de separación para paneles de cemento/arena y placas de yeso. Las mediciones de conductividad térmica muestran claramente que estos residuos aportan mejoras significativas en el aislamiento térmico del material ensayado⁷⁷.

⁷⁴ Melo, M.O.B.C, Da Silva, L.B., Coutinho A.S., Sousa, V., Perazzo, N. (2012) «Energy efficiency in building installations using thermal insulating materials in northeast Brazil». *Energy Buildings* 47, 35-43.

⁷⁵ de Oliveiral, M., Barbosal, N., Torres, S., Leal, A., Silva, C. (2012). «Gypsum-based composites with EVA waste and vermiculite». *Revista Brasileira de Ingeniería Agrícola y ambiental* Vol.16, nº6,

⁷⁶ Alberti Barbera, R. Patente: Pieza para la construcción. (1985). Nº de publicación: ES 284858.

⁷⁷ Lakrafi, H., Tahiri, S., Albizane, A., Bouhria, M., El Otmami, M.E. (2013). «Experimental study of thermal conductivity of leather and carpentry wastes». *Construction and Building Materials* 48, 566–574



3.2.14. Polvo de caucho triturado

Los trabajos sobre el empleo de caucho reciclado de neumáticos fuera de uso en placas de escayola^{78,79}, con incrementos en el porcentaje en peso del caucho de hasta un 50%, aportan altas reducciones en la densidad y mejoras en el aislamiento térmico, optimizando también el aislamiento a impacto, pero no así al ruido aéreo viéndose reducidas las resistencias a flexión y compresión. El tamaño de partícula y la proporción del caucho son los factores más influyentes en estas propiedades⁸⁰.

Otros estudios emplean como adición residuos de espuma de caucho utilizada como aislante en tuberías⁸¹.

Tras un profundo estudio de las publicaciones científicas y documentación relacionada, no se han encontrado referencias previas del empleo de residuos de espuma de poliuretano triturado (PU) ni residuos de poliamida en polvo (PA), en combinación con yeso-escayola en la fabricación de prefabricados de yeso.

⁷⁸ Mayor, P., Bustamante, R., Rangel, C., Hernández Olivares, F. (2008). «Propiedades térmicas, acústicas y mecánicas de placas de morteros yeso-caucho». II Jornadas de Investigación en Construcción. Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, CSIC.

⁷⁹ Serna, A., Del Río, M., Palomo, J.P., González, M. (2012). «Improvement of gypsum plaster strain capacity by the addition of rubber particles from recycled tyres». *Construction and Building Materials*, nº35, 633-641.

⁸⁰ Herrero, S., Mayor, P., Hernández-Olivares, F. (2013) «Influence of proportion and particle size gradation of rubber from end-of-life tires on mechanical, thermal and acoustic properties of plaster-rubber mortars». *Materials and Design* 47, 633-642.

⁸¹ Jiménez, A., de Guzmán, A., García, J. (2014). «New composite gypsum plaster-ground waste rubber coming from foam insulation». *Construction & Building Materials*, nº55, 146-152

Capítulo 4.

Procedimiento experimental



Dentro de este capítulo se detallan los distintos equipos utilizados en la caracterización de las materias primas (yeso, agua, residuos y fibras), así como las técnicas instrumentales necesarias para determinar las propiedades de las mezclas y las placas de yeso laminado.

4.1. Materias Primas

Esta sección detalla, la tecnología y los procedimientos a los que se ha recurrido, para caracterizar las materias primas utilizadas en este trabajo.

4.1.1. Análisis elemental (CHNS)

El análisis elemental se emplea para la determinación rápida de la presencia de carbono(C), hidrógeno(H), nitrógeno(N) y azufre(S) en todo tipo de muestras orgánicas e inorgánicas, sólidas o líquidas, volátiles y no volátiles para obtener el contenido de óxidos medido en porcentaje respecto al peso. El equipo utilizado es un Analizador LECO CHNS-932 y VTF-900 (Imagen 4.1.) dotado de un introductor de muestras automático con capacidad para 50 muestras.



Imagen 4.1. Analizador elemental LECO

La técnica de análisis está totalmente automatizada, y se basa en la combustión de las muestras en condiciones óptimas ($T=950-1.100^{\circ}\text{C}$ en atmósfera de oxígeno puro) para convertir los elementos antes mencionados en gases simples (CO_2 , N_2 , H_2O y SO_2) para conseguir una determinación cuantitativa del contenido de C, H, N y S.

4.1.2. Difracción de Rayos X (DRX-M)

Se realiza la difracción de rayos X de muestras en polvo. El equipo empleado fue un Difractómetro de Rayos X marca Bruker D8 Advance



(Diseño Davinci) (Imagen 4.2.). En este trabajo se utilizó para determinar la composición mineralógica del yeso.

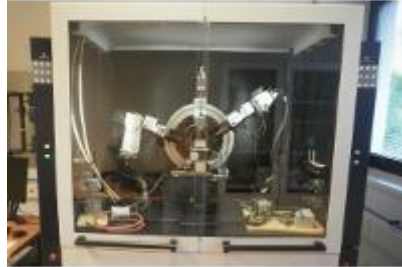


Imagen 4.2. Difractómetro de Rayos X

4.1.3. Granulometría por difracción de rayos láser

La granulometría por difracción de rayos láser es un procedimiento para establecer los distintos tamaños de partícula de los materiales. El principio de la técnica consiste en hacer atravesar un rayo láser a través de una muestra de material pulverizada que se encuentra en suspensión en alcohol isopropílico. El equipo empleado es un analizador modelo HELOS 12K de la marca SYMPATEC (Imagen 4.3.).

En este trabajo se ha utilizado para determinar la distribución granulométrica de los residuos (poliuretano/poliamida) y del yeso.



Imagen 4.3. Analizador HELOS 2K

4.1.4. Microscopía electrónica de barrido (SEM)

El microscopio electrónico de barrido o SEM (Scanning Electron Microscope), es aquel que utiliza un haz de electrones para formar imágenes de alta resolución, siendo capaz de enfocar a la vez una gran parte de la muestra. El equipo utilizado es un microscopio electrónico



de barrido JEOL JSM-6460LV con sistema INCA de análisis elemental por rayos X (Imagen 4.4.).



Imagen 4.4. Microscopio electrónico de barrido (SEM)

Este equipo permite obtener fotografías de hasta 300.000 aumentos, incluso en muestras pocas o nada conductoras (Imagen 4.5.).



Imagen 4.5. Detalle de diferentes muestras

Se emplea para poder observar la estructura microscópica de los residuos, las fibras y las mezclas.

4.1.5. Análisis termogravimétrico (TGA)

Esta técnica mide el cambio en la masa de una muestra, mientras se va calentando a una velocidad constante. En nuestro caso se emplea para determinar la temperatura de degradación de los residuos y del yeso. El equipo empleado es un analizador TGA-DSC-DTA modelo TA Instruments con doble brazo (Imagen 4.6.).

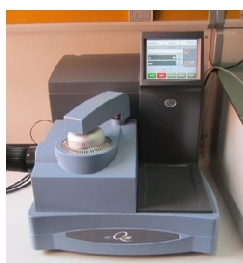


Imagen 4.6. TGA



4.1.6. Densidad real

Para calcular la densidad real de los yesos y los residuos, aplicamos los principios de ensayos para piedra natural, según la Norma UNE-EN 1936:2007⁸², utilizando el método del picnómetro (Imagen 4.7.). Es necesario triturar una muestra de materia prima hasta conseguir una finura de partícula capaz de traspasar un tamiz de 0,063 mm. Se introduce una muestra de 10 g de material en alcohol isopropílico en el picnómetro y posteriormente se pesa.

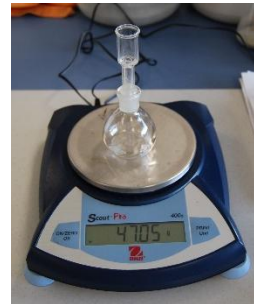


Imagen 4.7. Método del picnómetro

El picnómetro se limpia, se llena de nuevo con alcohol isopropílico y se vuelve a pesar. La densidad real (en Kg/m³) se calcula por medio de la relación entre la masa de la probeta seca y triturada, y el volumen de líquido desplazado por la masa, con la ecuación:

$$\frac{m_e}{m_2 + m_e - m_1} \times d_{ai} \quad \text{donde}$$

m_e : Masa de la probeta triturada y secada (g)

m₁ : Masa del picnómetro lleno de alcohol isopropílico y con la probeta triturada (g)

m₂ : Masa del picnómetro lleno de alcohol isopropílico (g)

d_{ai} : Densidad del alcohol isopropílico (en Kg/m³)

⁸² UNE-EN 1936:2007. Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la densidad real y aparente y de la porosidad abierta y total.



4.1.7. Densidad aparente

Con el fin de determinar la densidad aparente de los diferentes residuos empleados es este trabajo, se ha calculado su relación Peso/Volumen.

El procedimiento consiste en rellenar un recipiente con un volumen conocido y pesarlo, aplicando entonces la ecuación peso/volumen. En este caso se ha utilizado como recipiente de referencia un vaso de precipitado tarado de 50 ml, que ha sido rellenado con residuo sin compactar hasta la marca de 50 ml, pesándolo a continuación (peso de la muestra).

4.1.8. Digestión de muestras

Esta técnica permite eliminar toda la materia orgánica de la muestra mediante la utilización de medios ácidos y altas temperaturas. El equipo utilizado consta de un sistema de digestión extracción: ETHOS SEL de Milestone, equipado con el sistema QP de digestión (Imagen 4.8.).

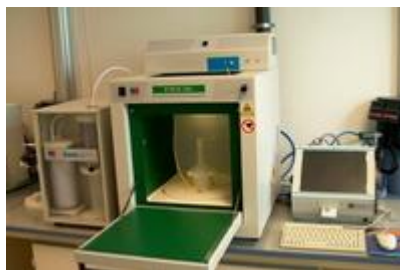


Imagen 4.8. Equipo de digestión de muestras

En nuestro caso se realiza una digestión de muestras en vaso cerrado con ácido nítrico (HNO_3) al 65%, con rampas de temperatura que varían entre la T° ambiente y los 180°C , con el fin de constatar la presencia de fibras en las muestras de residuo.



4.2. Mezclas

En este apartado se describen las técnicas instrumentales y ensayos utilizados para caracterizar las mezclas yeso-residuo.

4.2.1. Relación agua/yeso. Método de la mesa de sacudidas

Este método se utiliza para los yesos premezclados, según metodología descrita en la norma UNE-EN 13279-2:2006⁸³. Se trata de hallar la relación agua/(yeso+residuo) mediante el método ensayo-error. El yeso se mezcla en seco con el residuo y se añade al agua, removiendo manualmente aproximadamente 1 minuto, mezclando a continuación en la amasadora mecánica (marca PROETI) otro minuto a baja velocidad (140 ± 5) min^{-1} en rotación y (62 ± 5) min^{-1} en movimiento planetario (Imagen 4.9.).



Imagen 4.9. Amasadora

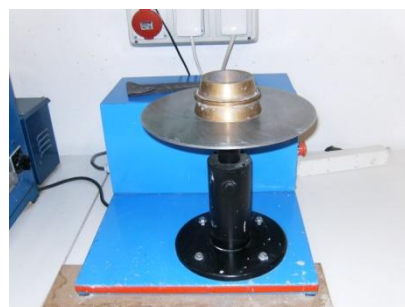


Imagen 4.10. Mesa de sacudidas

La pasta amasada ha de colocarse en el interior de un molde cónico en el centro de la mesa de sacudidas, tras esto se retira el molde y se le aplican 15 golpes verticales a una velocidad de 1 rev/min, mediante la mesa de sacudidas (Imagen 4.10.). Debe realizarse este ensayo hasta la formación de una galleta de un diámetro medio de (165 ± 5) mm, medido en dos direcciones perpendiculares.

4.2.2. Principio de fraguado. Método del cono de Vicat

La determinación de los tiempos de principio de fraguado se realiza conforme a Norma UNE-EN 13279-2:2006. Con la pasta obtenida al mezclar el agua, con el yeso y el residuo, se rellena un molde cónico de

⁸³ UNE-EN 13279-2: 2006. Yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción. Parte 2: Métodos de ensayo.



caucho colocado sobre una placa de vidrio. El conjunto se sitúa bajo el dispositivo de Vicat marca IBERTEST (Imagen 4.11.), que dispone de una barra guía rematada por una aguja, controlada por un mecanismo de disparo, el cual se acciona en intervalos sucesivos, hasta que se obtiene una profundidad de penetración de (22 ± 2) mm de la aguja sobre el cono.



Imagen 4.11. Dispositivo de Vicat

El tiempo transcurrido desde el momento en que el conjunto (yeso+residuo) se vierte sobre el agua para formar la pasta, hasta el momento en que se obtiene la profundidad deseada, es lo que denominamos principio de fraguado.

4.2.3. Densidad aparente

La densidad aparente del material se determina a partir de una serie de probetas prismáticas de $(160 \times 40 \times 40)$ mm³, hallando la relación Peso/Volumen de las mismas, primero en estado húmedo (al desmoldar), y en estado seco (a los 7 y 28 días) una vez secadas las probetas en estufa a $40\pm 2^\circ\text{C}$. Todo ello según norma UNE-EN 1936:2007.

4.2.4. Capacidad de retención de agua

La capacidad de retención de agua del material se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$\frac{(d_{ah} - d_{as})}{d_{as}} \times 100 \quad \text{donde}$$

d_{ah} : Densidad aparente húmeda al desmoldar la probeta

d_{as} : Densidad aparente seca a los 7 días una vez secada la probeta en estufa a $40\pm 2^\circ\text{C}$.



4.2.5. Dureza Shore C sobre probeta

Se trata de determinar la huella dejada por una barra que termina en una aguja y que mediante un engranaje nos permite aplicar una fuerza sobre las caras de las probetas de forma vertical (Imagen 4.12.). Toda esta técnica se describe en la Norma UNE 102042:2013⁸⁴.

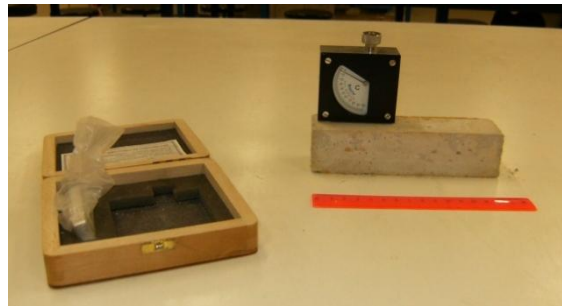


Imagen 4.12. Durómetro Shore C

El ensayo se realiza sobre las caras longitudinales de una probeta prismática de $(160 \times 40 \times 40)$ mm³, hallándose la media de las medidas obtenidas (5 por cada cara), descartando los valores que se desvíen de la media. La dureza se indica en unidades Shore C, en una escala que va del 0 al 100 (considerando el cero como el material más blando y el cien como el de mayor dureza).

4.2.6. Resistencia a flexión y compresión

Para establecer la resistencia a flexión (Imagen 4.13.), hay que determinar la carga máxima (en Newton) necesaria, para romper una probeta prismática de $(160 \times 40 \times 40)$ mm³, apoyada sobre rodillos mediante la aplicación de una carga centrada a una velocidad constante de (20 ± 1) N/s.

La resistencia a compresión (Imagen 4.14.) se obtiene al aplicar una carga a las mitades resultantes de las probetas del ensayo anterior, sobre una sección de (40×40) mm² mediante la aplicación de una carga uniforme sobre la sección a una velocidad de (100 ± 10) N/s, hasta conseguir la rotura de la probeta.

⁸⁴ UNE-EN 102042:2013. Yesos y escayolas para la construcción. Otros métodos de análisis.



Imagen 4.13. Dispositivo de flexión

Imagen 4.14. Dispositivo de compresión

Para ambos estudios se ha utilizado un dispositivo de carga modelo SUZPECAR-Sistema de ensayos modelo MEM 101/SDC, conectado a un equipo de control digital, todo ello según método descrito en la norma UNE-EN 13279-2:2006.

4.2.7. Absorción por capilaridad

Partiendo de un juego de probetas de $(160 \times 40 \times 40)$ mm³ desecadas previamente, se establece el nivel al que es capaz de ascender el agua, si colocamos verticalmente las probetas sobre un baño de agua de 10 mm de espesor, durante un tiempo limitado (10 min) (Imagen 4.15.). El análisis se realiza según lo descrito en la norma RILEM TC 25-PEM:1980⁸⁵.

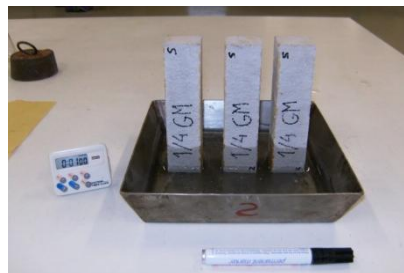


Imagen 4.15. Ensayo de absorción por capilaridad

⁸⁵ RILEM TC 25-PEM:1980. Recommended test to measure the deterioration of stone and to assess the effectiveness of treatment methods. Protection and Erosion of Monuments.



4.2.8. Adherencia

La adherencia se determina conforme a Norma UNE-EN 13279-2:2006. La pasta objeto del ensayo se aplica sobre un soporte seleccionado para tal fin (base cerámica). Una vez fraguada la pasta, se pegan una serie de discos de metal de 50 mm de diámetro (Imagen 4.16.), que deben ser arrancados de forma perpendicular a la superficie mediante el dispositivo de medida (Imagen 4.17.).



Imagen 4.16. Ensayo de adherencia



Imagen 4.17. Equipo para la determinación de la adherencia

Este aparato aplica una carga constante a tracción (a una velocidad constante comprendida entre 0,003 N/mm² y 0,1 N/mm² por segundo) y recoge la lectura de la carga máxima aplicada mediante un manómetro.

4.2.9. Permeabilidad al vapor de agua

Este método de ensayo, basado en la Norma UNE-EN 1015-19/A1:1999⁸⁶ nos permite determinar la permeabilidad al vapor de agua de las mezclas, aun siendo propio de morteros para revoco y enlucido, lo consideramos válido para medir la permeabilidad en las mezclas que nos ocupan, ya que el comportamiento de este tipo de materiales puede extrapolarse a los productos más tradicionales.

Para realizar el ensayo se fabrican tres probetas cilíndricas de 16 cm de diámetro y 1,5 cm de altura, sobre un soporte de hormigón. Una vez desecadas las probetas se colocan en los moldes de ensayo (Imagen 4.18.), en los que previamente se vierte una disolución saturada de nitrato de potasio (KNO₃), dejando una cámara de aire entre la

⁸⁶ UNE-EN 1015-19:1999/A1. Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 19: Determinación de la permeabilidad al vapor de agua de los morteros endurecidos de revoco y enlucido.



disolución y la superficie inferior de la probeta de 10 mm. La estanqueidad entre la probeta y el molde se consigue mediante el sellado de la junta con mástico.

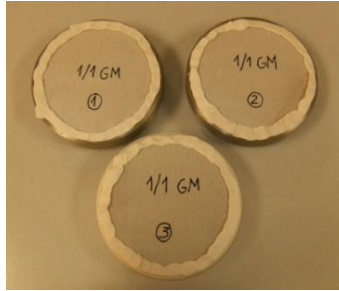


Imagen 4.18. Probetas permeabilidad



Imagen 4.19. Ensayo permeabilidad

Las probetas deben conservarse en un espacio con una temperatura de $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ y humedad relativa del $50\pm 5\%$. Se realizan pesadas de los recipientes a intervalos de tiempo suficientes, hasta conseguir una reducción de peso lineal (mínimo 10 días), lo que supone que las condiciones son estables (Imagen 4.19.). Se anota la pérdida de masa y se representa en función del tiempo.

A partir de los datos obtenidos se calcula la permeanza en $\text{Kg}/\text{m}^3 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}$, que es el flujo de vapor de agua que atraviesa la probeta. Si se multiplica el valor de la permeanza por el espesor de la probeta se obtiene la permeabilidad al vapor de agua del material. El valor final de cada serie se obtiene como el valor medio de todas ellas.

4.2.10. Microscopía electrónica de barrido (SEM)

Se utiliza la misma técnica instrumental descrita en el Apartado 4.1.4., en este caso para poder observar la estructura microscópica de las distintas mezclas, así como la interfase de la matriz de yeso con el residuo.

4.2.11. Conductividad térmica

Esta técnica instrumental permite establecer la resistencia térmica de las muestras estudiadas, a partir método de la placa caliente guardada y el método del medidor del flujo de calor.

El equipo utilizado para realizar las mediciones es un Láser Comp FOX 304 de medición de flujo de calor (Imagen 4.20.).



Imagen 4.20. Equipo Láser Comp FOX 304

Es necesario fabricar una serie de probetas con forma de paralelepípedos, de dimensiones $(300 \times 300 \times 30)$ mm³, desecadas en estufa a $40 \pm 2^\circ\text{C}$ hasta alcanzar una masa constante.

Método de ensayo según Norma UNE-EN 12667:2002⁸⁷.

4.2.12. Ensayo de reacción al fuego de productos. Ensayo de no combustibilidad.

Este ensayo se realiza conforme a la Norma ISO 1182:2010⁸⁸ y permite determinar, en unas condiciones concretas, el comportamiento respecto a la no combustibilidad de las mezclas de yeso-residuo objeto de este trabajo.

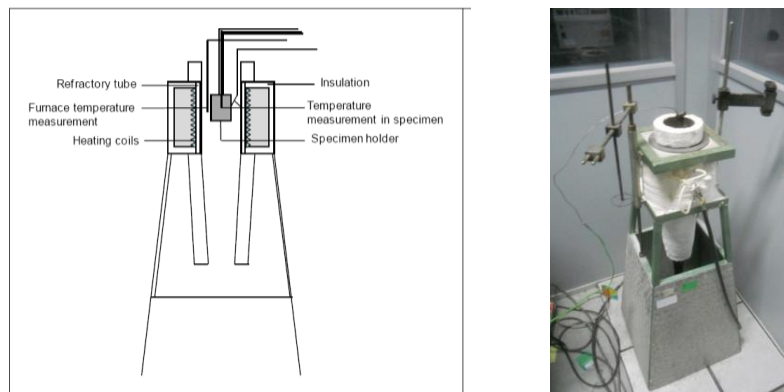


Imagen 4.21. Equipo de ensayo de no combustibilidad

⁸⁷ UNE-EN 12667: 2002. Determinación de la resistencia térmica por el método de la placa caliente guardada y el método del medidor de flujo de calor. productos de alta y media resistencia térmica.

⁸⁸ UNE-EN ISO 1182:2011. Ensayos de reacción al fuego de productos. Ensayo de combustibilidad.



Para la realización del análisis se emplea un horno con tubo refractario rodeado de una resistencia, encajado dentro de un receptáculo aislante y provisto de un porta probetas en el interior (Imagen 4.21.). Dentro del horno se encuentran los termopares para medir la temperatura del horno, de las paredes interiores del horno, así como la temperatura superficial de la muestra y la de su centro.

Las probetas utilizadas son de forma cilíndrica, con un volumen de (76 ± 8) cm³, un diámetro de (45 ± 2) mm y una altura de (50 ± 3) mm.

Las temperaturas alcanzadas se registran a intervalos inferiores o iguales a 1 segundo durante 30/60 minutos. Este ensayo permite obtener los parámetros de la pérdida de masa, la duración de las llamas persistentes y el incremento de temperatura.



4.3. Placas de yeso laminado

A continuación se describen los ensayos normalizados de acuerdo a la Norma UNE-EN 520:2005+A1, para la caracterización de placas de yeso laminado.

4.3.1. Densidad

La densidad de las placas de yeso con residuo se calcula mediante la determinación de la masa media y las dimensiones de la probeta.

Previamente, las probetas son acondicionadas en estufa hasta masa constante a (40 ± 2) °C, pesando cada probeta con una precisión de 0,1g y tomando sus dimensiones en la anchura midiendo en tres puntos situados a lo largo de la longitud de la placa y la longitud en tres puntos situados a lo largo de la anchura de la placa. El espesor de la placa debe medirse en 6 puntos situados cerca de uno de los bordes transversales.

4.3.2. Resistencia a flexión (expresada como carga de rotura a flexión)

La resistencia a flexión de las placas de yeso laminado con residuos se determina mediante la obtención de su carga de rotura a flexión. Para ello se utiliza un dispositivo de carga marca SUZPECAR, modelo MEM-101/SDC (Imagen 4.22.), conectado a un equipo de medida digital, que posee una precisión del 2%.



Imagen 4.22. Dispositivo de carga y ordenador que lo controla.

La probeta desecada hasta masa constante a (40 ± 2) °C (se realiza el ensayo antes de que transcurran 10 minutos después de haber sacado las probetas de la estufa), se coloca sobre dos apoyos cilíndricos paralelos, con una separación entre ejes de (350 ± 1) mm.



Aplicando la carga de forma controlada a una velocidad de (250 ± 125) N/min en el centro del vano, de forma paralela a los apoyos, por medio de un rodillo cilíndrico.

4.3.3. Capacidad de absorción total de agua

Se trata de determinar el porcentaje de aumento de masa de las probetas sumergidas en agua. Las probetas una vez acondicionadas hasta masa constante, se pesan (m_1) y se sumergen en un baño de agua a (23 ± 2) °C, cubriéndolas con 25-35 mm de agua durante $2h \pm 2$ min. La probeta debe colocarse en posición horizontal sin que apoye en el fondo del recipiente (Imagen 4.23.).



Imagen 4.23. Ensayo de absorción total

Después de extraer la probeta del baño, se elimina el exceso de agua de la superficie y de los bordes de la probeta, pesándose inmediatamente (m_2). La diferencia de peso ($m_1 - m_2$) es el incremento de masa de la probeta, este dato nos permite obtener el aumento porcentual de masa de la probeta o su capacidad de absorción total de agua.

4.3.4. Dureza superficial

La dureza superficial de las placas de yeso con residuo, se obtiene, mediante la obtención de la huella superficial causada por el impacto de una pequeña bola de acero de 50 mm de diámetro y (510 ± 10) g de masa, dejada caer desde una distancia vertical de (500 ± 5) mm.

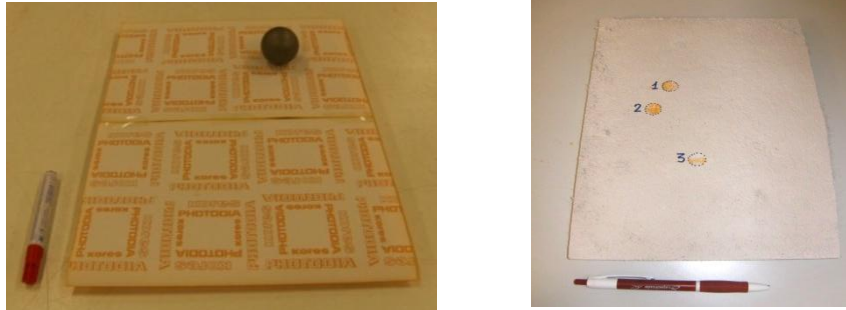


Imagen 4.24. Ensayo dureza superficial

Para poder facilitar la medición de la huella se coloca un papel carbón sobre la placa, midiéndose el diámetro coloreado de la huella sobre la placa con precisión de 1 mm. El ensayo se repite tres veces sobre la misma probeta (Imagen 4.24.). La huella superficial causada por el impacto de la bola de acero, para cada una de las muestras, se calcula como la media de los tres valores medidos con una precisión de 1 mm. La dureza superficial de la placa es caracterizada por este valor medio.

Capítulo 5.

Caracterización de materias primas



En este capítulo se presentan los resultados de la caracterización de las distintas materias primas empleadas en el estudio, con el fin de conocer sus propiedades (físicas, químicas, microscópicas y mineralógicas).

Las materias primas necesarias para fabricar las placas de yeso laminado son: yeso, agua, residuos de naturaleza polimérica y fibras de refuerzo.

Algunos de los residuos utilizados se presentan en planchas o pellets, por lo cual es necesario transformarlos para poder ser integrados en la matriz de yeso, se procesa el residuo mediante un triturado y posterior tamizado.

5.1. Yeso

El yeso utilizado (Imagen 5.1.) es suministrado por la empresa Yesos Albi S.A., siendo su lugar de fabricación el término municipal de Villalómez en Burgos.

Se clasifica como B1/20/2, según la norma UNE-EN 13279-1:2009, designado como yeso de construcción, cuyas especificaciones exigen un contenido en conglomerante de yeso ≥ 50 %, un tiempo de inicio de fraguado superior a 20 minutos al tratarse de un yeso de aplicación manual, con una resistencia a flexión ≥ 1 N/mm² y a compresión ≥ 2 N/mm². Cuenta con el marcado CE.



Imagen 5.1. Yeso utilizado en la experimentación

Se trata de un yeso grueso de fraguado lento o controlado (YG/L) remitiéndonos a la denominación anterior (Pliego de condiciones RY-85). En los datos proporcionados por el productor del yeso, se registra un índice de pureza del 87,66 %.



Se ha realizado una caracterización física del yeso mediante la determinación de la densidad real y la granulometría con el equipo de difracción por rayos láser. A su vez, el yeso se ha caracterizado mineralógicamente a través de difracción de rayos X (DRX).

5.1.1. Densidad real

La densidad real del yeso se obtuvo a partir del procedimiento experimental expuesto en el Apartado 4.1.6.: Método del picnómetro, obteniéndose un valor de 2,32 g/cm³.

5.1.2. Granulometría por difracción de rayos láser

La Granulometría de difracción por rayos láser (método expuesto en el Apartado 4.1.3.) no admite tamaños superiores a 1750 μm , por lo que para poder completar la curva granulométrica, ha sido necesario un cribado mecánico con tamices normalizados del material (Figura 5.1.).

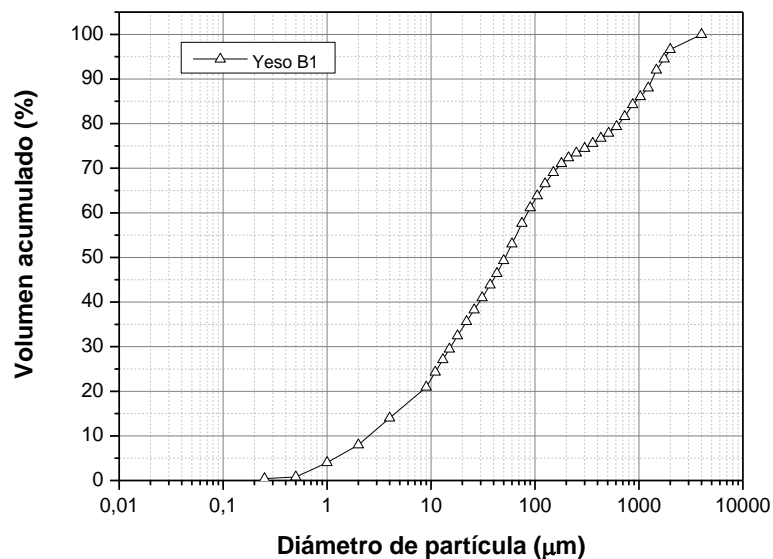


Figura 5.1. Porcentaje acumulado del yeso B1

El análisis de los resultados indica que el 10% del material tiene un tamaño inferior a 2,6 μm , el 50% es menor de 50,1 μm y el 90% del yeso no sobrepasa un diámetro de 1321 μm (Tabla 5.1.).



% de la muestra	tamaño inferior (μm)
10	2,6
50	50,1
90	1321,0

Tabla 5.1. Tamaño de partícula en el 10%, 50% y 90% del yeso B1

5.1.3. Difracción de Rayos X (DRX-M)

La técnica instrumental utilizada en la difracción de rayos X se describe en el Apartado 4.1.2..

A la vista de los resultados obtenidos en la Tabla 5.2., se puede observar que el componente mayoritario del yeso es el sulfato cálcico hemihidratado, seguido de la anhidrita en concentración media, siendo el resto de los componentes (cuarzo, dolomita y moscovita) minoritarios.

Componente	Fórmula	Concentración
Hemihidrato	$\text{CaSO}_4 \times 0.5\text{H}_2\text{O}$	A
Anhidrita	CaSO_4	B-M
Cuarzo	SiO_2	B
Dolomita	$\text{MgCa}(\text{CO}_3)_2$	B
Moscovita	$\text{KAl}_2\text{Si}_3\text{AlO}_{10}(\text{OH})_2$	B

Concentración estimada; A=alto, M=medio, B=bajo

Tabla 5.2. Composición mineralógica del yeso



5.2. Agua

El agua utilizada en los ensayos y en la elaboración de probetas es agua común limpia, que proviene de la red pública suministrada por la empresa Aguas de Burgos S.A. a la ciudad de Burgos. Se facilita por parte de la empresa un análisis químico de la misma⁸⁹ (Tabla 5.3.).

Debido a la climatología extrema de la zona (inviernos con temperaturas muy bajas) es preciso almacenar el agua en una serie de pequeños depósitos en el interior de los talleres para que esta alcance una temperatura constante de $(23\pm 2)^{\circ}\text{C}$, necesaria para la realización de los ensayos.

PARÁMETROS R.D. 140/2003	Unidades	Resultados
Físico-químicos		
Olor	Índice de dilución	0,0
Sabor	Índice de dilución	0,0
Color	mg/IPt/Co	<1,0
pH	Unidades pH	8,04
Turbidez	UNF	0,2
Conductividad	$\mu\text{S}/\text{cm}$	112,2
Nitratos	mg/l	<5,0
Nitritos	mg/l	<0,05
Amonio	mg/l	<0,10
Cloro libre residual	mg/l	0,50
Fluoruro	mg/l	<0,10
Sodio	mg/l	2,1
Cloruro	mg/l	<10
Sulfato	mg/l	<10
Calcio	mg/l	18,2
Dureza total	$^{\circ}\text{F}$	5,0
Bicarbonato	mg/l	56,1
Hierro	mg/l	<0,05
Aluminio	mg/l	0,04
Cobre	mg/l	<0,005
Suma de trihalometanos	mg/l	<0,025
Índice de Langelier	-	-0,4

Tabla 5.3. Características físico-químicas del agua utilizada
(Análisis facilitado por Aguas de Burgos S.A. Burgos, 2013)

⁸⁹ www.aguasdeburgos.com. Análisis agua tratada 2013.



5.3. Residuos

Los residuos utilizados para las distintas mezclas se enmarcan dentro del grupo de polímeros termoestables. Los identificaremos como:

- **W:** Residuo de espuma rígida o en polvo de poliuretano blanco.
- **G:** Residuo de espuma semirrígida de poliuretano gris.
- **PA:** Residuo de poliamida en polvo.
- **GM:** Residuo mixto de poliuretano gris.

Han sido caracterizados de forma:

- Física:
 - Determinación de la densidad real.
 - Determinación de la densidad aparente.
 - Granulometría de difracción por rayos láser.
- Química: Análisis elemental (CNHS).
- Microscópica: Microscopía electrónica de barrido (SEM).

5.3.1. Espuma de poliuretano blanco (W)

La espuma de poliuretano blanco empleada en este estudio es un residuo generado en la fabricación de paneles aislantes, en su mayor parte proviene de la industria de la refrigeración y de la construcción. En este caso, el residuo utilizado ha sido facilitado por la empresa Praxsa S.A. procedente de la fábrica que esta industria tiene en Burgos.

Se presenta en dos formatos: planchas rígidas de diversos tamaños y espesores (Imagen 5.2.), o en polvo (Imagen 5.3). En esta investigación se ha utilizado el residuo en polvo con una distribución granulométrica concreta.



Imagen 5.2. Residuo en planchas (W)



Imagen 5.3. Residuo en polvo (W)



A continuación se detallan los resultados de la caracterización del residuo.

La **densidad real** de la espuma de poliuretano blanco se obtiene mediante el método del picnómetro, según la norma UNE-EN 1936:2007, obteniéndose un resultado de 1.080 Kg/m³.

La **determinación de la densidad aparente**, utilizando la relación peso/volumen, resulta ser de 74,6 Kg/m³ (Imagen 5.4.).



Imagen 5.4. Determinación densidad aparente

La **granulometría de difracción por rayos láser** indica la presencia de partículas con tamaños inferiores a 90,2 μm en el 10% de la muestra, tamaños inferiores a 261,1 μm en el 50% del material y tamaños inferiores a 470,1 μm en el 90% (Tabla 5.4.).

% de la muestra	tamaño inferior (μm)
10	90,2
50	261,1
90	470,1

Tabla 5.4. Tamaño de partícula en el 10%, 50% y 90% de la espuma de poliuretano blanco (W)

El **análisis elemental (CHNS)** constata la presencia de carbono, hidrógeno y nitrógeno en el residuo de poliuretano, cuantificándose su proporción (Tabla 5.5.).

Elemento	C	H	N	S	O	Ca	Otros
%	61,40	12,40	6,80	0,00	5,50	0,00	13,90

Tabla 5.5. Resultados CHNS y SEM de la espuma de poliuretano blanco (W)



En la Imagen 5.5. obtenida por **microscopía electrónica de barrido (SEM)** se observa la estructura microscópica del poliuretano blanco. Presenta una estructura celular de celda cerrada, con celdas homogéneamente distribuidas en cuanto a tamaño y forma.

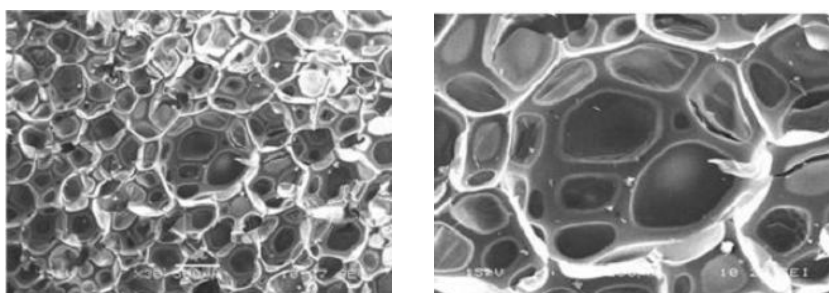


Imagen 5.5. SEM de la espuma de poliuretano blanco

Este ensayo también informa de la proporción de oxígeno y calcio presentes en la muestra (Tabla 5.5.).

5.3.2. Espuma de poliuretano gris (G)

La espuma de poliuretano gris se utiliza como panel aislante para techos de automóviles, los residuos de este material son suministrados por la empresa Grupo Antolín en Burgos. Se presenta como paneles semirrígidos de 1 cm de espesor con un tamaño cercano a los 1,60 x 1,00 m (Imagen 5.6. y 5.7.).

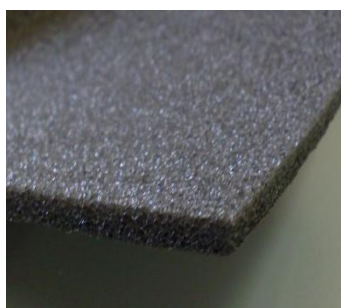


Imagen 5.6. Residuo en planchas (G)



Imagen 5.7. Residuo en trozos (G)

Es necesario procesar la espuma de poliuretano gris para poder utilizarla en los ensayos. Los paneles se parten en trozos más pequeños (Imagen 5.7.), que son introducidos en un Molino RETSCH SM100, donde sufren un proceso de triturado y tamizado (tamiz de 4,00 mm de luz de malla) (Imagen 5.8. y 5.9.).



Imagen 5.8. Molino RETSCH SM100



Imagen 5.9. Residuo triturado (G)

A continuación se detallan los resultados de la caracterización del residuo.

En la **determinación de la densidad real** de la espuma se obtiene un resultado de 1.220 Kg/m^3 , mediante el método del picnómetro.

La **densidad aparente** del material es de $68,0 \text{ Kg/m}^3$.

Los resultados de la **granulometría de difracción por rayos láser** indican la presencia de partícula con tamaños inferiores a $212,1 \mu\text{m}$ en el 10% de la muestra, tamaños inferiores a $1493,2 \mu\text{m}$ en el 50% del material y tamaños inferiores a $2.000 \mu\text{m}$ en el 90% (Tabla 5.6.).

% de la muestra	tamaño inferior (μm)
10	212,1
50	1.493,2
90	2.000,0

Tabla 5.6. Tamaño de partícula en el 10%, 50% y 90% de la espuma de poliuretano gris (G)

Estas son las proporciones halladas en el **análisis elemental (CHNS)** de carbono, hidrógeno y nitrógeno en el residuo de poliuretano gris (Tabla 5.7.).

Elemento	C	H	N	S	O	Ca	Otros
%	65,50	6,20	7,20	0,00	19,00	1,00	1,10

Tabla 5.7. Resultados CHNS y SEM de la espuma de poliuretano gris (G)



La espuma de poliuretano gris que podemos observar a partir de la **microscopía electrónica de barrido (SEM)** presenta una estructura celular, pero algunas de estas celdas aparecen abiertas, lo cual puede deberse al proceso de triturado de los paneles de espuma (Imagen 5.10.).

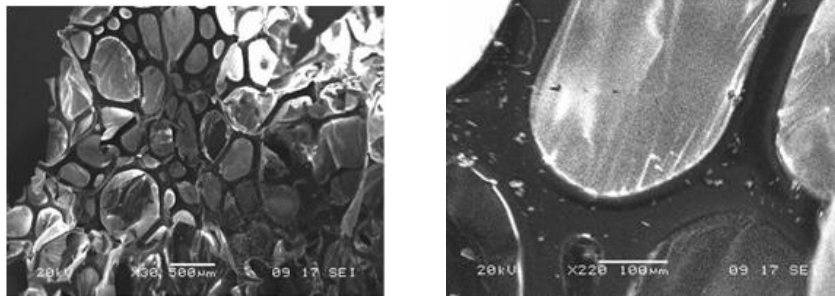


Imagen 5.10. SEM de la espuma de poliuretano gris (G)

Este ensayo también indica la proporción de oxígeno y calcio presentes en la muestra (Tabla 5.7.).

5.3.3. Poliamida en polvo (PA)

La poliamida en polvo se utiliza como materia prima en automoción, para equipos industriales, maquinaria y engranajes, etc. En este caso el residuo disponible para la experimentación es del tipo PA 2200 y ha sido empleado como materia prima un número limitado de veces para producir piezas funcionales (Imagen 5.11.).



Imagen 5.11. Residuo de poliamida en polvo (PA)

A continuación se detallan los resultados de la caracterización del residuo.



La **densidad real** de la poliamida determinada con el método del picnómetro es de 1.070 Kg/m³, y la **densidad aparente** de 540,0 Kg/m³, hallada mediante el método peso/volumen.

El tamaño de partícula obtenido mediante la **granulometría de difracción por rayos láser** aporta una composición de un 10% de partículas con tamaños menores a 37,1 μm, un 50% del material con diámetro menor a 59,8 μm y un 90% de la muestra con valores menores a 85,6 μm (Tabla 5.8.).

% de la muestra	tamaño inferior (μm)
10	37,1
50	59,8
90	85,6

Tabla 5.8. Tamaño de partícula en el 10%, 50% y 90% de la poliamida en polvo (PA)

Los resultados del **análisis elemental (CHNS)** revelan la presencia de carbono, hidrógeno, nitrógeno y azufre en la siguiente proporción (Tabla 5.9.).

Elemento	C	H	N	S
%	70,40	11,20	7,10	0,10

Tabla 5.9. Análisis elemental CHNS de la poliamida en polvo (PA)

La imagen obtenida mediante **microscopía electrónica de barrido (SEM)** muestra la estructura de partículas aisladas de la poliamida en polvo, con formas redondeadas y con tamaños de partícula comprendidos entre 40 y 80 μm (Imagen 5.12.).

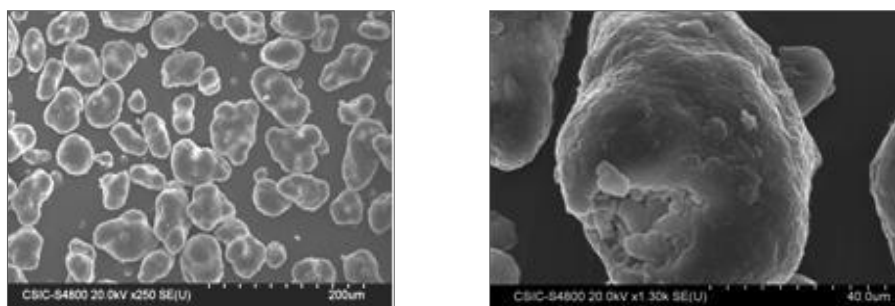


Imagen 5.12. SEM de la poliamida en polvo (PA)



5.3.4. Mixto de poliuretano gris (GM)

El residuo mixto de poliuretano gris procede de la industria del automóvil, en concreto de los desechos de los techos de vehículos. Se trata de un residuo mixto que incluye en su composición espuma de poliuretano, fibra de vidrio y celulosa. Se presenta en forma de pellets o briquetas para reducir de esta forma su volumen (Imagen 5.13.). Al igual que la espuma de poliuretano gris es necesario procesar el residuo mediante triturado para emplearlo en forma pulverulenta (Imagen 5.14.).



Imagen 5.13. Residuo en pellets (GM)



Imagen 5.14. Residuo en polvo (GM)

A continuación se detallan los resultados de la caracterización del residuo.

Presenta una **densidad real** de 1.200 Kg/m³, y una **densidad aparente** de 46,0 Kg/m³.

Los resultados de la **granulometría de difracción por rayos láser** indican la siguiente distribución de partículas: tamaños inferiores a 103,1 μm en el 10% de la muestra, tamaños inferiores a 1092,1 μm en el 50% del material y tamaños inferiores a 1980,0 μm en el 90% (Tabla 5.10.).

% de la muestra	tamaño inferior (μm)
10	103,1
50	1092,1
90	1980,0

Tabla 5.10. Tamaño de partícula en el 10%, 50% y 90% del residuo gris mixto (GM)

El residuo mixto de poliuretano gris se compone de espuma de poliuretano gris (caracterizada anteriormente), fibra de vidrio y celulosa,



por este motivo no es necesario realizar el **análisis elemental (CHNS)**, ya que no nos aportaría más información.

La estructura del residuo detectada con la **microscopía electrónica de barrido (SEM)** presenta una estructura laminar (poliuretano) con presencia de fibras de vidrio en su estructura (Imagen 5.15.).

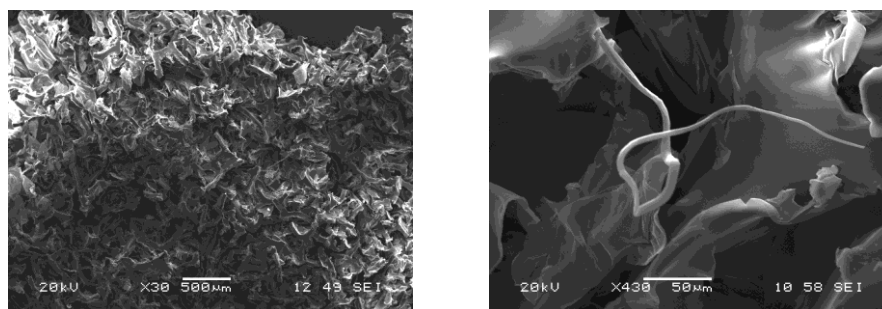


Imagen 5.15. SEM del residuo gris mixto (GM)

El residuo mixto de poliuretano gris se somete a un proceso de **digestión de muestras**, repitiéndose el ensayo cuatro veces con distintas rampas de temperatura, quedando siempre un pequeño residuo sin digerir siendo este muy probablemente fibra de vidrio, hecho que se puede constatar a través de la imagen SEM (Imagen 5.15.) donde se visualizan fibras en la matriz del residuo.

5.3.5. Comparativa de resultados

A continuación se presenta la comparativa de las densidades (real y aparente) (Tabla 5.11.), del tamaño de partícula de los distintos residuos (Tabla 5.12.) y de los resultados del Análisis Elemental (CHNS) (Tabla 5.13.).

Residuo	Densidad real (Kg/m ³)	Densidad aparente (Kg/m ³)
Espuma de poliuretano blanco	1080	74,6
Espuma de poliuretano gris	1220	68,0
Poliamida en polvo	1070	540,0
Mixto de poliuretano gris	1200	46,0

Tabla 5.11. Comparativa de densidades de los residuos



Como se puede apreciar en la Tabla 5.11. todos los subproductos tienen densidades reales muy similares. Las diferencias se encuentran en la densidad aparente, donde las de las espumas son similares, siendo inferior respecto a éstas la del residuo mixto de poliuretano gris, y la poliamida es mucho mayor (unas 7 veces mayor si comparamos con la espuma de poliuretano blanco).

Residuo	10 % de la muestra tamaño inferior (μm)	50 % de la muestra tamaño inferior (μm)	90 % de la muestra tamaño inferior (μm)
Espuma de poliuretano blanco	90,2	261,1	470,1
Espuma de poliuretano gris	212,1	1.493,2	2.000,0
Poliamida en polvo	37,1	59,8	85,6
Mixto de poliuretano gris	103,1	1092,1	1980,0

Tabla 5.12. Comparativa tamaño de partícula de los residuos

Si comparamos el tamaño de partícula de ambas espumas (Tabla 5.12.) se observa claramente el menor tamaño de partícula en la espuma gris (G).

Residuo	C	H	N	S	O	Ca	Otros
Espuma de poliuretano blanco	61,40	12,40	6,80	0,00	5,50	0,00	13,90
Espuma de poliuretano gris	65,50	6,20	7,20	0,00	19,00	1,00	1,10
Poliamida en polvo	70,40	11,20	7,10	0,10	---	---	---
Mixto de poliuretano gris	---	---	---	---	---	---	---

Tabla 5.13. Comparativa análisis CNHS y SEM

En todos los residuos el carbono es el elemento mayoritario en su composición (Tabla 5.13.).



5.4. Cartón

Con el objetivo de simular de la manera más fiel el proceso de producción de las placas de yeso laminado, se ha realizado un estudio previo del papel/cartón que recubre una placa de yeso laminado comercial (PYL estándar) para poder buscar uno de similares características. En la Tabla 5.14. se exponen los resultados de tres muestras distintas.

Muestra	Gramaje (gr)	Calibre (mm)
N1	143	0,21
N2	125	0,23
N3	165	---

Tabla 5.14. Características papel/cartón PYL comercial

Después de buscar en las empresas proveedoras de papel/cartón de la zona, se decidió utilizar un papel cartón reciclado color marrón de 0,16 mm de espesor, 126 gr de gramaje y 0,126 kg/m³ de densidad, según los datos del fabricante (Imagen 5.16.).



Imagen 5.16. Papel/cartón



Imagen 5.17. Pegamento

Para la unión del cartón con el núcleo de yeso se trabaja cola de pintor. Este pegamento se presenta en polvo y ha de mezclarse con agua para su reconstitución, en las proporciones indicadas por el fabricante (Imagen 5.17.).



5.5. Fibras

El hecho de incorporar un material aligerante en la matriz de yeso hace pensar en la posible reducción de prestaciones mecánicas. Una posible alternativa ampliamente estudiada desde hace décadas, es la introducción de fibras (naturales o artificiales), con el objetivo de reforzar la matriz de yeso.

Pero el simple hecho de incorporar una fibra no supone obligatoriamente una mejora, hay que tener en cuenta una serie de factores, que aportan ciertos valores añadidos, y que serán fundamentales en el producto final: longitud, geometría y cantidad de fibra introducida en la mezcla, orientación y grado de dispersión en la matriz.

Las fibras utilizadas en la investigación las identificaremos como:

- **F1:** Fibras de polipropileno (SikaCim®)
- **F2:** Fibras de polipropileno (Paviland®)

Las fibras se someten a una caracterización:

- Física:
 - Densidad
 - Longitud
 - Diámetro
- Química: Análisis elemental (CNHS)
- Microscópica: Microscopía electrónica de barrido (SEM)



5.5.1. Fibras de polipropileno (SikaCim®)

La fibra de polipropileno SikaCim® está especialmente tratada, diseñada y producida para su uso en hormigones y morteros. Se añade a morteros de revoco de fachada, losas de hormigón (soleras, forjados, etc.), en morteros y hormigones proyectados, elementos prefabricados y para revestimientos de canales (Imagen 5.18.).



Imagen 5.18. Fibras de polipropileno SikaCim® (F1)

A continuación se detallan los resultados del estudio de las fibras de polipropileno SikaCim® (F1).

El **análisis elemental (CHNS)** indica la presencia de carbono, hidrógeno y nitrógeno en la fibra. La estructura detectada con la **microscopía electrónica de barrido (SEM)** muestra la orientación y dimensiones de la fibra (Figura 5.2.).

TIPO DE CARACTERIZACIÓN				
FÍSICA		QUÍMICA		MICROSCÓPICA
Naturaleza	Polipropileno	Elemento	%	
Densidad (g/cm ³)	0,91	C	83,16	
Longitud (mm)	6	H	13,12	
Diámetro (µm)	31	N	0,11	
-	-	S	-	
-	-	Otros	3,61	

Figura 5.2. Caracterización física, química y microscópica de la fibra de polipropileno (SikaCim®) (F1)



5.5.2. Fibras de polipropileno (Paviland®)

Se trata de una fibra de polipropileno 100% virgen (Imagen 5.19.) empleada normalmente para refuerzo del hormigón en pavimentos tradicionales hormigón extrusionado, hormigón prefabricado, carreteras, hormigones débiles, soleras de hormigón y gunitados.



Imagen 5.19. Fibras de polipropileno Paviland® (F2).

A continuación se detalla la caracterización de las fibras de polipropileno Paviland® (F2).

El **análisis elemental (CHNS)** indica la presencia de carbono, hidrógeno, nitrógeno y azufre en el residuo. La estructura detectada con la **microscopía electrónica de barrido (SEM)** muestra la orientación y dimensiones de la fibra (Figura 5.3.).

TIPO DE CARACTERIZACIÓN				
FÍSICA		QUÍMICA		MICROSCÓPICA
Naturaleza	Polipropileno	Elemento	%	
Densidad (g/m³)	0,91	C	85,57	
Longitud (mm)	12	H	14,31	
Diámetro (µm)	30	N	0,08	
-	-	S	0,04	
-	-	Otros	-	
-	-	-	-	

Figura 5.3. Caracterización física, química y microscópica de la fibra de polipropileno (Paviland®) (F2)

Capítulo 6.

Caracterización de mezclas



En este capítulo se presentan los resultados de la caracterización de mezclas con los que se trabaja en esta investigación.

En un primer apartado se recopilan los resultados de la caracterización de las mezclas de yeso con residuos de espuma de poliuretano blanco, la espuma de poliuretano gris y la poliamida en polvo, procedentes estos datos de la investigación previa del grupo de Materiales dentro del que se enmarca esta Tesis. Todos estos datos son necesarios para comprender mejor el trabajo posterior realizado.

Los resultados de la caracterización de las mezclas de espuma de poliuretano blanco (W), espuma de poliuretano gris (G) y poliamida en polvo (PA) provienen de los estudios realizados por la Doctora Sara Gutiérrez González publicados en su Tesis Doctoral⁹⁰, así como en los artículos y patentes derivados de la misma.

Como complemento a esa investigación, se trabaja con un nuevo residuo al que se ha llamado mixto de poliuretano gris (GM). Este material procede de la industria del automóvil, son restos del material aislante que compone los techos de los vehículos, incluye en su composición espuma de poliuretano, fibra de vidrio y celulosa.

En el segundo apartado de este capítulo se exponen los datos obtenidos en la caracterización de estas nuevas mezclas, buscando con esto conocer la viabilidad del uso de este nuevo agregado. El estudio se ha realizado mediante la caracterización en estado fresco y en estado endurecido de las mezclas yeso+residuo.

A partir de la comparación de los resultados detallados en ambos apartados, se han seleccionado las mejores mezclas con el fin de elaborar placas de yeso laminado.

Como estudio adicional se realiza la caracterización térmica, referida a valores de reacción al fuego, tga y resistencia térmica de las mezclas con mejores prestaciones a nivel físico-mecánico.

⁹⁰ Gutiérrez González, Sara. (2012). Tesis Doctoral: Yesos aligerados fabricados a partir de residuos de espumas de poliuretano y polvo de poliamida. Universidad de Burgos.



6.1. Mezclas de yeso con residuos de espuma de poliuretano y poliamida

A continuación, se muestran a modo de resumen, los resultados obtenidos en la investigación previa con un doble objetivo. El primero, comparar los datos obtenidos en la caracterización del residuo mixto de poliuretano gris (GM) con los obtenidos del poliuretano gris (G) debido a la similitud en la composición y características entre ambos. El segundo, seleccionar las mezclas que mejor comportamiento presentan en cuanto a prestación del material para ser incorporadas como materia prima en la fabricación de las placas de yeso laminado.

Los resultados se identificarán como:

- **Serie I:** Resultados de las mezclas de yeso con residuo de espuma de poliuretano blanco (W).
- **Serie II:** Resultados de las mezclas de yeso con residuo de espuma de poliuretano gris (G).
- **Serie III:** Resultados de las mezclas de yeso con residuo de poliamida en polvo (PA).

Las tablas muestran los resultados de los ensayos de:

- Relación agua/(yeso+residuo) y tiempos de fraguado (Tabla 6.1.)
- Densidad, retención de agua y absorción por capilaridad (Tabla 6.2.)
- Dureza Shore C (Tabla 6.3.)
- Resistencia a flexión y compresión 7 y 28 días (Tabla 6.4.)
- Adherencia y permeabilidad al vapor de agua (Tabla 6.5.)



Serie nº	Clave	Relación Agua / (Yeso+Residuo)	Tiempo de fraguado (min)
Serie I	1/0,5 W	0,52	10,0
	1/1 W	0,60	12,0
	1/2 W	0,82	21,0
	1/3 W	1,15	32,0
	1/4 W	1,45	32,5
Serie II	1/0,5 G	0,46	13,0
	1/1 G	0,57	18,0
	1/2 G	0,94	28,0
	1/3 G	1,36	39,0
	1/4 G	1,70	42,0
Serie III	1/0,5 PA	0,43	16,0
	1/1 PA	0,42	18,0
	1/2 PA	0,45	21,0
	1/3 PA	0,48	26,0
	1/4 PA	0,50	30,0

Tabla 6.1. Resultados de relación agua/(yeso+residuo) y tiempos de fraguado Serie I, Serie II y Serie III

Serie nº	Clave	Densidad aparente húmeda (Kg/m ³)	Densidad aparente seca a los 7 días (Kg/m ³)	Retención de agua (%)	Absorción por capilaridad (mm/min)
Serie I	1/0,5 W	1583	1258	25,8	35,00
	1/1 W	1483	1114	33,1	44,00
	1/2 W	1335	879	51,9	62,75
	1/3 W	1181	674	75,2	86,50
	1/4 W	1073	535	100,0	102,25
Serie II	1/0,5 G	1620	1323	22,5	28,75
	1/1 G	1493	1140	31,0	44,50
	1/2 G	1272	795	60,0	83,50
	1/3 G	1135	590	92,4	118,75
	1/4 G	1030	516	100,0	131,50
Serie III	1/0,5 PA	1436	1190	20,7	28,50
	1/1 PA	1306	1074	21,6	34,00
	1/2 PA	1148	909	26,3	44,25
	1/3 PA	1076	829	29,8	54,50
	1/4 PA	1001	751	33,3	65,00

Tabla 6.2. Resultados de densidad, retención de agua y absorción por capilaridad Serie I, Serie II y Serie III



Serie nº	Clave	Dureza Shore C (7 días)	Dureza Shore C (28 días)
Serie I	1/0,5 W	86,37	89,17
	1/1 W	76,69	83,63
	1/2 W	45,59	52,05
	1/3 W	15,00	21,17
	1/4 W	8,47	11,81
Serie II	1/0,5 G	82,40	89,47
	1/1 G	76,58	77,40
	1/2 G	31,67	32,27
	1/3 G	12,90	14,28
	1/4 G	9,04	10,04
Serie III	1/0,5 PA	88,43	88,57
	1/1 PA	86,59	87,00
	1/2 PA	80,03	80,20
	1/3 PA	70,87	70,97
	1/4 PA	64,51	61,83

Tabla 6.3. Resultados de dureza Shore C
Serie I, Serie II y Serie III

Serie nº	Clave	Resistencia a flexión 7 días (MPa)	Resistencia a flexión 28 días (MPa)	Resistencia compresión 7 días (MPa)	Resistencia compresión 28 días (MPa)
Serie I	1/0,5 W	3,40	3,79	8,87	9,59
	1/1 W	2,41	2,65	5,92	6,78
	1/2 W	0,90	1,05	2,14	2,51
	1/3 W	0,21	0,42	0,45	0,88
	1/4 W	0,10	0,12	0,20	0,41
Serie II	1/0,5 G	3,71	3,91	9,45	9,78
	1/1 G	2,31	2,39	5,84	6,23
	1/2 G	0,69	0,87	1,45	1,45
	1/3 G	0,26	0,32	0,46	0,47
	1/4 G	0,12	0,18	0,21	0,27
Serie III	1/0,5 PA	3,45	3,79	8,39	8,66
	1/1 PA	2,47	2,59	6,38	6,54
	1/2 PA	1,07	1,39	3,54	3,75
	1/3 PA	0,71	0,90	2,27	2,37
	1/4 PA	0,33	0,48	1,32	1,47

Tabla 6.4. Resultados de resistencia a flexión y compresión a 7 y 28 días
Serie I, Serie II y Serie III



Serie nº	Clave	Adherencia (N/mm ²)	Pérdida de adherencia (%)	Permeabilidad al vapor de agua (Kg/m s Pax10 ⁻¹¹)
Serie I	1/0,5 W	0,64	00,00	1,630
	1/1 W	0,35	24,57	2,342
	1/2 W	0,18	61,21	3,398
	1/3 W	0,08	82,76	3,429
	1/4 W	0,07	84,91	3,490
Serie II	1/0,5 G	0,41	11,64	1,543
	1/1 G	0,38	18,10	1,794
	1/2 G	0,16	65,52	3,555
	1/3 G	0,13	71,98	4,340
	1/4 G	0,06	87,07	4,371
Serie III	1/0,5 PA	0,33	28,26	1,173
	1/1 PA	0,07	85,43	1,393
	1/2 PA	0,05	90,00	2,430
	1/3 PA	0,04	91,09	2,505
	1/4 PA	0,02	95,22	2,231

Tabla 6.5 Resultados de adherencia y permeabilidad al vapor de agua Serie I, Serie II y Serie III



6.2. Mezclas de yeso con residuo mixto de poliuretano gris

Se ha llevado a cabo la caracterización de las mezclas de yeso con residuo mixto de poliuretano gris (GM) con el objetivo de analizar la viabilidad de este residuo para ser reutilizado como aligerante en una matriz de yeso y para conocer el nivel de prestaciones del material compuesto para poder ser incorporado como materia prima en la fabricación de placas de yeso laminado.

Los resultados se identificarán como:

- **Serie IV:** Resultados de las mezclas de yeso con residuo mixto de poliuretano gris (GM).

6.2.1. Justificación del porcentaje de sustitución

Las pautas seguidas para determinar el porcentaje de sustitución de yeso por los distintos residuos se llevan a cabo por varias razones, como son la experiencia previa, criterios medioambientales, trabajabilidad de las mezclas, así como la necesidad de estos nuevos materiales por cumplir con unas exigencias mecánicas mínimas, sin olvidar el principio de viabilidad económica.

Tomando como volumen base el que ocupa una parte de yeso, se realizan sustituciones de 0,5, 1, 2, 3 y 4 partes de yeso por residuo mixto de poliuretano gris (GM) (Tabla 6.6.).

Mezcla	Relación en volumen (Y/GM)		Porcentaje de Sustitución	Yeso	Residuo
	Yeso	Residuo GM		<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
			%		
RF	1	0	00,0		
1/0,5 GM	1	0,5	33,3		
1/1 GM	1	1	50,0		
1/2 GM	1	2	66,6		
1/3 GM	1	3	75,0		
1/4 GM	1	4	80,0		

Tabla 6.6. Sustituciones de yeso por residuo GM



Para poder comparar los resultados obtenidos en la caracterización del residuo GM, es preciso fabricar una serie de probetas de referencia (sin ningún tipo de adición) denominadas RF. Además, por sus similares características físico-mecánicas, se cotejan los resultados de las mezclas de poliuretano gris mixto con los de las dosificaciones que incorporan sólo espuma de poliuretano.

6.2.2. Proceso de fabricación

Tanto para los ensayos en estado fresco (relación agua/yeso, principio de fraguado) como en estado endurecido (densidad aparente, retención de agua, dureza Shore C, resistencias mecánicas, absorción por capilaridad, adherencia, permeabilidad al vapor de agua), se ha seguido el mismo procedimiento de fabricación, que se explica a continuación.

Inicialmente, se mezclan en seco el yeso y el residuo, vertiendo la mezcla al agua, removiendo manualmente con la espátula durante 1 minuto aproximadamente. La pasta formada se mezcla en la amasadora durante 1 minuto a baja velocidad (140 ± 5) min^{-1} en movimiento planetario. Una vez obtenida la pasta, ésta se introduce en los moldes normalizados para realizar los diferentes ensayos en estado endurecido (Imagen 6.1.).



Imagen 6.1. Fabricación de probetas (40x40x160) mm^3

Cuando la pasta adquiere el grado adecuado de resistencia, se desmoldan las probetas identificándolas. Las probetas deben mantenerse durante 7 días en la atmósfera del laboratorio con una temperatura de $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ y una humedad relativa de $(50 \pm 5)\%$. Secándose después hasta masa constante a una temperatura de $(40 \pm 2)^\circ\text{C}$, enfriándose en desecador hasta la temperatura del laboratorio. El número de probetas y dimensión de las mismas es específico para cada tipo de ensayo a realizar, como ya quedó descrito en el "Capítulo 4. Procedimiento experimental".



6.2.3. Relación Agua/(Yeso+Residuo). Método de la mesa de sacudidas

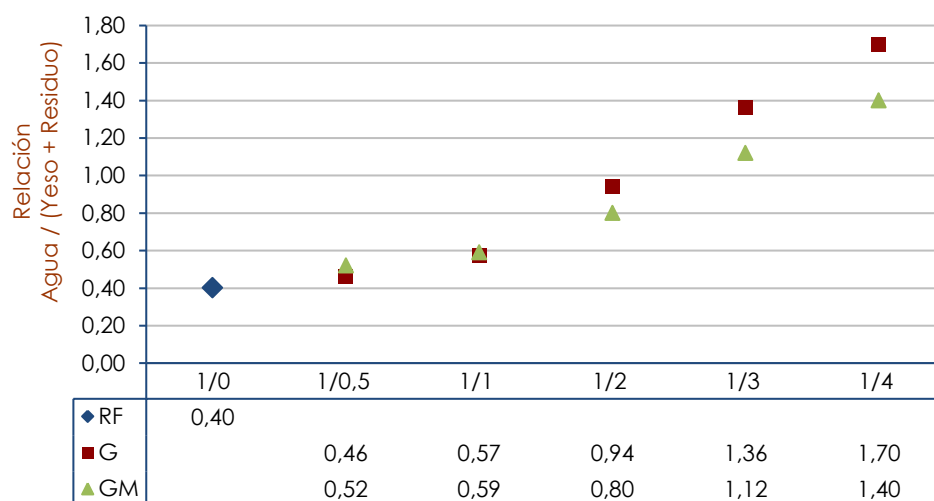
El procedimiento experimental se ha llevado a cabo, mediante el método ensayo-error. Se trata de hallar la relación agua/(yeso+residuo) necesaria para que la mezcla sea trabajable. En la Tabla 6.7. se detallan los resultados obtenidos.

Serie nº	Clave	Relación Agua / (Yeso + Residuo)
	RF	0,40
Serie IV	1/0,5 GM	0,52
	1/1 GM	0,59
	1/2 GM	0,80
	1/3 GM	1,12
	1/4 GM	1,40

Tabla 6.7. Relación agua/(yeso+ residuo GM)

Al comparar los resultados de las mezclas de residuo GM con la probeta de referencia (RF) (Gráfica 6.1), se advierte un aumento progresivo en la relación agua/(yeso+residuo), debido posiblemente al paulatino incremento de la porosidad de las mezclas.

Este aumento en la demanda de agua, se cuantifica en un 30% y un 47% en las relaciones 0,5 y 1 respectivamente, duplicándose en el caso de la relación 1/2, llegando a ser el triple en la relación 1/4.



Gráfica 6.1. Comparativa de la relación agua/(yeso+ residuo)



Al cotejar los resultados de ambos residuos (G-GM) se advierten dos efectos diferentes. En las relaciones 1/0,5 y 1/1, la necesidad de agua es mayor en el residuo GM, invirtiéndose la tendencia a partir de la dosificación 1/2 donde el aumento de la proporción de residuo implica una necesidad menor de agua para trabajar las mezclas de residuo GM frente a las de residuo G. La presencia de fibra de vidrio en el residuo GM se presupone como la causante de este menor requerimiento de agua en sustituciones elevadas. Otros autores han experimentado este mismo efecto cuando las mezclas presentan fibras de vidrio. Inicialmente absorben agua y después las fibras expulsan esta agua paulatinamente, lo que permite disponer de una menor cantidad de agua de amasado⁹¹.

6.2.4. Principio de fraguado. Método del cono de Vicat

Los tiempos del principio de fraguado van aumentando a medida que sustituimos yeso por residuo GM (Tabla 6.8.), ajustándose a una gráfica de tendencia lineal. Los tiempos son similares en las relaciones 0,5 y 1, duplicándose en la relación 1/2, triplicándose en el caso de la dosificación 1/3 y llegando a 3,5 veces el incremento del tiempo de fraguado en la sustitución 1/4 respecto a la dosificación de referencia (RF).

Serie nº	Clave	Tiempo de fraguado (min)
Serie IV	RF	10,3
	1/0,5 GM	13,0
	1/1 GM	15,0
	1/2 GM	24,0
	1/3 GM	30,0
	1/4 GM	36,0

Tabla 6.8. Determinación de los tiempos de fraguado mezclas de yeso con residuo gris mixto (GM)

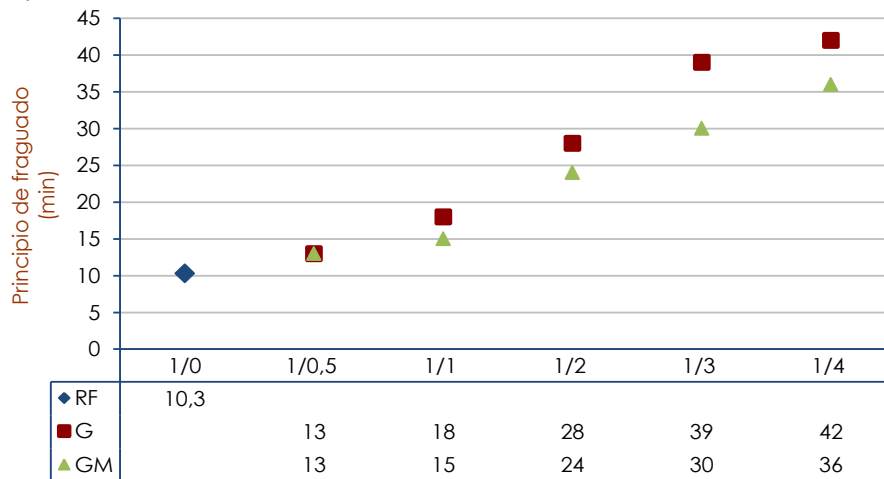
A medida que se introduce residuo en la mezcla aumenta la porosidad del material, lo que implica elevar la capacidad de retención de agua en la matriz base. En consecuencia, la cantidad de agua presente en la mezcla se incrementa al ir aumentando el volumen de sustitución de yeso, por lo que el tiempo necesario para su eliminación

⁹¹ Zhao, K., Li, J., Wang, F. «Experimental study on local compression of concrete-filled glass fiber reinforced gypsum wall panel». Advance materials research. (2013). Vols.671-674, pp. 668-673



también se amplia, siendo los tiempos de principio de fraguado por lo tanto más amplios.

Si se relacionan los resultados del residuo GM respecto a los valores de tiempo de fraguado del residuo G, vemos como los primeros son menores que en las mezclas con residuo G, se reducen un 14% en las dosificaciones 1/2 y 1/4, un 17% en la 1/1 y un 23% en la 1/3 (Gráfica 6.2).



Gráfica 6.2. Comparativa de los tiempos de fraguado

Aunque ambos materiales tienen densidades similares la necesidad de agua para trabajar las mezclas son diferentes, por lo que los tiempos de fraguado también varían. En las relaciones 1/0,5 y 1/1, los tiempos son similares aun cuando la relación agua/(yeso+residuo) es mayor en el residuo GM. Por el contrario en la dosificación 1/2 y posteriores, la necesidad de agua es menor en el residuo mixto con tiempos también menores (Tabla 6.9.).

		Relación Agua / (Yeso + Residuo)	Tiempo de fraguado (min)
1/0,5	G	0,46	13,0
	GM	0,52	13,0
1/1	G	0,57	18,0
	GM	0,59	15,0
1/2	G	0,94	28,0
	GM	0,80	24,0
1/3	G	1,36	39,0
	GM	1,12	30,0
1/4	G	1,70	42,0
	GM	1,40	36,0

Tabla 6.9. Relación agua/(yeso+ residuo) -Tiempos de fraguado



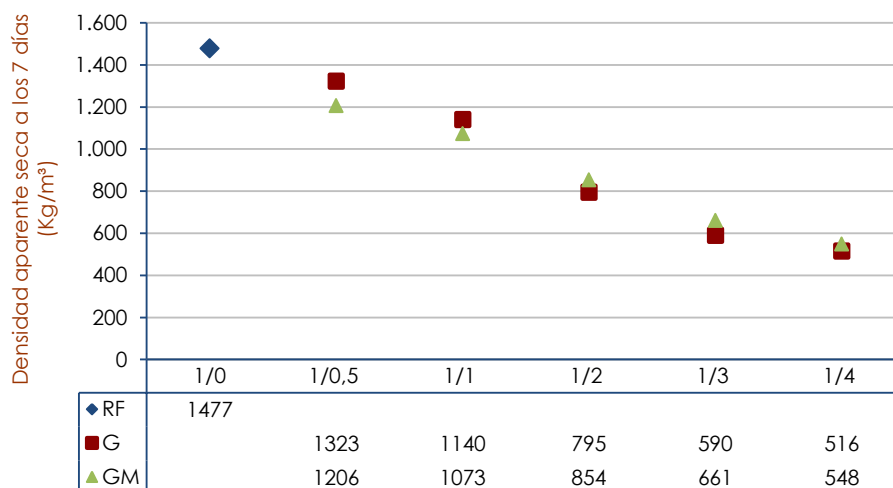
6.2.5. Densidad aparente

Para calcular la densidad aparente de las probetas, se utiliza la relación Peso/Volumen. Como se detalla en la Tabla 6.10., la densidad disminuye respecto a la serie de referencia un 18% (1/0,5), 27% (1/1), 42% (1/2), 55% (1/3) y un 63% (1/4). Esto se explica por el aumento progresivo de la cantidad de agua presente en la mezcla, que al evaporarse deja mayor cantidad de poros en el material. Además, la introducción de un material con menor densidad que la matriz base favorece esta disminución en el peso.

Serie nº	Clave	Densidad aparente húmeda (Kg/m ³)	Densidad aparente seca a los 7 días (Kg/m ³)
Serie IV	RF	1713	1477
	1/0,5 GM	1566	1206
	1/1 GM	1463	1073
	1/2 GM	1331	854
	1/3 GM	1194	661
	1/4 GM	1111	548

Tabla 6.10. Determinación de la densidad aparente mezclas de yeso con residuo gris mixto (GM)

Al comparar los resultados de la serie G y la serie GM, se observan disminuciones similares de la densidad (Gráfica 6.3. y Tabla 6.11.).



Gráfica 6.3. Comparativa densidad aparente seca a los 7 días (kg/m³)



Siendo estas reducciones menores en las relaciones 0,5 y 1, e invirtiéndose el efecto en sustituciones mayores. Este efecto está en consonancia con el ensayo del cálculo de la relación agua/(yeso+residuo).

En el caso de las mezclas de la serie GM se observan reducciones en la densidad de un 10% (1/0,5), 23% (1/1), 46% (1/2), 60% (1/3) y un 65% (1/4), respecto a la mezcla de referencia.

Reducción de la densidad (%)										
RF	1/0,5		1/1		1/2		1/3		1/4	
	G	GM	G	GM	G	GM	G	GM	G	GM
0	10	18	23	27	46	42	60	55	65	63

Tabla 6.11. Comparativa densidad aparente seca a los 7 días (%)

6.2.6. Capacidad de retención de agua

Con la relación entre la densidad aparente húmeda que se tiene al desmoldar la probeta y la densidad aparente seca a los 7 días, se halla la capacidad de retención de agua de las diversas mezclas. Este parámetro depende del tipo de residuo utilizado, del tamaño de partícula del mismo y de la porosidad de la mezcla, además varía de forma directamente proporcional a la capacidad de absorción del material.

A medida que aumenta la presencia de residuo, la retención de agua es mayor, ya que el incremento del volumen de sustitución produce un aumento de la porosidad del material (Tabla 6.12.).

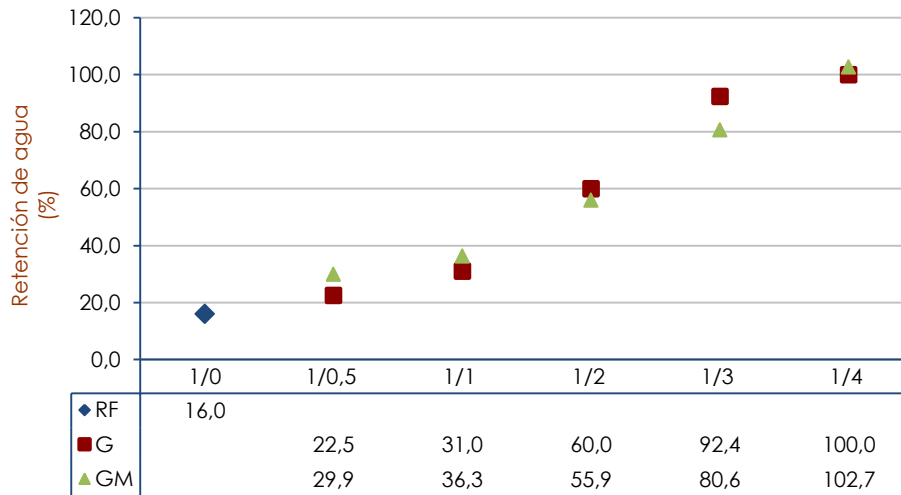
Serie nº	Clave	Retención de agua (%)
	RF	16,0
Serie IV	1/0,5 GM	29,9
	1/1 GM	36,3
	1/2 GM	55,9
	1/3 GM	80,6
	1/4 GM	102,7

Tabla 6.12. Capacidad de retención de agua de mezclas de yeso con residuo gris mixto (GM)

En el caso del poliuretano gris la capacidad de retención de agua es ligeramente menor en las sustituciones 1/0,5 y 1/1 respecto al residuo



GM, aumentando en la 1/2 y 1/3 e igualándose en la 1/4 (Gráfica 6.4.). Se produce la misma variación que en los ensayos de densidad y de relación (agua/ yeso+poliuretano).



Gráfica 6.4. Comparativa resultados retención de agua (%)

6.2.7. Dureza Shore C

En los resultados detallados en la Tabla 6.13., se observa la progresiva reducción de la dureza superficial, tanto a los 7 como a los 28 días respecto a la probeta de referencia. Este comportamiento resulta de la introducción de materias primas más blandas en la matriz del material, así como del incremento de la porosidad.

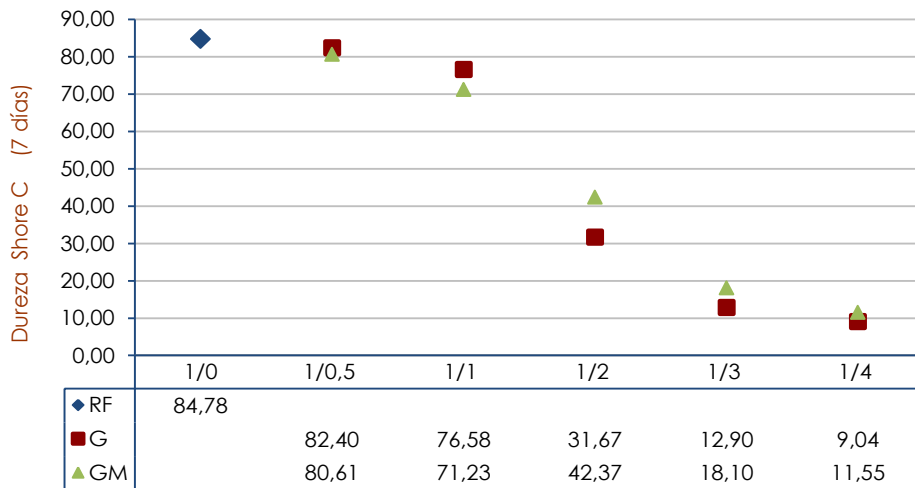
Las probetas a 28 días respecto a las de 7 experimentan un ligero aumento de la dureza Shore C.

Serie nº	Clave	Dureza Shore C (7 días)	Dureza Shore C (28 días)
	RF	84,78	93,33
Serie IV	1/0,5 GM	80,61	80,72
	1/1 GM	71,23	71,83
	1/2 GM	42,37	42,52
	1/3 GM	18,10	20,21
	1/4 GM	11,55	11,75

Tabla 6.13. Determinación de la dureza Shore C mezclas de yeso con residuo gris mixto (GM)

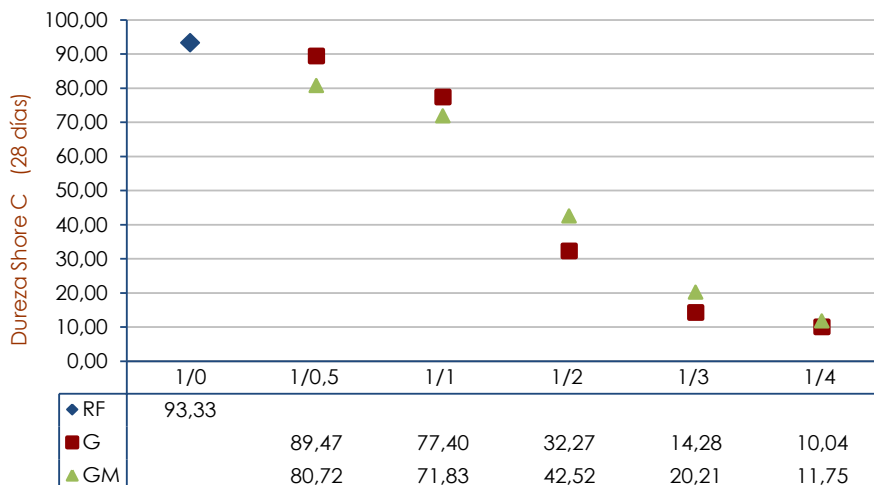


En la Gráfica 6.5. se comparan los resultados de dureza Shore C a 7 días, de las mezclas con residuos G y GM. En las dosificaciones 1/0,5 y 1/1 la dureza no merma de forma importante, y en ambas sustituciones los valores de disminución son similares. Es a partir de la dosificación 1/2 donde se produce una bajada significativa frente a los valores de RF, siendo las mezclas con residuo G en su matriz, las que peores resultados ofrecen.



Gráfica 6.5. Comparativa resultados dureza Shore C a los 7 días

Respecto a los resultados de las mezclas con ambos residuos (G, GM) a 28 días (Gráfica 6.6.), la tendencia es análoga a la de las probetas a 7 días. Con una disminución brusca a partir de la dosificación 1/2, con valores más reducidos en las probetas con el residuo G.



Gráfica 6.6. Comparativa resultados dureza Shore C a los 28 días



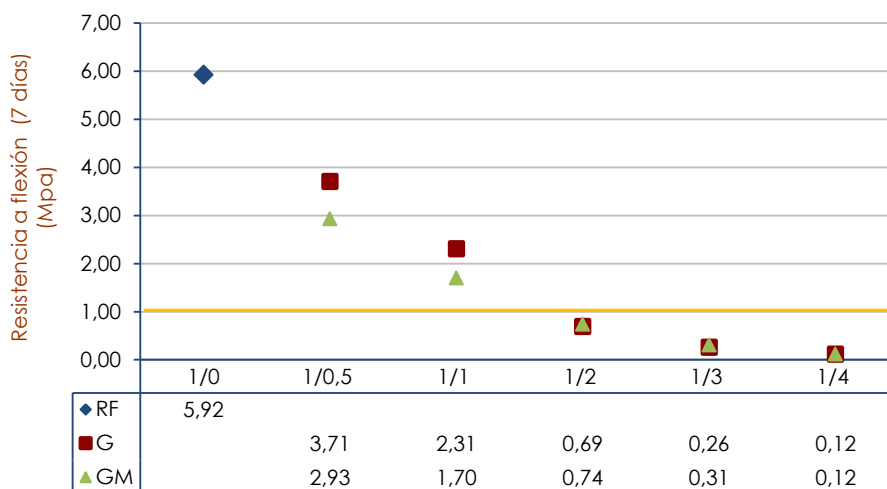
6.2.8. Resistencia a flexión y compresión

Se han ensayado las probetas a resistencia a flexión y compresión a 7 y 28 días, la Tabla 6.14. muestra los resultados obtenidos. En la serie a 7 días las resistencias disminuyen un 51% (1/0,5), 71% (1/1), 88% (1/2), 95% (1/3) y un 98% (1/4), respecto a la probeta de referencia. Las probetas a 28 días presentan resistencias similares respecto a las ensayadas a 7 días.

Serie nº	Clave	Resistencia a flexión 7 días (MPa)	Resistencia a flexión 28 días (MPa)
Serie IV	RF	5,92	6,10
	1/0,5 GM	2,93	2,98
	1/1 GM	1,70	1,82
	1/2 GM	0,74	0,79
	1/3 GM	0,31	0,37
	1/4 GM	0,12	0,14

Tabla 6.14. Determinación de la resistencia a flexión a los 7 y 28 días mezclas de yeso con residuo gris mixto (GM)

En el caso de comparar la resistencia a flexión a los 7 días del polímero G con los resultados del residuo GM, se observan mejores resultados con las sustituciones 1/0,5 y 1/1 de la serie G, igualándose en el resto de la serie (Gráfica 6.7.).



Gráfica 6.7. Comparativa resultados resistencia a flexión a los 7 días (MPa)

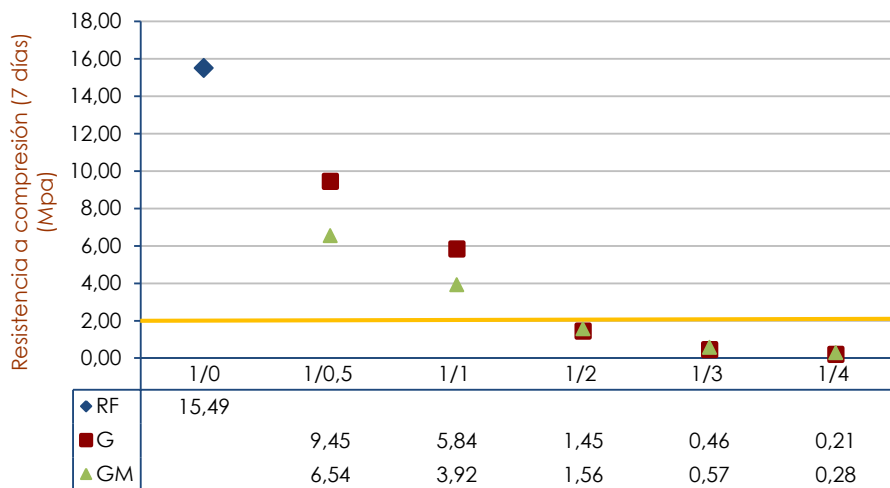


Si se analizan los datos de resistencia a compresión, los resultados a 7 días disminuyen un 58% (1/0,5), 75% (1/1), 90% (1/2), 96% (1/3) y un 98% (1/4), respecto a probetas de referencia. Al comparar los resultados a 7 y 28 días, se aprecian leves incrementos de la resistencia a compresión (Tabla 6.15.).

Serie nº	Clave	Resistencia a compresión 7 días (MPa)	Resistencia a compresión 28 días (MPa)
Serie IV	RF	15,49	15,64
	1/0,5 GM	6,54	6,58
	1/1 GM	3,92	3,99
	1/2 GM	1,56	1,61
	1/3 GM	0,57	0,67
	1/4 GM	0,28	0,33

Tabla 6.15. Determinación de la resistencia a compresión a los 7 y 28 días mezclas de yeso con residuo gris mixto (GM)

En la comparativa de los residuos G y GM los resultados a compresión a los 7 días, mantienen la misma tendencia (Gráfica 6.8.).



Gráfica 6.8. Comparativa resistencia a compresión a los 7 días (MPa)

La disminución progresiva de la resistencia a flexión y compresión a medida que aumenta la cantidad de residuo, se debe a que la



densidad del poliuretano es menor que la del yeso y a que el incremento de agua en las mezclas cada vez es mayor, lo que conduce a una porosidad cada vez más elevada en estado endurecido. Los porcentajes de disminución son similares en ambos ensayos.

Los requerimientos mínimos de resistencia que deben alcanzar las probetas en el ensayo, según la norma UNE-EN 13279-1:2009, son de 1,00 MPa a flexión y 2,00 MPa a compresión, las dosificaciones 1/0,5 y 1/1 cumplen con ambas condiciones.

6.2.9. Absorción por capilaridad

La Tabla 6.16. detalla los resultados del ensayo de absorción por capilaridad. La densidad de las probetas disminuye a medida que aumenta el volumen de sustitución y la porosidad de la mezcla también va incrementándose de manera proporcional a la capacidad de absorción por capilaridad del material. Los incrementos en la absorción oscilan entre un 53% en la relación 1/0,5 y un 367% en la relación 1/4.

Serie nº	Clave	Absorción por capilaridad (mm/min)
Serie IV	RF	21,8
	1/0,5 GM	33,3
	1/1 GM	38,0
	1/2 GM	59,0
	1/3 GM	92,0
	1/4 GM	102,3

Tabla 6.16. Determinación de la absorción por capilaridad mezclas de yeso con residuo gris mixto (GM)

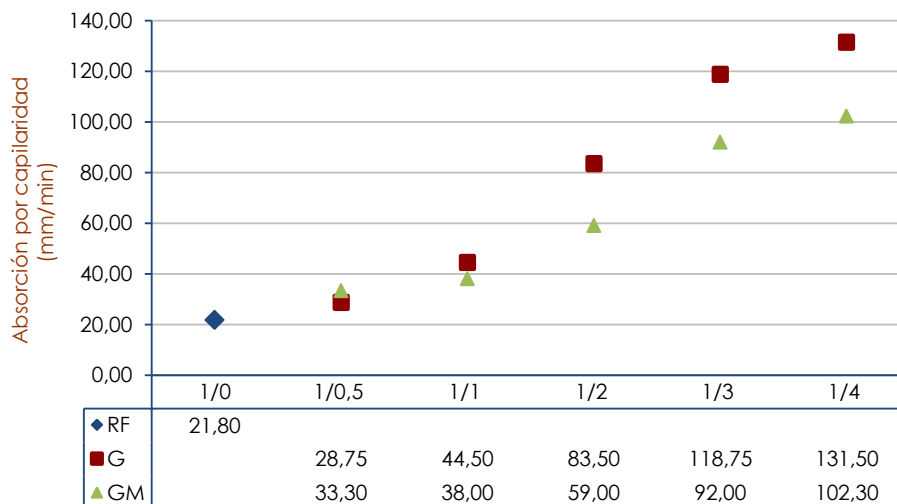
En la Imagen 6.2. pueden apreciarse las probetas tras la realización del ensayo de absorción por capilaridad en las dosificaciones 1/0,5, 1/2 y 1/4.



Imagen 6.2. Ensayo de absorción por capilaridad



Al contrastar estos resultados con los del residuo G se advierte una menor absorción por capilaridad en las mezclas GM, excepto en la dosificación 1/0,5 (Gráfica 6.9.). Comportamiento que resulta similar al del ensayo del cálculo la relación agua/(yeso+residuo).



Gráfica 6.9. Comparativa resultados absorción por capilaridad (mm/min)

6.2.10. Adherencia

Cuando se determina la adherencia del material se recoge la lectura de la carga máxima aplicada sobre soporte cerámico (Tabla 6.17.). El dato más relevante es la pérdida de adherencia de las distintas dosificaciones respecto a la de referencia, con una merma muy importante de los valores a partir de la dosificación 1/2, pérdidas que superan el 65%.

Serie nº	Clave	Adherencia (N/mm ²)	Pérdida de adherencia (%)
	RF	0,46	00,00
Serie IV	1/0,5 GM	0,32	30,43
	1/1 GM	0,33	28,26
	1/2 GM	0,16	65,22
	1/3 GM	0,09	80,43
	1/4 GM	0,05	89,13

Tabla 6.17. Determinación de la adherencia mezclas de yeso con residuo gris mixto (GM)



Aun así únicamente las dosificaciones 1/3 y 1/4 se encuentran por debajo del valor mínimo de 0,10 N/mm² establecido en la norma UNE-EN 13279-2.

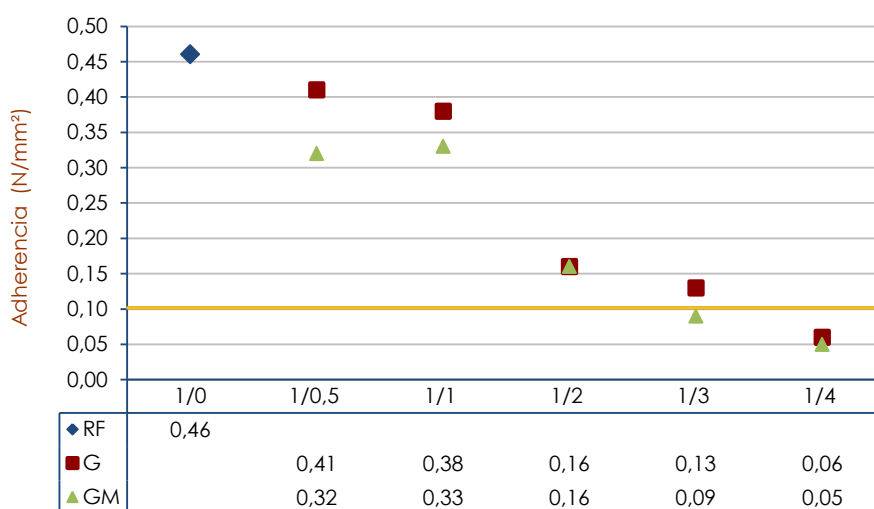
Pero en este ensayo no debe tenerse sólo en cuenta el valor de adherencia (N/mm²), también denominada resistencia al arrancamiento esperada, la norma UNE-EN 13279-2 apunta que debe indicarse cuál es la forma de rotura del material, por adhesión o por cohesión, en aquellas muestras que no cumplen con el mínimo establecido.

En las dosificaciones 1/3 y 1/4 la rotura es por cohesión, el problema se manifiesta en el propio material (yeso+residuo), siendo este incapaz de soportar la fuerza aplicada (Imagen 6.3.).



Imagen 6.3. Ensayo de adherencia 1/3 GM y 1/4 GM

Se observa en la Gráfica 6.10., cómo para las sustituciones del poliuretano G, los valores obtenidos son ligeramente superiores con respecto a los resultados de residuo GM.



Gráfica 6.10. Comparativa resultados adherencia (N/mm²)

6.2.11. Permeabilidad al vapor de agua

Una vez hallado el flujo de vapor de agua que atraviesa el material, se determina la permeancia, que se multiplica por el espesor de la probeta obteniendo como resultado la permeabilidad del material.

En este caso puede apreciarse que al incrementar los valores de sustitución, se produce un aumento de la permeabilidad, debido a la reducción de la densidad del material y a un aumento de la porosidad del mismo (Tabla 6.18.).

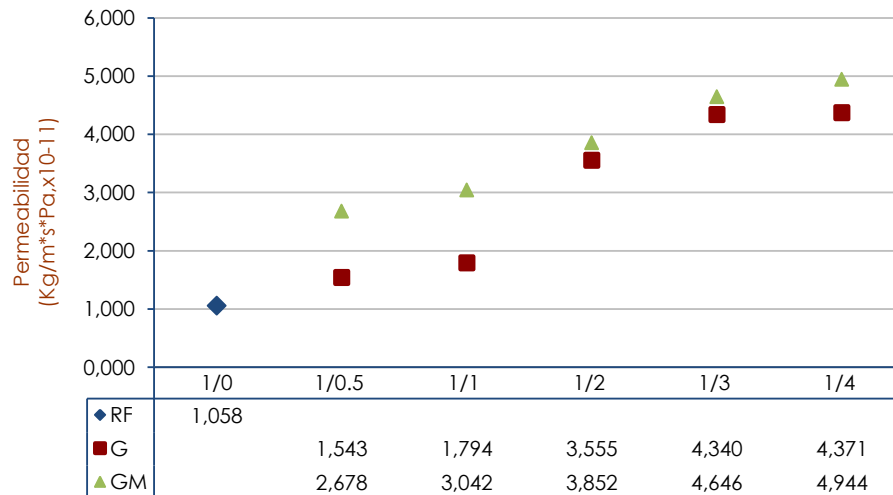
Serie nº	Clave	Permeabilidad (Kg/m·s·Pax10 ⁻¹¹)
Serie IV	RF	1,058
	1/0,5 GM	2,678
	1/1 GM	3,042
	1/2 GM	3,852
	1/3 GM	4,646
	1/4 GM	4,944

Tabla 6.18. Determinación de la permeabilidad al vapor de agua en mezclas de yeso con residuo gris mixto (GM)

Al comparar ambos residuos (Gráfica 6.11.), se aprecia cómo en todas las mezclas con residuo mixto de poliuretano gris la permeabilidad es mayor que en las mezclas con poliuretano gris. La espuma de poliuretano gris tiene una densidad real de 1220 Kg/m³ y la del residuo mixto de poliuretano gris es de 1120 Kg/m³. Esta diferencia en las



densidades supone ese incremento de la porosidad de las mezclas de GM, que da lugar a valores de permeabilidad más altos.



Gráfica 6.11. Comparativa resultados ensayo de permeabilidad al vapor de agua ($\text{Kg/m}\cdot\text{s}\cdot\text{Pa}\cdot 10^{-11}$)

6.2.12. Microscopía electrónica de barrido (SEM)

Se muestran a continuación, las interfases yeso-residuo obtenidas en el SEM de dos de las dosificaciones que se han trabajado en el experimental, se trata de las dosificaciones 1/2 GM y la 1/4 GM.

La imagen 6.4. muestra la estructura microscópica de una muestra de residuo GM con la dosificación 1/2. Se puede apreciar la presencia de láminas de poliuretano rodeadas de cristales de yeso bien desarrollados, con una buena cohesión entre ambos materiales mediante unión mecánica sin reacción química entre yeso y polímero.

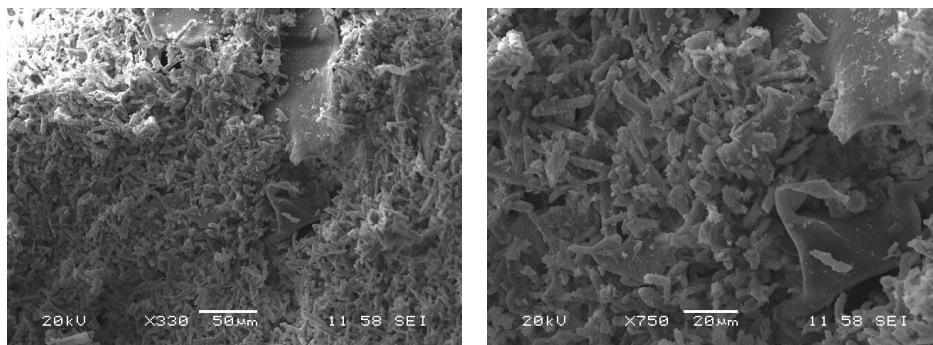


Imagen 6.4. SEM de la muestra 1/2 GM



Aun habiendo triturado el residuo GM la microscopía constata la presencia de fibras provenientes del residuo, entre las láminas de poliuretano y el yeso (Imagen 6.5).

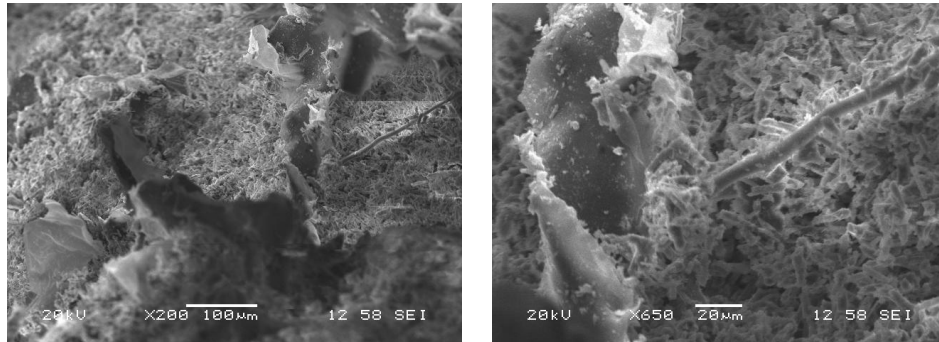


Imagen 6.5. SEM de la muestra 1/2 GM

En el SEM de la muestra 1/4 GM (Imagen 6.6.) se aprecia una mayor profusión de láminas de poliuretano dentro de la matriz de yeso, siendo esta la diferencia más destacada respecto a la microscopía de la muestra 1/2 GM.

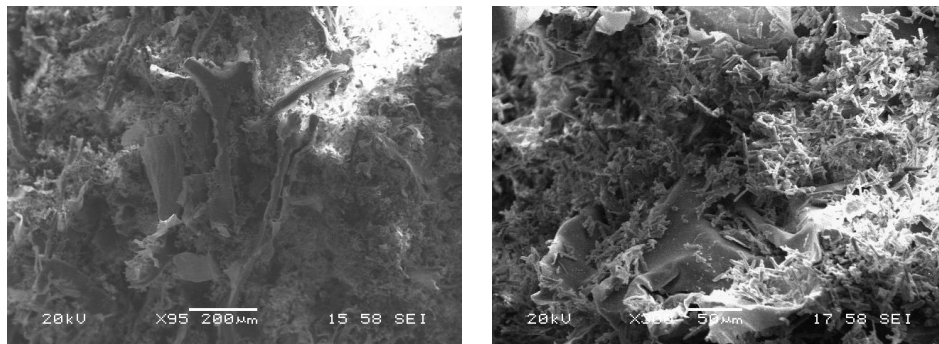


Imagen 6.6. SEM de la muestra 1/4 GM



6.3. Caracterización térmica de mezclas

En este apartado se detallan los resultados de los ensayos realizados para caracterizar térmicamente las distintas mezclas. Para ello se realiza una medición de flujo de calor para determinar la conductividad térmica del material y un análisis termogravimétrico (TGA) que nos muestra los valores de temperatura que son capaces de soportar los materiales utilizados en la experimentación.

6.3.1. Conductividad térmica

La conductividad térmica de un material depende por un lado, de la propia conductividad térmica de las materias primas que lo forman y por otro de la relación del peso/densidad del material⁹².

Con los datos obtenidos a partir del método de la placa caliente guardada y el método del medidor del flujo de calor, se establece la conductividad térmica de las muestras estudiadas, en relación con las densidades de cada dosificación. Estos datos proceden de investigaciones precedentes (Tabla 6.19.).

	Clave	Densidad aparente seca a los 7 días (Kg/m ³)	Conductividad térmica (λ) (W/m·K)
	RF	1477	0,3057
Serie I	1/0,5 W	1258	0,3160
	1/1 W	1114	0,2701
	1/2 W	879	0,1861
	1/3 W	674	0,1285
	1/4 W	535	0,1039
Serie II	1/0,5 G	1323	0,2931
	1/1 G	1140	0,2626
	1/2 G	795	0,1828
	1/3 G	590	0,1105
Serie III	1/4 G	516	0,1014
	1/0,5 PA	1190	0,2624
	1/1 PA	1074	0,2419
	1/2 PA	909	0,1902
	1/3 PA	829	0,1418
	1/4 PA	751	0,1397

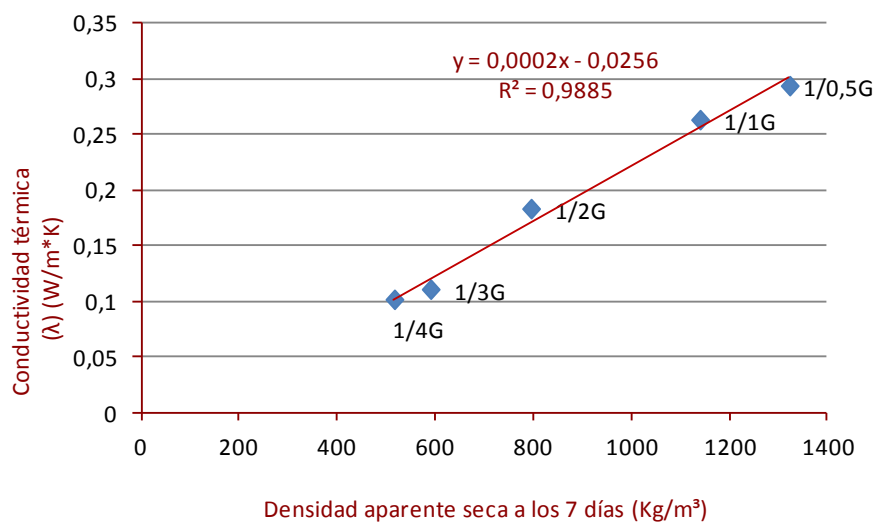
Tabla 6.19. Conductividad térmica mezclas Serie I, Serie II y Serie III

⁹² Li M., Wu Z., Chen M.. «Preparation and properties of gypsum-based heat storage and preservation material». Energy Build (2011), 43, 2314–2319.



Al introducir un material menos denso en el yeso, la porosidad del material aumenta, debido a la estructura de huecos cerrados de la materia prima de sustitución y a la mayor relación agua (yeso+residuo)⁹³. Estos huecos están rellenos de aire, hecho que en principio implica una reducción de la conductividad térmica del material, con lo que las resistencias térmicas aumentan.

En la Gráfica 6.12. se representan los resultados de la densidad y la conductividad térmica del residuo de la Serie II (residuo de espuma de poliuretano gris (G)).



Gráfica 6.12. Relación densidad conductividad térmica

Los datos representados se aproximan a una recta de regresión, con una buena reproducibilidad muy cercana a 1, en la que la ecuación de la recta es la siguiente:

$$y = 0,002x - 0,0256$$
$$R^2 = 0,99$$

A continuación, se muestran las ecuaciones de las rectas de regresión, generadas con diferentes tipos de residuos poliméricos celulares, que integran la matriz de yeso (Tabla 6.20.). Estos datos

⁹³ Yu, Q.L., Brouwers H.J.H. «Thermal properties and microstructure of gypsum board and its dehydration products: A theoretical and experimental investigation». Fire and Materials (2012), 36:575–589



proviene de los estudios de otros investigadores, que han trabajado con poliestireno expandido triturado y gránulos o esferas de poliestireno (blanco y gris)⁹⁴.

En todos los casos, se produce un comportamiento térmico similar al que se origina en las mezclas de yeso con residuos de espuma de poliuretano. Es decir, a medida que se incorpora residuo en la mezcla de yeso, la densidad decrece, lo que ocasiona un incremento del aislamiento térmico. Efecto que se hace aún más evidente por tratarse de residuos de baja conductividad térmica.

Residuo	Ecuación de la recta	R ²
Poliuretano W	$y = 0,0003x - 0,0681$	0,99
Poliuretano G	$y = 0,0002x - 0,0256$	0,99
Poliestireno triturado	$y = 0,0002x + 0,0334$	0,93
Esferas de poliestireno blanco	$y = 0,0002x + 0,0331$	0,96
Esferas de poliestireno gris	$y = 0,0002x + 0,0111$	0,98

Tabla 6.20. Análisis de regresión del coeficiente de conductividad térmica de mezclas de yeso con residuos termo-aislantes

En el caso de las mezclas de yeso con residuo mixto de poliuretano gris (GM), se podría deducir un comportamiento similar al de las mezclas de espuma de poliuretano gris (G).

Debido por una parte a su composición, este residuo está formado en su mayor parte por espuma de poliuretano gris, asimismo aun cuando la presencia de celulosa y fibra de vidrio en estos residuos podría aportar valores sensiblemente diferentes a los obtenidos con poliuretano gris, puede predecirse en cualquier caso, un buen comportamiento térmico, dado que ambos componentes presentan bajos valores de conductividad térmica⁹⁵. Y por otro lado está su estructura, dado que ha sido sometido al mismo tratamiento de triturado que las espumas de poliuretano gris, por lo cual presenta una estructura celular similar.

⁹⁴ Šeputyté-Juciké, J., Arsenij, G., Sinicaa, M., Kligysa, M., Vaitkusa, S. «Impact of granules from crushed expanded polystyrene package on properties of thermoinsulating plasters». *Journal of Civil Engineering and Management* (2014), 20:581–589

⁹⁵ Muñoz, A., Chejne, F., Espinel, J., Londoño, C. «Evaluation of the cellulose of paper and coal ashes, like alternative insulating materials». *Dyna rev.fac.nac.minas* (2006), v 73 n 148:1–8



Además los datos de los ensayos en las mezclas de yeso con residuo GM, muestran un comportamiento análogo de estas mezclas y las mezclas de yeso con residuo de poliuretano gris, lo que indica ambas familias de mezclas presentan la misma tendencia en la densidad (Tabla 6.21.).

Clave	Densidad aparente seca (G)	Densidad aparente seca (GM)
1/0,5	1323	1206
1/1	1140	1073
1/2	795	854
1/3	590	661
1/4	516	548

Tabla 6.21. Comparativa densidad aparente seca (Kg/m^3) residuo G y GM



6.3.2. Análisis termogravimétrico (TGA)

Los resultados de la termogravimetría (TGA) muestran el % de pérdida de peso del yeso y de los distintos residuos al incremento de temperatura⁹⁶.

Los TGA de la espuma de poliuretano gris y la del mixto de poliuretano gris son similares. Ambas sufren una degradación pronunciada a partir de los 240 °C, estabilizándose en los 550 °C (Figura 6.1.).

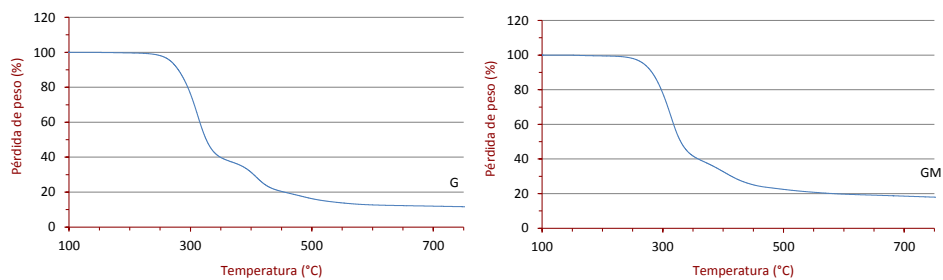


Figura 6.1. TGA del poliuretano gris (G) y del gris mixto (GM)

En el caso de la espuma de poliuretano blanco se presenta una degradación inicial en el tramo entre 180-250 °C con una segunda pérdida de masa entre los 250-500 °C. Con el residuo de poliamida la degradación comienza a una temperatura de 300 °C manteniéndose la misma hasta los 500°C (Figura 6.2.).

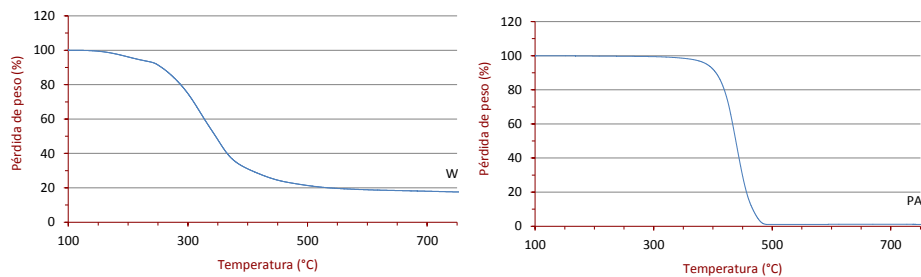


Figura 6.2. TGA del poliuretano blanco (W) y de la poliamida (PA)

En la Figura 6.3. se muestran los datos obtenidos en el TGA del yeso y de las mezclas de yeso con distintas dosificaciones de residuo de poliuretano gris.

⁹⁶ Carvalho, M.T.M., Leles, M. I. G., Tubino R. M. C. « TG and DSC studies on plaster residues as recycled material». Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, Vol. 91 (2008) 2, 621–625



La muestra de yeso (Y) presenta una pérdida de peso inicial importante entre los 90-180°C debido a la pérdida del agua estructural del sulfato cálcico dihidratado, presentándose una segunda degradación entre los 580 y 700°C.

En el caso de las mezclas de yeso con poliuretano gris el comportamiento es similar al yeso, con una degradación inicial a los 90-180°C, continuando con la pérdida de peso aunque de manera menos pronunciada a partir de los 200-500°C.

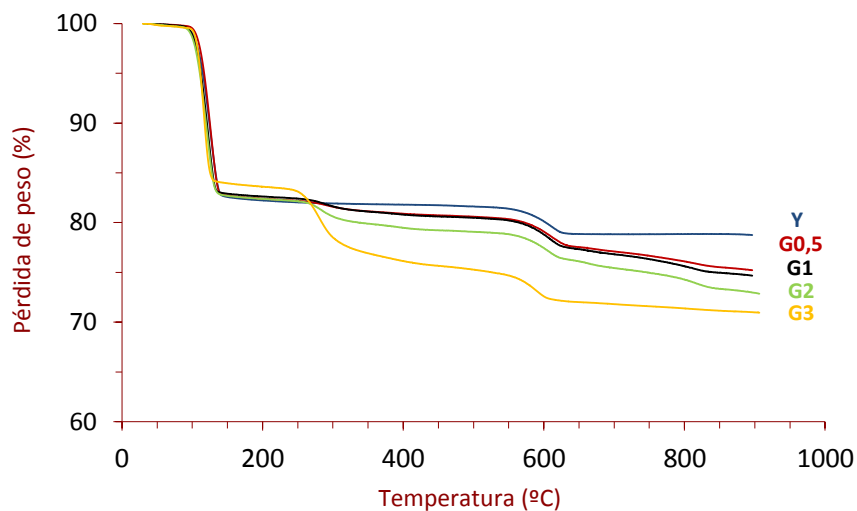


Figura 6.3. TGA de las mezclas de poliuretano gris (G)

Debido a la similitud de la curva de degradación del residuo G y del GM podemos equiparar la composición de ambos residuos. A partir de esto es posible pensar que la degradación de las mezclas con el residuo GM serán similares a las del residuo G.

Todos estos datos nos llevan a pensar que en un principio, el comportamiento térmico del material es aceptable con cualquiera de los residuos ensayados.



6.4. Conclusiones

La cantidad de agua necesaria para trabajar las mezclas de residuo GM va incrementándose a medida que se aumenta la sustitución de residuo por yeso, así como los tiempos de principio de fraguado. La densidad del material disminuye, debido a una mayor porosidad en la mezcla, lo que implica elevar su capacidad de retención de agua y absorción por capilaridad, incrementándose al mismo tiempo su permeabilidad al vapor de agua. La presencia de un material más blando (poliuretano) en la matriz del material incurre en una progresiva disminución de la dureza superficial. Las mezclas 1/0,5 y 1/1 son las que superan los mínimos establecidos en norma respecto de la resistencia a flexión y compresión. La adherencia se reduce significativamente a partir de la dosificación 1/2.

En cuanto a la comparativa con el residuo gris, en las dosificaciones 1/0,5 y 1/1 de GM se precisan mayores cantidades de agua para ser trabajadas, los tiempos de principio de fraguado y las densidades son menores. En las otras tres dosificaciones las necesidades de agua son menores reduciéndose a la vez los tiempos de principio de fraguado pero aumentando las densidades. La capacidad de retención de agua es superior en el residuo GM únicamente en las dosificaciones 1/2 y 1/3, la mayor porosidad en estas mezclas conllevan también una menor dureza superficial. En estos resultados parece influir la presencia de fibra de vidrio en el residuo GM.

En cuanto a las resistencias a flexión y compresión ambos residuos tienen semejantes comportamientos, siendo las dosificaciones 1/0,5 y 1/1 las que superan los mínimos establecidos. Las mezclas de residuo GM tienen menor capacidad de absorción (excepto la 1/0,5) que las del residuo G. Los datos de adherencia son peores en el residuo GM, con mayores valores de permeabilidad al vapor de agua.

Los residuos poliméricos de estructura celular, reducen la densidad de las mezclas de yeso que los incorporan en su matriz. Los valores de conductividad térmica están relacionados con la densidad de los materiales, ajustándose ambos valores a una recta de regresión lineal. Lo que supone que, a menores densidades, menor conductividad térmica y por tanto, mejor comportamiento aislante térmico.

A su vez, la conductividad depende del propio material por lo que mezclas con materiales aislantes se ven favorecidas en cuanto al comportamiento térmico final. Se prevé que las mezclas de yeso con residuo GM, presentarían un comportamiento similar a las de



poliuretano G, debido a que muestran una composición y estructura similares, con valores de densidad aparente análogos.

Capítulo 7.

Fabricación y caracterización de placas de yeso laminado



En este capítulo se detalla la fabricación así como los ensayos de caracterización de las placas de yeso laminado. Los ensayos se han basado en lo señalado en la Norma UNE-EN 520:2005+A1, debido a la similitud que guardan los materiales ensayados en esta investigación con las placas de yeso existentes en el mercado.

7.1. Justificación de las dosificaciones elegidas

La elección de las dosificaciones para la fabricación de las probetas (placas de yeso), ha seguido criterios diferentes en función del tipo de residuo.

En el caso del poliuretano blanco, del poliuretano gris y de la poliamida, la selección de dosificaciones proviene de la experiencia anterior dentro de este mismo campo y de los resultados obtenidos en los capítulos previos de este Trabajo, que hace considerar que las sustituciones superiores a dos partes de residuo por cada de matriz base (yeso), deriva en una pérdida importante de las propiedades físico-mecánicas de las mezclas.

Este hecho hace predecir que, para utilizar reemplazos mayores, sería preciso añadir aditivos y fibras de refuerzo a la matriz base. En la Tesis de la Doctora S. Gutiérrez González se ha experimentado con la idea de inclusión de aditivos superplastificantes en una matriz de yeso con residuos. Los resultados obtenidos indican que la incorporación de aditivos (en función del tipo y de la dosificación empleada) en los morteros de yeso con residuos poliméricos, afecta a sus propiedades mejorando sus resistencias mecánicas ligeramente, a la par que aumenta la adherencia sobre soporte cerámico y su comportamiento reológico. Estas propiedades no se han hecho evidentes en mezclas con sustituciones elevadas de yeso por residuo (sustituciones mayores a 1/2). Esta circunstancia justifica las dosificaciones empleadas en esta Tesis Doctoral.

En el caso del residuo mixto de poliuretano gris (GM), la investigación propia es la que ha aportado las dosificaciones necesarias. Una vez analizados los datos obtenidos en la caracterización de las mezclas yeso-mixto de poliuretano gris (GM), se observa (al igual que en los resultados de los otros residuos) una progresiva disminución de las características físico-mecánicas, a medida que se aumentan los porcentajes de sustitución. Las dosificaciones que cumplen los estándares de resistencia a compresión (2 MPa) y a flexión (1 MPa), son las mezclas con sustituciones de 0,5, y 1 partes de yeso por residuo mixto



de poliuretano gris, por lo que son las establecidas para la fabricación de placas. Se ha optado por fabricar también placas con la dosificación 1/2, que aun no cumpliendo los estándares de flexión y compresión se aproxima en gran medida.

Además, hay que estudiar las mejoras que pueden sufrir estas placas al incluir fibras en su composición, por lo que se necesitan datos de referencia. Por ello, se confeccionan una serie de probetas que llamaremos de referencia (sin ningún tipo de adición), cuyos resultados se contrastan con los obtenidos en las probetas con residuo, permitiendo observar los efectos de la adición de residuo en la matriz de yeso.

La sustitución (Yeso/Residuo) se realiza en volumen y la relación [agua/(yeso+residuo)] es la necesaria para conseguir una trabajabilidad adecuada. Las dosificaciones utilizadas y su nomenclatura se detallan a continuación (Tabla 7.1.):

- **PYL RF:** Placa de yeso laminado de referencia (solo yeso)
- **PYL W:** Placa de yeso laminado con residuo de espuma de poliuretano blanco.
- **PYL G:** Placa de yeso laminado con residuo de espuma de poliuretano gris.
- **PYL PA:** Placa de yeso laminado con residuo de poliamida.
- **PYL GM:** Placa de yeso laminado con residuo mixto de poliuretano gris.

Serie nº	Clave	Relación en volumen (Yeso/Residuo)	Relación Agua / Yeso + Residuo
Referencia	PYL RF	1/0	0,47
	PYL W 0,5	1/0,5	0,52
Serie I	PYL W 1	1/1	0,60
	PYL W 2	1/2	0,82
Serie II	PYL G 0,5	1/0,5	0,46
	PYL G 1	1/1	0,57
	PYL G 2	1/2	0,94
Serie III	PYL PA 0,5	1/0,5	0,43
	PYL PA 1	1/1	0,42
	PYL PA 2	1/2	0,45
Serie IV	PYL GM 0,5	1/0,5	0,52
	PYL GM 1	1/1	0,59
	PYL GM 2	1/2	0,80

Tabla 7.1. Dosificaciones utilizadas en la fabricación de placas



Debido a la influencia del coeficiente de forma en la variación de las propiedades en los materiales, ha sido necesario modificar en la dosificación de referencia (PYL RF) el valor de relación agua/(yeso+residuo). Se ha aumentado, pasando del valor de 0,40, utilizado en las mezclas, a 0,47 para las placas. De esta manera se facilita el llenado de los moldes para su fabricación. Si se optara por relaciones menores de agua /yeso, conllevaría un tiempo muy reducido de fraguado, que impide llenar el molde en tiempo sin que la pasta fragüe. En el resto de dosificaciones no ha sido necesario realizar ningún cambio, ya que todas son suficientemente trabajables en los tiempos requeridos de llenado.

7.2. Proceso de fabricación

Se han elaborado un número suficiente de probetas, habiendo siempre un mínimo de tres por dosificación y ensayo. Las dimensiones vienen señaladas en la norma UNE-EN 520:2005+A1, por lo que para todos los ensayos las probetas tendrán unas medidas de (300x400x15) mm³.

7.2.1. Equipos necesarios para la fabricación de probetas

Los equipos utilizados en la fabricación de las probetas son los siguientes:

Balanzas electrónicas: para pesar el yeso, el agua y el residuo.

- Balanza electrónica marca COBOS (precisión) con graduación mínima de 0,1 g y con capacidad máxima de 4.000 g (Imagen 7.1.).
- Balanza marca COBOS (precisión) con graduación mínima de 20 g, con capacidad máxima de 60 Kg y capacidad mínima de 800 g (Imagen 7.2.).



Imagen 7.1. Balanza (max. 4 kg)



Imagen 7.2. Balanza (max. 60 kg)



Cronómetro: para controlar los tiempos de amasado manual y mecánico.

Bandejas de plástico de diverso tamaño: para la mezcla previa de los materiales utilizados.

Diverso material de taller: como espátulas, palas, etc.

Amasadora: Para realizar la mezcla de los diversos componentes. Marca PROETI S.A. (Imagen 7.3.).

Estufa: para el secado de las probetas. Marca P. SELECTA modelo DICON 501 (Imagen 7.4.).



Imagen 7.3. Amasadora Mecánica



Imagen 7.4. Estufa

Moldes: de las dimensiones indicadas: (300x400x15) mm³ (Imagen 7.5.).

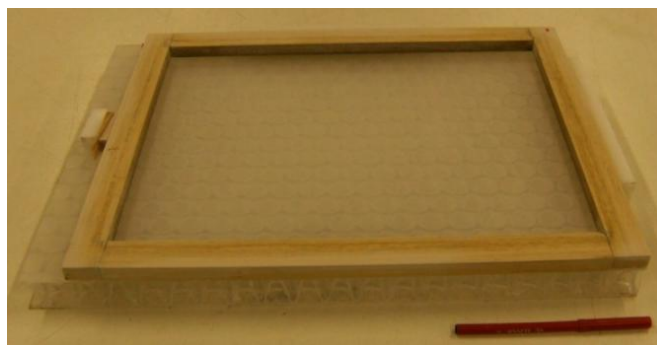


Imagen 7.5. Molde para la fabricación de probetas

7.2.2. Procedimiento

El procedimiento operativo para la fabricación de probetas se ha realizado de manera homogénea y reproducible para todas las mezclas. En el caso de los residuos de espuma de poliuretano blanco,



espuma de poliuretano gris y de mixto de poliuretano gris, pueden utilizarse sin más tratamiento posterior, una vez triturados. En cambio el residuo de poliamida debe secarse en la estufa, ya que es capaz de absorber la humedad ambiental.

El yeso utilizado se deseca en estufa a una temperatura de (40 ± 2) °C durante 24 horas. Posteriormente, se retira de la estufa y una vez transcurrido el tiempo prescrito hasta su enfriamiento, se homogeneiza y se introduce en un recipiente estanco (Imagen 7.6.) hasta el momento de emplearlo en los ensayos.



Imagen 7.6. Yeso homogeneizado y recipiente estanco

Con el objetivo de evitar posibles roturas de la probeta en el momento de desmoldarlas, se engrasan los moldes con líquido desencofrante antes de depositar la mezcla (yeso+residuo+agua) en ellos.

El proceso de fabricación se inicia pesando el residuo (W, G, PA, GM) y el yeso en la balanza electrónica. A continuación se mezclan ambos componentes en seco en un recipiente y se homogeneizan con la ayuda de una espátula (Imagen 7.7.).



Imagen 7.7. Mezcla de residuo de espuma de poliuretano blanco y yeso



Seguidamente, la mezcla se agrega al agua (previamente pesada) en el vaso de la amasadora.

A continuación se amasa la mezcla, primero a mano durante un minuto (Imagen 7.8.) y después en la amasadora mecánica durante otro minuto a velocidad lenta. El molde se rellena de forma uniforme, retirando el exceso de masa con una regla (Imagen 7.9.).



Imagen 7.8. Amasado manual de la mezcla Imagen 7.9. Llenado del molde

Tras esto se introduce el molde en la estufa a una temperatura de $(40\pm 2)^{\circ}\text{C}$ durante 24 horas (Imagen 7.10.). Una vez transcurrido este tiempo se procede al desmoldado, introduciendo nuevamente las placas en la estufa hasta conseguir que alcancen una masa constante (Imagen 7.11.).



Imagen 7. 10. Estufa con moldes



Imagen 7.11 Estufa con probetas

7.2.3. Papel empleado para la fabricación de placas de yeso

Otro de los parámetros a tener en cuenta en la fabricación de placas de yeso es el papel-cartón que envuelve las placas de yeso laminado comerciales. Según la norma UNE-EN 520:2005+A1 la placa de



yeso laminado (PYL) se define como “*aquel material formado por un alma de yeso íntimamente ligada a dos láminas de cartón para formar una placa rectangular y lisa*”.

El uso del papel en las placas de yeso laminado cumple una finalidad importante ya que, debido a la estructura fibrosa de la celulosa del mismo, es necesario un mayor aporte de energía para fisurar la probeta⁹⁷, lo que le confiere al material un mayor grado de resistencia mecánica.

Tratando de ser fieles a la definición dada por la norma, se ha pretendido unir un papel-cartón al alma de yeso. Para ello, previamente se ha estudiado el proceso de fabricación real de las PYL comerciales. En este caso, la adhesión del papel al yeso se realiza depositando la pasta en una cinta continua en la que confluyen las dos láminas de celulosa, de forma que la mezcla, previamente aditivada, queda atrapada entre ambas hojas. La adhesión se completa en el proceso de secado y fraguado final y curado⁹⁸. Este proceso se ha llevado a cabo a escala de laboratorio. La primera fase se basa en los análisis del gramaje de los papeles utilizados en las PYL comerciales, para a continuación buscar uno de características similares (Apartado 5.4.).

En un primer intento se colocó el papel directamente sobre la mezcla fresca, durante la fabricación de las probetas, introduciendo previamente el papel en una disolución de cola-agua (Imagen 7.12.).



Imagen 7.12. Probeta con papel: proceso de fabricación

Al secarlas en la estufa el papel se seca antes que la mezcla, y se despegar de la mayoría de las probetas. Una explicación a este hecho puede ser la necesidad de introducir en la pasta un aditivo a base de

⁹⁷ Alonso, J.A., Reyes, E., Gálvez, J.C. (2011). «Caracterización del comportamiento en fractura de paneles sándwich de Placas de yeso laminado y lana de roca». Anales de Mecánica de la Fractura 28, Vol.1.

⁹⁸ La Placa de Yeso Laminado. Placo Saint –Gobain (2014) www.placo.es



resina que facilite la adhesión del papel en el momento del fraguado. Para evitar desvirtuar los resultados de la investigación del propio material matriz, esta posibilidad no se ha llevado a cabo. En este sentido se opta por pegar directamente el papel sobre la probeta ya fraguada, endurecida y seca, habiendo impregnado el papel previamente con una disolución de cola. En este caso, se observa que el papel queda unido a las placas durante la realización de los ensayos, pero al finalizarlos la unión base-papel falla por adhesión, no aportando mejoras a los resultados (Imagen 7.13).



Imagen 7.13. Probeta con papel: fallo por adhesión del papel

Debido a los resultados desfavorables obtenidos en la unión del papel con la matriz de yeso y dado que esta investigación se realiza con el ánimo de entender la variación de las propiedades que inducen los residuos en la pasta, se ha eliminado el factor papel para continuar con la misma. Investigadores como García Santos⁹⁹, González Madariaga, Mayor¹⁰⁰ u Oliver¹⁰¹, han analizado el comportamiento de las placas de yeso laminado trabajando en este mismo sentido.

⁹⁹ García Santos, A. (2009). Patente: Material de construcción de yeso o escayola aligerado y su uso en placas y paneles. Universidad Politécnica de Madrid. N° de publicación: ES 2 292 309 B2.

¹⁰⁰ Mayor, P., Bustamante, R., Rangel, C., Hernández Olivares, F. (2008). «Propiedades térmicas, acústicas y mecánicas de placas de morteros yeso-caucho». II Jornadas de Investigación en Construcción. Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, CSIC.

¹⁰¹ Oliver Ramírez, A., García Santos, A., Neila González, F.J. (2011). «Caracterización física y mecánica de placas de yeso con materiales de cambio de fase incorporados para almacenamiento de energía térmica mediante calor latente». *Materiales de Construcción* Vol.61, n° 303, 465 - 484.



7.3. Caracterización de placas de yeso laminado

Los ensayos se han basado en lo señalado en la Norma UNE-EN 520:2005+A1, debido a la similitud que guardan los materiales ensayados en esta investigación con las placas de yeso existentes en el mercado. Según esta norma, para poder realizar la experimentación, deben cortarse probetas rectangulares de dimensiones variables (según el ensayo que se pretenda realizar) de la placa a examinar. Debido a la dificultad de fabricar PYL de dimensiones comerciales en el laboratorio, para posteriormente cortar las probetas necesarias para el estudio, se ha optado por el empleo de probetas de dimensiones: $(400\pm 1,5)$ mm x $(300\pm 1,5)$ mm en todos los ensayos para estandarizar el proceso de fabricación.

Se ha determinado la densidad, la resistencia a flexión (expresada como carga de rotura a flexión), la capacidad de absorción de agua y la dureza superficial de las placas.

Cuando se ensaya a flexión una PYL comercial, se tiene en cuenta el sentido en el que se corta la probeta (longitudinal /transversal). En este caso, se han fabricado las placas con una dimensión concreta y de forma individual, por lo que no se ha tenido en cuenta el factor de sentido de corte.

7.3.1. Resultados placas comerciales

A continuación se presentan los datos obtenidos de los ensayos de una placa de yeso laminado comercial. (Tabla 7.2.) Se incluyen para poder tener una referencia. Las placas del mercado tienen en su composición una compleja mezcla de materias primas (yeso, aditivos, aligerantes, fibras), que van a influir significativamente en los resultados finales, a diferencia de las placas ensayadas.

Clave	Densidad (Kg/m ³)	Absorción Total (% medio)	Dureza Superficial (Ø medio mm)	Carga de rotura a flexión (N)
PYL ST	744	31,87	16,33	332,50T / 706,67L

Tabla 7.2. Resultados de los ensayos PYL ST

7.3.2. Densidad

Se calcula la densidad de cada probeta dividiendo la masa (en kg) por el volumen (en m³) obtenido a partir de las dimensiones medias de las probetas. A la vista de los resultados mostrados en la Tabla 7.3., se



puede observar que la densidad va disminuyendo al introducir cualquiera de los residuos en la muestra.

Serie nº	Clave	Densidad (Kg/m ³)			
		0/0	1/0,5	1/1	1/2
Referencia	PYL RF	1415			
Serie I	PYL W		1297	1202	954
Serie II	PYL G		1350	1191	870
Serie III	PYL PA		1266	1209	1051
Serie IV	PYL GM		1305	1147	892

Tabla 7.3. Resultados de la determinación de la densidad de las Serie I, Serie II, Serie III y Serie IV

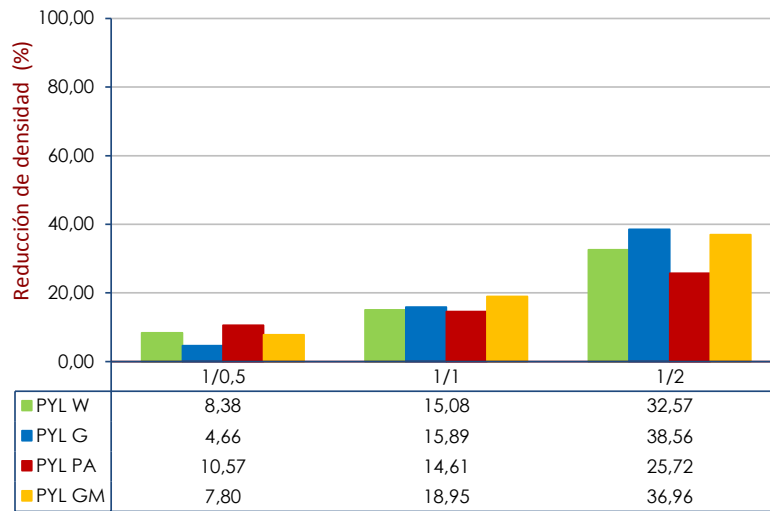
Una explicación a este efecto es que al ir incorporando residuo en sustitución del yeso, se introduce un material en la mezcla con una densidad real menor respecto a la matriz base (Tabla 7.4.).

Material	Densidad real (kg/m ³)
Yeso	2320
Espuma de poliuretano blanca (W)	1080
Espuma de poliuretano gris (G)	1220
Poliamida en polvo (PA)	1070
Mixto de poliuretano gris (GM)	1120

Tabla 7.4. Densidades de los materiales utilizados en la experimentación

Además, a medida que aumenta la cantidad de polímero se requiere una mayor cantidad de agua para que la mezcla sea trabajable, lo que implica un incremento de la porosidad del material que se traduce en una disminución de la densidad aparente.

La reducción de la densidad de las probetas ensayadas (Gráfica 7.1.), tomando la dosificación PYL RF como referencia, alcanza los siguientes valores: en la sustitución 1/0,5, ronda el 8-10% en todos los residuos, excepto en la espuma gris (PYL G) donde no llega al 5%; En la sustitución 1/1, alcanza un valor del 15%, superando con un 19% en el residuo gris mixto (PYL GM), y en la mayor dosificación 1/2 la reducción oscila entre un 25 y un 38%.



Gráfica 7.1. Reducción de la densidad (%)

7.3.3. Resistencia a flexión (expresada como carga de rotura a flexión)

En la determinación de la resistencia a flexión (carga de rotura a flexión), los resultados obtenidos en el ensayo se registran de forma individual y se calcula la carga de rotura a flexión como la media de los valores obtenidos, por dosificación y residuo (Tabla 7.5.).

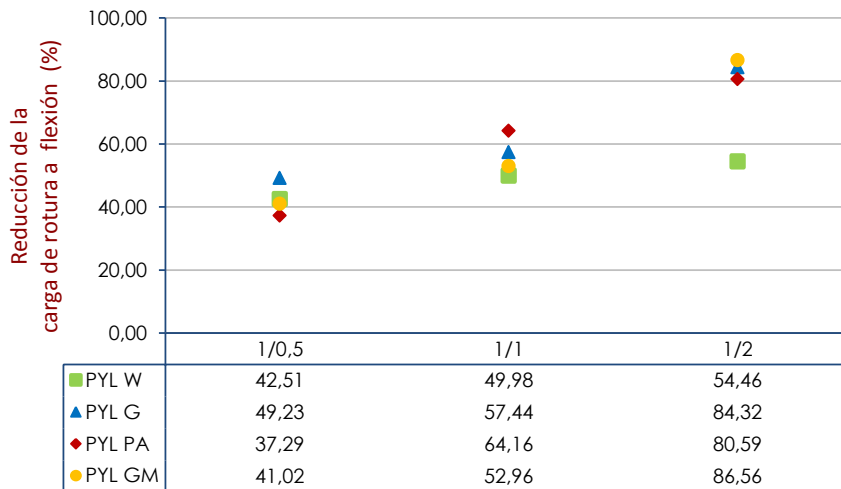
Resistencia a flexión					
(expresada como carga de rotura a flexión)					
(N)					
Serie nº	Clave	0/0	1/0,5	1/1	1/2
Referencia	PYL RF	446,47			
Serie I	PYL W		256,67	223,33	203,33
Serie II	PYL G		226,67	190,00	70,00
Serie III	PYL PA		280,00	160,00	86,67
Serie IV	PYL GM		263,33	210,00	60,00

Tabla 7.5. Resultados del ensayo de carga de rotura a flexión de las Serie I, Serie II, Serie III y Serie IV

A la vista de los resultados obtenidos se constata la disminución progresiva de la carga máxima de rotura a flexión a medida que aumenta la cantidad de residuo presente en la mezcla, efecto producido por la disminución de las densidades en las placas fabricadas.



Para poder comparar los resultados de este ensayo se cuantifican en porcentaje las reducciones de carga de rotura a flexión (Gráfica 7.2.).



Gráfica 7.2. Reducción de la carga de rotura a flexión (%)

Dentro de todas las series de residuos, los mejores resultados son los obtenidos en la familia de la espuma blanca (W), ya que son los que alcanzan las menores reducciones con valores del 42% (1/0,5), 50% (1/1), y 55%(1/2). En el resto de residuos se producen disminuciones que varían entre el 40% de la PA(1/0,5), y el 87% del GM(1/2).

Las probetas PYL RF y PYL W0,5 son las únicas que superan el valor de carga de rotura a flexión obtenido en la probeta de PYL ST (en sentido transversal) (Imagen 7.14.).

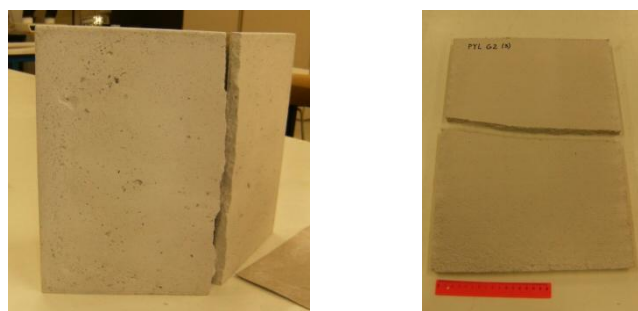


Imagen 7.14. Probetas del ensayo de carga de rotura a flexión

Como complemento a este ensayo, se han realizado roturas a flexión en las placas previamente utilizadas en el ensayo de absorción total una vez desecadas. Los resultados obtenidos (Tabla 7.6.) indican que



una rehidratación de las mismas en general, supone un aumento de la carga, destacando las placas de poliamida (PYL PA) donde la mejora ronda el 30% en todas las dosificaciones.

Serie nº	Clave	Carga de rotura a flexión (N)	Carga de rotura a flexión (N) Placas absorción total	Aumento de la carga (%)
Serie I	PYL W 0,5	356,67	403,33	13,08
	PYL W 1	223,33	246,67	10,45
	PYL W 2	203,33	165,00	-18,85
Serie II	PYL G 0,5	226,67	380,00	67,64
	PYL G 1	190,00	156,67	-17,54
	PYL G 2	70,00	80,00	14,29
Serie III	PYL PA 0,5	280,00	380,00	35,71
	PYL PA 1	160,00	210,00	31,25
	PYL PA 2	86,67	110,00	26,92
Serie IV	PYL GM 0,5	263,33	280,00	6,33
	PYL GM 1	210,00	223,33	6,35
	PYL GM 2	60,00	80,00	33,33

Tabla 7.6. Variación de la carga de rotura a flexión (%)

7.3.4. Capacidad de absorción total de agua

Como valor de absorción de agua se registra el porcentaje medio de aumento de masa de cada placa de yeso sumergida en agua. Cuanto mayor es el volumen de sustitución mayor es la absorción del material (Tabla 7.7.).

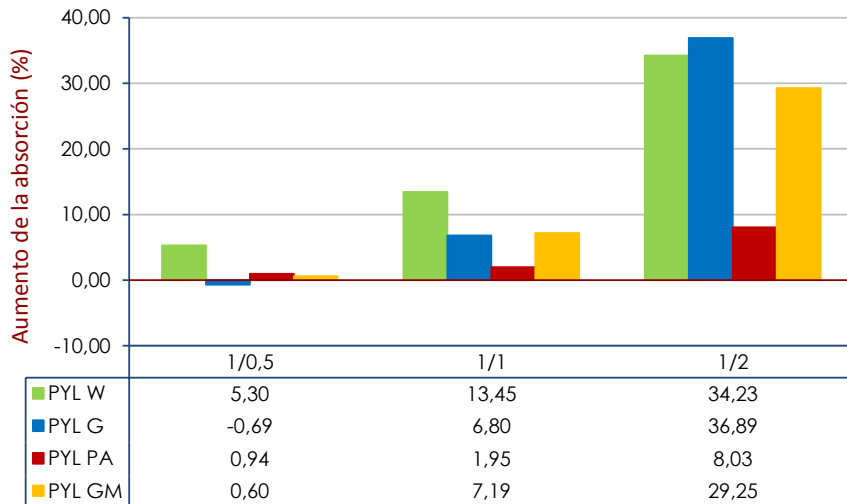
Serie nº	Clave	Absorción Total (% medio)			
		0/0	1/0,5	1/1	1/2
Referencia	PYL RF	27,36			
Serie I	PYL W		32,66	40,81	61,59
Serie II	PYL G		26,67	34,16	64,25
Serie III	PYL PA		28,30	29,31	35,39
Serie IV	PYL GM		27,96	34,55	56,61

Tabla 7.7. Resultados del ensayo de la capacidad de absorción total de las Serie I, Serie II, Serie III y Serie IV

Las sustituciones con poliamida (PYL PA) son las de menor absorción frente a la probeta de referencia (0,94%, 1,95% y 8,03%), situándose en el otro extremo las probetas con residuo de espuma de poliuretano blanco (PYL W), con valores del 5,3%, 13,45% y el 34,23%, siendo este



último valor únicamente superado por la relación 1/2 del residuo G (36,89%) (Gráfica 7.3.).



Gráfica 7.3. Aumento de la absorción frente a la probeta de referencia (%)

El incremento de residuo en la mezcla implica una menor densidad del material final, aumentando por tanto su porosidad. Este incremento en el número de huecos en la masa genera una mayor capacidad de absorción de la misma, por lo cual también aumenta la capacidad de retención de agua.

El valor de absorción de la PYL ST es mayor que los de la placa de referencia y las placas con sustituciones 1/0,5.

7.3.5. Dureza superficial

El análisis de la dureza superficial se basa en la determinación de la huella superficial causada por el impacto de una pequeña bola de acero dejada caer desde una altura fija sobre la placa (Imagen 7.15.).



Imagen 7.15. Probetas del ensayo de dureza superficial



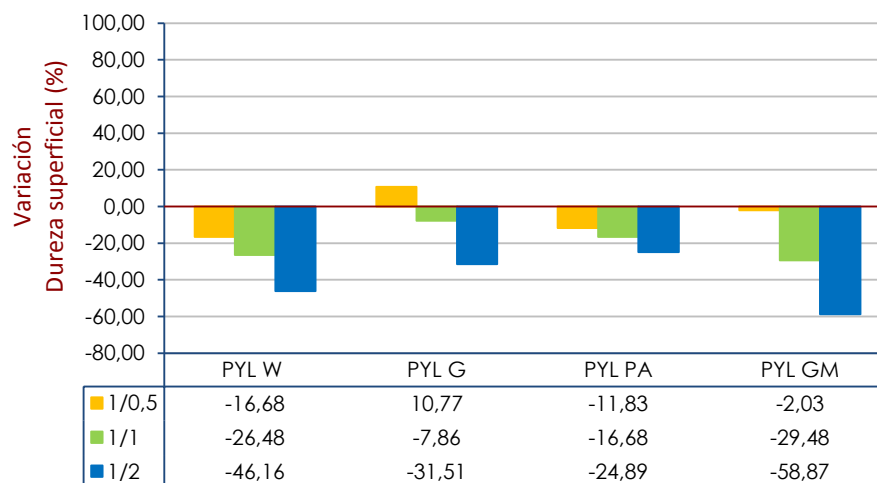
A la vista de los resultados mostrados la Tabla 7.8., se puede observar que el diámetro de huella superficial es mayor a medida que introducimos más cantidad de residuo en la mezcla.

Serie nº	Clave	Dureza Superficial (Ø medio mm)			
		0/0	1/0,5	1/1	1/2
Referencia	PYL RF	11,33			
Serie I	PYL W		13,22	14,33	16,56
Serie II	PYL G		10,11	12,22	14,90
Serie III	PYL PA		12,67	13,22	14,15
Serie IV	PYL GM		11,56	14,67	18,00

Tabla 7.8. Resultados del ensayo de dureza superficial de las Serie I, Serie II, Serie III y Serie IV

La disminución de la dureza superficial se debe a la naturaleza más elástica de los polímeros frente al yeso, que facilita que el impacto sea mayor, favoreciendo el aumento de la huella.

La Gráfica 7.4. presenta la variación en porcentaje de la dureza superficial de las placas ensayadas.

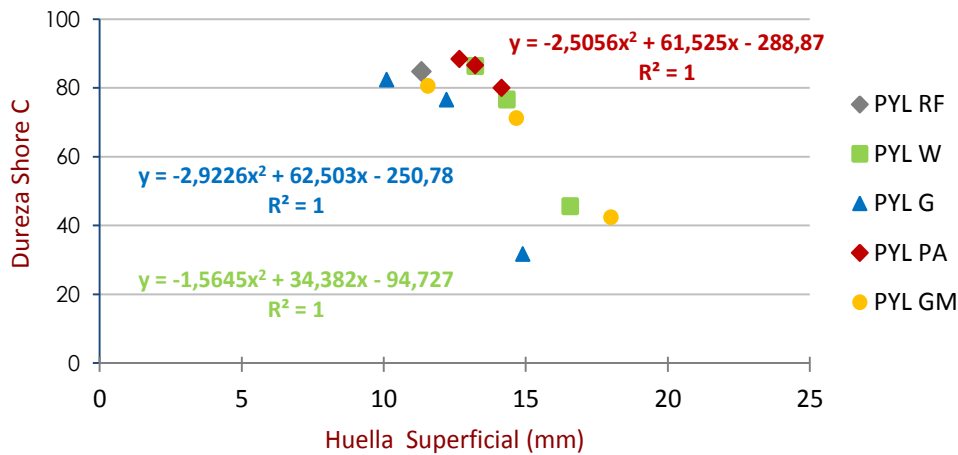


Gráfica 7.4. Variación de la dureza superficial (%)

La dureza superficial de las distintas dosificaciones disminuye de forma muy diversa. Si tomamos como ejemplo los resultados de las placas con residuo de poliuretano gris (G), se observa cómo las dosificaciones 0,5 y 1 obtienen los mejores resultados, siendo en la sustitución 2 donde se encuentra el peor dato.



Si se relaciona los valores obtenidos en el ensayo de dureza superficial de las placas con los resultados de dureza Shore C (a 7 días) en las mezclas, se ve como ambos parámetros son coherentes (Gráfica 7.5.).



Gráfica 7.5. Relación entre huella superficial (mm) y dureza Shore C

En cualquiera de los residuos se obtienen resultados similares, al disminuir la dureza Shore C de la mezcla, aumenta la huella superficial de la placa. La línea de tendencia de los residuos W, G y PA es similar.

La poliamida tiene mejor comportamiento que los poliuretanos al incrementarse el porcentaje de sustitución, siendo las reducciones de dureza Shore C respecto a la huella muy pequeñas. Esto puede deberse a la mayor finura del material, lo que aporta mejor distribución de las partículas de residuo en la matriz de la placa.

7.3.6. Microscopía electrónica de barrido (SEM)

Se muestran a continuación las imágenes obtenidas en el SEM de una de las dosificaciones que se han trabajado en las placas.

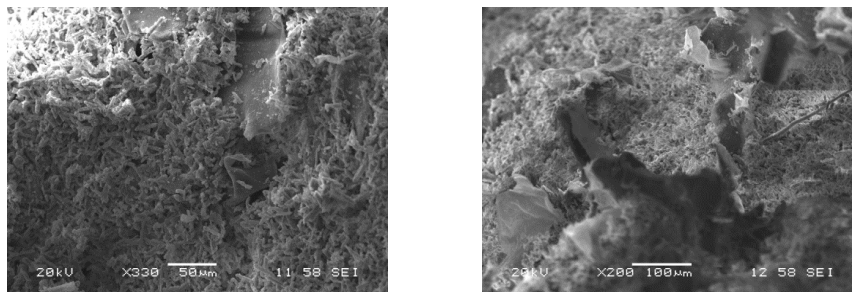


Imagen 7.16. SEM de la PYL GM 2



La Imagen 7.16. corresponde a la interfase de la muestra de PYL GM 2, donde se aprecia como las láminas de poliuretano rodean los cristales de yeso y las fibras del residuo, lo que se considera una buena cohesión entre partículas.

7.4. Caracterización térmica de las placas de yeso

Este apartado pretende dar respuesta al estudio de la capacidad de aislamiento térmico de las placas fabricadas, así como su comportamiento frente al fuego.

7.4.1. Resistencia térmica

Los datos de conductividad térmica de las mezclas se obtienen mediante el método de la placa caliente guardada y el método del medidor del flujo de calor (Apartado 6.3.1.).

Una vez conocida la conductividad térmica del material, es posible hallar la resistencia térmica del mismo a partir de la siguiente fórmula:

$$RT = \text{Espesor (m)} / \text{Conductividad térmica } (\lambda)$$

En la Tabla 7.9. se detallan los resultados de esta ecuación.

	Clave	Espesor (m)	Conductividad térmica (λ) (W/m ² *K)	RT (m ² ·K/W)
	PYL RF	0,015	0,3057	0,0491
	PYL W 0,5	0,015	0,3160	0,0475
Serie I	PYL W 1	0,015	0,2701	0,0555
	PYL W 2	0,015	0,1861	0,0806
	PYL G 0,5	0,015	0,2931	0,0512
Serie II	PYL G 1	0,015	0,2626	0,0571
	PYL G 2	0,015	0,1828	0,0821
	PYL PA 0,5	0,015	0,2624	0,0572
Serie III	PYL PA 1	0,015	0,2419	0,0620
	PYL PA 2	0,015	0,1902	0,0789

Tabla 7.9. Resultados resistencia térmica (RT)

Se ha comprobado como la incorporación de residuos poliméricos mejora la resistencia térmica de las placas de yeso y su capacidad aislante.



Si comparamos los resultados de las placas ensayadas con los de algunos materiales de construcción prefabricados tradicionales (Tabla 7.10.) podemos observar que en las sustituciones 1/2 y en cualquiera de los residuos, pueden alcanzarse los valores de referencia de la placa de yeso comercial.

Esto indica que los resultados obtenidos con estos nuevos materiales pueden asemejarse a los materiales usados tradicionalmente en la construcción de tabiquería, por lo que cumplirían, a priori, las exigencias térmicas del CTE.

Clave	Espesor (m)	Conductividad térmica (λ) (W/m·K)	RT ($m^2\cdot K/W$)
Placa de yeso laminado comercial	0,015	0,25	0,060
Hormigón celular prefabricado	0,015	0,23	0,065
Prefabricados de hormigón con arcilla expandida	0,015	0,22	0,068

Tabla 7.10. Resistencia térmica de materiales prefabricados tradicionales

7.4.2. Ensayo de reacción al fuego de productos. Ensayo de no combustibilidad

Este ensayo permite determinar, en unas condiciones concretas establecidas por norma, el comportamiento respecto a la no combustibilidad de las mezclas de yeso-polímero, dando una idea de la contribución al desarrollo del fuego del material. La Imagen 7.17. muestra el equipo utilizado en el ensayo.



Imagen 7.17. Equipo utilizado en el ensayo de reacción al fuego de productos

Estos resultados no constituyen el único criterio de valoración del riesgo potencial de incendio que puede conllevar el uso del producto,



pero a partir de ellos se puede extrapolar el comportamiento a una situación real.

Como condiciones de ensayo, cabe señalar que las muestras se acondicionan a una temperatura de 23 ± 2 °C, con humedad de $50 \pm 5\%$ y un tiempo de acondicionamiento de 144 horas, según la norma UNE-EN 13238:2011¹⁰². La Imagen 7.18. ilustra la fase del ensayo en el que las muestras son introducidas en el horno.

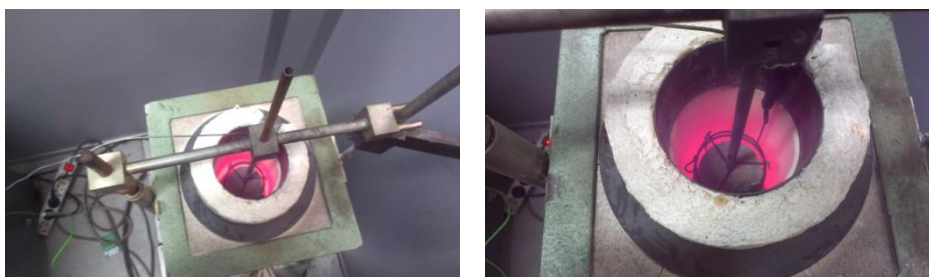


Imagen 7.18. Muestras dentro del horno de tubo

Las muestras ensayadas se identificarán como:

- **Muestra 1/1 W:** Yeso al 50% con residuo de espuma de poliuretano blanco (W) al 50%.
- **Muestra 1/1 PA:** Yeso al 50% con residuo de espuma de residuo de poliamida en polvo (PA) al 50%.

La Tabla 7.11. detalla los resultados obtenidos en el ensayo.

	Muestra		
	1/1 W	1/1 PA	
Incremento Temperatura Horno (°C)	0,6	--	
Persistencia de la inflamación (s)	<5	151,0	
Pérdida de masa (%)	26,1	--	

Tabla 7.11. Resultados ensayo de reacción al fuego de productos

Para realizar este ensayo, se elige la espuma de poliuretano blanca porque es el residuo de poliuretano que mejores resultados globales

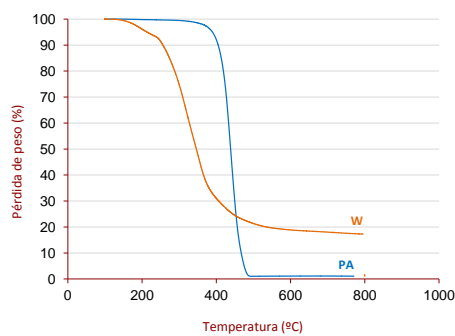
¹⁰² UNE-EN 13238:2011. Ensayos de reacción al fuego para productos de construcción. Procedimiento de acondicionamiento y reglas generales para la selección de sustratos.



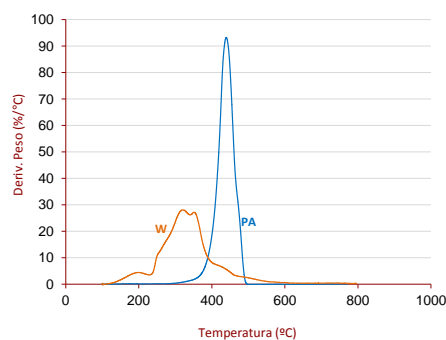
obtiene en los ensayos de caracterización y la poliamida por ser un residuo distinto.

La muestra (1/1 W) presenta un tiempo de inflamación menor de 20 segundos, con un incremento de temperatura en el horno por debajo de 50 °C y una pérdida de masa menor de un 50%. Estos resultados indican, teniendo sólo en cuenta la contribución al desarrollo del fuego del material, que la composición ensayada corresponde a la Euroclase A2 [No combustible. Sin contribución, grado medio] de acuerdo con la clasificación establecida en la UNE-EN 13501-1:2007+A1:2010¹⁰³.

Los resultados de la muestra (1/1 PA), indican un comportamiento del material frente al fuego no adecuado, ya que la probeta arde a los 151 segundos, alcanzando una temperatura de 987,6 °C. Este efecto puede explicarse a partir de los resultados del TGA y de la temperatura onset de los diferentes residuos poliméricos (Gráfica 7.6. - 7.7. y Tabla 7.12.).



Gráfica 7.6. TGA



Gráfica 7.7. Tonset

Residuo	Tª evaporación		Tª descomposición		
	Pérdida de masa (%)	Temperatura (°C)	Pérdida de masa (%)	Tonset (°C)	Residuo (%)
PA	10	405,0	88,9	410,4	1,1
W	10	256,1	72,6	335,0	17,4

Tabla 7.12. Resultados ensayo de reacción al fuego de productos

La pérdida de un 10% de masa se registra a una temperatura inferior a los 300 °C en el caso del poliuretano blanco (W) y alrededor de los

¹⁰³ UNE-EN 13501-1:2007+A1:2010. Clasificación en función del comportamiento frente al fuego de los productos de construcción y elementos para la edificación. Parte 1: Clasificación a partir de datos obtenidos en ensayos de reacción al fuego.



400°C en la poliamida (PA), esta pérdida se debe a la evaporación del agua presente en el material.

La descomposición total de la muestra de poliamida se produce a una temperatura de 410°C, con una pérdida de masa del 72,6%. En este caso el ensayo de no combustibilidad no es suficiente para clasificar la muestra (1/1 PA). Para poder confirmar la Euroclase de este material es necesario evaluar la muestra según la UNE-EN ISO 1716:2011¹⁰⁴ para determinar el valor calorífico de acuerdo a la UNE-EN 13501-1:2007+A1:2010 y la UNE-EN 13823:2012¹⁰⁵.

Con las imágenes del SEM de la muestra 1/1 PA se comprueba el grado de descomposición de las partículas de poliamida y yeso (Imagen 7.19.).

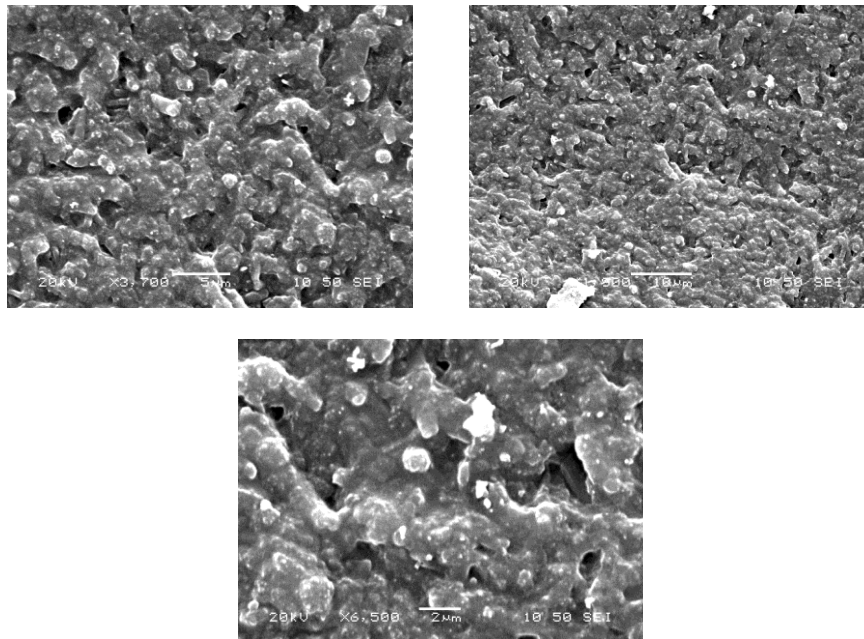


Imagen 7.19. SEM de la muestra 1/1 PA

¹⁰⁴ UNE-EN ISO 1716:2011. Ensayos de reacción al fuego de productos. Determinación del calor bruto de combustión (valor calorífico). (ISO 1716:2010)

¹⁰⁵ UNE-EN 13823:2012. Ensayos de reacción al fuego de productos de construcción. Productos de construcción, excluyendo revestimientos de suelos, expuestos al ataque térmico provocado por un único objeto ardiendo.



7.5. Conclusiones

La densidad de las placas disminuye al introducir residuo en la mezcla, esto ocurre con cualquiera de los residuos. El motivo es la sustitución de parte de la matriz base de las placas (yeso) por otro material con una densidad real menor. Otro efecto de esta sustitución es el incremento de la cantidad de agua necesaria para trabajar las mezclas y el aumento de la porosidad en las placas. La probeta PYL G2 presenta la mayor reducción de densidad.

La resistencia a flexión (expresada como carga de rotura a flexión) de las placas merma a medida que aumenta la cantidad de residuo en el material. Los mejores resultados a este ensayo los presenta el residuo de espuma de poliuretano blanco (W).

Reducir la densidad provoca aumentar la porosidad, esto afecta a la capacidad de absorción de las placas, que se incrementa progresivamente. Las placas de poliamida (PYL PA) son las que menores valores obtienen, estando las de espuma de poliuretano blanco (PYL W) en el otro extremo.

La dureza superficial de las placas mengua a mayores sustituciones, debido a la naturaleza más elástica de los poliuretanos. Los resultados de este ensayo en las placas con residuos de poliuretano (W, G, GM) son peores que con el residuo de poliamida.

La capacidad aislante de los materiales evaluados por sus resistencias térmicas presentan sus mejores resultados en la sustitución 1/2 del residuo de poliuretano gris (G). Las placas que incorporan dosificaciones 1/1 de poliuretano en su masa, presentan mejor resistencia al fuego según los resultados del ensayo de reacción al fuego de productos. La muestra no presenta propiedades inflamables. Su uso como revestimiento interior podría considerarse adecuado conforme el CTE-DB-SI¹⁰⁶. En el caso de la poliamida es necesario realizar más ensayos para confirmar su Euroclase.

¹⁰⁶ Código Técnico de la Edificación. DB – SI: "Seguridad en caso de incendio".

Capítulo 8.

Refuerzos con fibras



A partir de la experimentación realizada hasta el momento, se ha constatado un aumento de la porosidad y una disminución de la densidad del producto final, lo que implica una reducción de las propiedades mecánicas de los materiales ensayados al incluir agregados de baja densidad, hecho que ya ha sido confirmado en otros trabajos¹⁰⁷. La inclusión de fibras puede suponer una mejora de estas propiedades mecánicas.

8.1. Yesos con fibras. Estado del arte

La baja resistencia del yeso frente a los esfuerzos mecánicos (flexión – compresión) obliga a buscar el modo de mejorar este comportamiento, más aún cuando se introducen elementos aligerantes en su matriz. El estudio del uso de fibras (de diversa naturaleza) en las mezclas de yeso es usual desde hace décadas¹⁰⁸, para tratar de mejorar sus propiedades mecánicas y su resistencia al impacto. No obstante, además del tipo de fibra agregada, hay que tener en cuenta la longitud de la misma, la cantidad que se añade a la matriz, su orientación y dispersión en la mezcla, etc., ya que todos estos factores influyen en el producto final.

8.1.1. Fibras de origen natural

Se ha demostrado la capacidad de las **fibras de cáñamo y lino** de aumentar ligeramente los valores de resistencia a flexión del yeso¹⁰⁹, incluso con pequeñas proporciones de adición. Con las fibras de cáñamo se duplica el tiempo de fraguado frente a las mezclas sin fibras, reduciéndose este tiempo si las fibras son tratadas químicamente.

El estudio del uso de la **fibra de sisal** pretende proporcionar un refuerzo de menores costes que las fibras artificiales, permitiéndonos así su aplicación en viviendas en países en vías de desarrollo, donde el yeso y la escayola tienen un menor coste que el cemento. El sisal es una fibra que se extrae de la agave sisalana, planta muy extendida en América Latina, África y los países mediterráneos. Hay trabajos que confirman el incremento de la tenacidad en la flexotracción y la capacidad de absorción de energía en los ensayos de impacto, en función del

¹⁰⁷ Coquard, P., Boistelle, R., Amathieu, L., Barriac, P. (1994). «Hardness, elasticity modulus and flexion strength of dry set plaster». *Journal of Material Sciences*. Vol. 29, 4611-4617.

¹⁰⁸ Ali, M.A., Grimer, F.J. (1969). «Mechanical properties of glass fibre reinforced gypsum». *Journal of Material Science*. Vol. 4, No. 5, 389-395.

¹⁰⁹ Dalmay, P., Smith, A., Chotard, T., Sahay-Yurner, P., Gloaguen, V., Knausz, P.. (2010) «Properties of cellulosic fibre reinforced plaster: influence of hemp or flax fibres on the properties of set gypsum». *J Mater Sci* 45:793-803.



aumento de la cantidad y de la longitud de las fibras¹¹⁰. Se consideran proporciones de fibra del 2% del peso de la matriz de yeso, con longitudes de fibra de 40 mm, obteniéndose un crecimiento de la tenacidad del orden del 60% respecto a la matriz base (sin fibras). Esto se debe a la elevada adherencia entre la fibra de sisal y la matriz de yeso.

Las placas de escayola/yeso con adiciones de **fibras de Typha Latifolia** (comúnmente conocida como enea) y dispersión de melamina formaldehído, presentan reducciones de peso proporcional a la adición de fibras, aumentos en la tensión de rotura a flexión, pero produce disminuciones en las resistencias mecánicas a compresión^{111,112}.

La invención de un panel ligero a base de yeso con **cáscaras y fibras de coco** supone el aprovechamiento de un residuo renovable y abundante en las zonas de producción del mismo¹¹³. Presenta un peso menor que los paneles convencionales, y se mantiene dentro de los parámetros de resistencia estructural, resistencia al fuego, y aislamiento térmico y acústico.

Las placas de yeso reforzados con **fibra de celulosa**^{114,115} presentan una alta resistencia a la cizalla, su comportamiento cuasiplástico y alta deformabilidad, sugiere un buen comportamiento en estructuras realizadas en zonas con riesgo sísmico.

¹¹⁰ De Oteiza San José, I. (1993). «Estudio del comportamiento de la escayola reforzada con fibras de sisal, para componentes en viviendas de bajo coste». Informes de la Construcción. Vol. 45, nº425-426.

¹¹¹ García Santos, A. (2004). «Aplicaciones constructivas de un material compuesto de escayola y fibras naturales de Typha Latifolia». Materiales de Construcción Vol.54 nº 273, 73 - 77.

¹¹² García Santos, A. Patente: Placas de escayola o yeso para su uso en construcción. (2004). Nº de publicación: ES 2 199 680 A1.

¹¹³ Faus, A., González, L., Franch, V., Martínez, R., Yuste, J., Sabater, J.V., Tarazona, D. Patente: Panel ligero de yeso y coco, y procedimiento de fabricación. (2012). Nº de publicación: ES 2 385 587 A1.

¹¹⁴ Reinhardt, H-W. Aicher, S. (2008). «Cellulose fiber gypsum boards and wall panels under cyclic loading». American Concrete Institute (ACI) Spring Convention. Los Angeles. United States.

¹¹⁵ Reinhardt, H-W., Finn, R., Aicher, S. (2006). «Static and dynamic response of cellulose fibergypsum-board wall elements». 8th International Symposium on Brittle Matrix Composites (BMC), Warsaw, Poland.



8.1.2. Fibras artificiales

Se comercializan dos tipos de fibras artificiales: de origen inorgánico (de vidrio, cerámicas, metálicas, mixtas (cerámica+metal)) y de origen orgánico (poliméricas, de aramida, de carbono). Atendiendo al coste y a los beneficios que el uso de estas fibras pueden aportar, las fibras poliméricas y las fibras de vidrio son las más convenientes para utilizarlas en una matriz de yeso/escayola.

Respecto a las **fibras de vidrio** hay investigaciones que certifican la capacidad que tienen estas fibras para elevar las resistencias mecánicas y la dureza superficial del material^{116,117}. Al igual que con las fibras de sisal, se consiguen mejores resultados al aumentar la cantidad de adición (%) y la longitud de las fibras, además de ser necesaria una buena dispersión de estas en la masa^{118,119}. Se han encontrado mejoras sustanciales en los resultados de los ensayos de flexión con dosificaciones de un 2% de fibras sobre el peso de la matriz con fibras de 25 mm, asegurando la trabajabilidad de la mezcla. En sus comienzos se planteó la idea de utilizarlo junto con el yeso para disminuir el uso de paneles de madera¹²⁰.

Además este tipo de fibra es capaz de incrementar la integridad de la placa de yeso, fundamental en caso de incendio¹²¹, contribuyendo en zonas de riesgo sísmico a las resistencias horizontales de la estructura de hormigón¹²².

¹¹⁶ Del Río Merino, M., Comino, P. (2002). «Análisis de los refuerzos mixtos de fibras de vidrio E y fibras AR en la escayola, como alternativa a los refuerzos monofibras (homogéneos)». *Materiales de Construcción* Vol.52, nº268.

¹¹⁷ Del Río Merino, M., Hernández Olivares, F., Comino Almenara, P. (2004). «Estado del arte sobre el comportamiento físico-mecánico de la escayola reforzada con fibras de vidrio E». *Informes de la Construcción* Vol.56, nº493.

¹¹⁸ Del Río Merino, M., Comino, P. (2001). «Influencia del grado de dispersabilidad de la fibra de vidrio E en el comportamiento mecánico y la trabajabilidad de la escayola». *Materiales de Construcción* Vol.51, nº261.

¹¹⁹ Singh, M., Garg, M. (1991). «Glass Fibre Reinforced Water-Resistant Gypsum- Based Composites». *Cement and Concrete Composites*, nº14, 23-32.

¹²⁰ Singh, M., Garg, M. (1994). «Gypsum-based fibre-reinforced composites: an alternative to timber». *Construction and building materials*, Vol.8, nº3, 155-160.

¹²¹ Evans, T.J., Majumdar A.J., Ryder, J.F. (1981) «A semi-dry method for the production of lightweight glass-fibre-reinforced gypsum». *The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, Vol. 3, Number 1, 41-44.

¹²² Yue, J.-W., Jiang, X.-L., Gu, Y. (2006). «Mechanical behavior of glass fiber reinforced gypsum panels». *Journal of Xi'an University of Architecture and Technology*. Vol. 38, Issue 5, 639-645.



En las mezclas de yeso con **fibras poliméricas**¹²³ (fibra acrílica: poliacrilonitrilo, fibra de poliéster, polietilentereftalato de etilo, fibra de polipropileno^{124,125}, fibra de poliamida¹²⁶) aumenta la capacidad de deformación del material, al igual que los valores de resistencia mecánica ante tensiones de flexotracción y compresión, con ausencia de rotura frágil.

Con fibras de poliamida recuperadas de neumáticos triturados los valores de resistencia a flexión y compresión disminuyen¹²⁷. Esto parece deberse a la fibra utilizada, ya que en la superficie de las mismas se detectan restos de caucho de neumático, lo cual impide la correcta adherencia a la matriz de yeso.

A la vista de la bibliografía analizada, y dado que otros autores ya han constatado las mejoras en los resultados de las resistencias mecánicas, se decide emplear fibras de polipropileno de 6 mm y 12 mm de longitud con diámetro de 30 μm , en proporciones de 2%, 4% y 6%.

¹²³ García Santos, A. (1988). «Comportamiento mecánico de yeso reforzado con polímeros sintéticos». Informes de la Construcción Vol.40 n° 397.

¹²⁴ Eve, S., Gomina, M., Orange, G. (2004). «Effects of polyamide and polypropylene fibres on the setting and the mechanical properties of plaster». Key Engineering Materials , Vol. 264-268, 2531-2536.

¹²⁵ Deng, YH., Furuno, T. (2001) «Properties of gypsum particleboard reinforced with polypropylene fibers». J Wood Sci 47:445-450.

¹²⁶ Eve, S., Gomina, M., Hamel, J., Orange, G. (2006). «Investigation of the setting of polyamide fibre/latex-filled plaster composites». J Eur Ceram Soc, 26, 2541-2546.

¹²⁷ Parres, F., Crespo Amorós, J.E., Nadal-Gisbert, A. (2009). « Mechanical properties analysis of plaster reinforced with fiber and microfiber obtained from shredded tires». Construction and Building Materials n°23, 3182 - 3188.



8.2. Fabricación y caracterización de placas de yeso laminado reforzadas con fibras

Se pretende mejorar las prestaciones de las placas de yeso laminado fabricadas con residuos, añadiendo fibras a su matriz. Tras revisar los datos obtenidos en los ensayos de placas detallados en el “Capítulo 7. Fabricación y caracterización de placas de yeso laminado”, se observa cómo se alcanzan los mejores resultados en aquellas piezas fabricadas con residuo de espuma de poliuretano blanco (W). Por este motivo se selecciona esta familia de mezclas para evaluar el efecto de las fibras en sus propiedades.

Las fibras elegidas para el ensayo son fibras artificiales de origen polimérico:

- **F1:** Fibras de polipropileno (SikaCim®).
- **F2:** Fibras de polipropileno (Paviland®).

El refuerzo de las placas de yeso, mediante el uso de fibras, se realiza en la fase de amasado. La cantidad de fibras que se añade se calcula sobre el peso del yeso. Antes de agregar la mezcla (yeso+residuo) al agua depositada en el vaso de la amasadora, las fibras deben añadirse al agua y distribuirse de manera uniforme en ella (Imagen 8.1.) .El resto del proceso de fabricación es similar al de las placas sin refuerzos.



Imagen 8.1. Fibras agregadas al agua de amasar

Se mantienen las mismas relaciones agua/(yeso+residuo) utilizadas en los ensayos anteriores (Tabla 8.1.), con el objetivo de analizar el efecto de las fibras en la composición final, sin variar ningún otro parámetro.

Serie nº	Clave	Relación Agua / (Yeso + Residuo)
Referencia	PYL RF	0,47
	PYL W 0,5	0,52
Serie I	PYL W 1	0,60
	PYL W 2	0,82

Tabla 8.1. Dosificaciones utilizadas en la fabricación de placas con fibras



La idea es analizar las tres dosificaciones (0,5, 1 y 2) con concentraciones de fibras al 2%, 4% y 6%. Como el número de combinaciones es alto, se plantea realizar un tanteo para ver cuál de las dos fibras puede dar lugar a mejores resultados.

Se preparan unas series de placas con las dosificaciones: PYL W 1, PYL W 1 (F1) 2% y PYL W 1 (F2) 2%, y se realizan los ensayos señalados en la Norma UNE-EN 520:2005+A1 para placas de yeso laminado (densidad, resistencia a flexión (expresada como carga de rotura a flexión), absorción y dureza superficial) (Tabla 8.2.).

	Densidad (Kg/m ³)	Carga de rotura a flexión (N)	Absorción Total (% medio)	Dureza Superficial (Ø medio mm)
PYL W 1	1202	223,33	40,81	14,33
PYL W 1 (F1) 2%	1189	240,00	31,54	13,34
PYL W 1 (F2) 2%	1205	266,67	32,03	12,89

Tabla 8.2. Resultados del tanteo

Los valores de densidad son similares en las tres muestras. En la carga de rotura a flexión se obtienen mejoras con ambas fibras, de un 8% con la fibra F1 y de un 19% con la fibra F2, respecto a la probeta sin fibras (PYL W1). La capacidad de absorción se reduce alrededor de un 22% con ambas fibras. La dureza del material aumenta, ya que el diámetro de huella se ve reducido, un 7% con la fibra F1 y un 10% con la fibra F2, si comparamos con la dosificación PYL W1.

A la vista de estos resultados y de la bibliografía estudiada en el Apartado 8.1.2., se decide realizar el refuerzo de las placas con la fibra F2 (Paviland®), ya que a priori estas fibras aportan mejores resultados. En la Tabla 8.3. se detallan las dosificaciones experimentadas.

	(F2) 0%		(F2) 2%		(F2) 4%		(F2) 6%	
PYL RF	PYL RF	(F2) 0%	PYL RF	(F2) 2%	PYL RF	(F2) 4%	----	
PYL W 0,5	PYL W 0,5	(F2) 0%	PYL W 0,5	(F2) 2%	PYL W 0,5	(F2) 4%	----	
PYL W 1	PYL W 1	(F2) 0%	PYL W 1	(F2) 2%	PYL W 1	(F2) 4%	PYL W 1	(F2) 6%
PYL W 2	PYL W 2	(F2) 0%	PYL W 2	(F2) 2%	PYL W 2	(F2) 4%	PYL W 2	(F2) 6%

Tabla 8.3. Mezclas experimentadas con las fibras F2 (Paviland®)

En las mezclas con porcentajes de fibras al 6% la consistencia de la masa en las dosificaciones RF y W0,5 es muy seca lo que impide su fabricación. Sin embargo, en las sustituciones W1 y W2, el hecho de



tener más poliuretano en la mezcla origina una necesidad mayor de agua de amasado, posibilitando de esta forma su fabricación.

Se incluyen los datos de los ensayos de placas con espuma de poliuretano blanco sin fibras para comprobar si estas aportan alguna mejora.

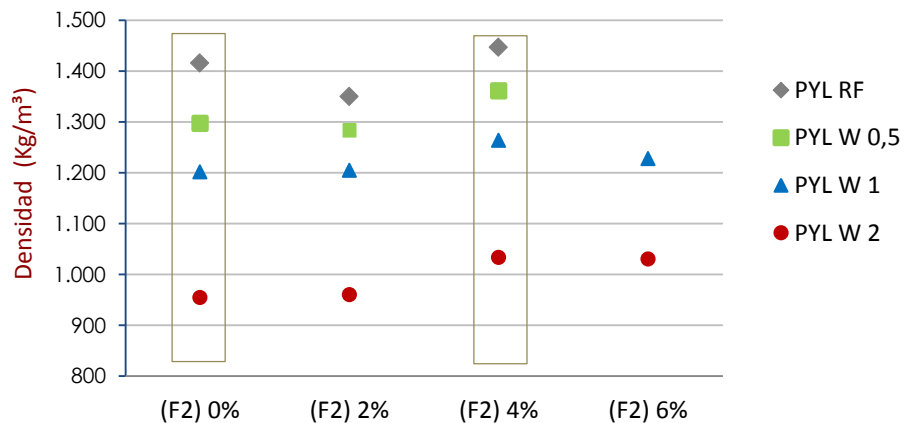
8.2.1. Densidad

En la Tabla 8.4. se presentan los resultados obtenidos en el ensayo de densidad de las placas fabricadas.

	Densidad (Kg/m ³)			
	(F2) 0%	(F2) 2%	(F2) 4%	(F2) 6%
PYL RF	1416	1350	1447	---
PYL W 0,5	1297	1283	1361	---
PYL W 1	1202	1205	1264	1228
PYL W 2	954	960	1033	1030

Tabla 8.4. Resultados de la densidad (Kg/m³)

Si se comparan los datos obtenidos dentro de la misma dosificación, puede verse que al incluir fibras al 2% las placas ven reducida su densidad en las dosificaciones RF y 0,5 con valores que no alcanzan el 5%, aumentando ligeramente en las proporciones 1 y 2 (menos de un 1%), lo que quizás pueda deberse a algún error en la fabricación (Gráfica 8.1.).



Gráfica 8.1. Densidad (Kg/m³)

Por el contrario, en la dosificación al 4%, todas las mezclas aumentan su densidad, incrementos que varían un 2% en el caso de la PYL RF, un 5% en PYL W 0,5 - PYL W 1 y un 8% en la PYL W 2, respecto a las placas con dosificaciones de fibras al 0%.



En la dosificación al 6% hay aumento de densidad que no supera el 3%, siempre confrontando los datos con la serie sin fibras.

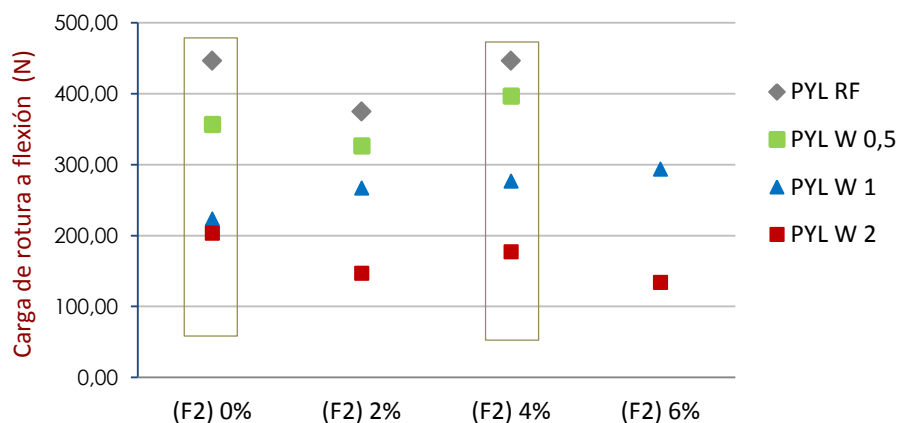
8.2.2. Resistencia a flexión (expresada como carga de rotura a flexión)

La carga de rotura a flexión de las placas de yeso laminado con fibras se ensaya a 7 días acorde a la normativa aplicable, se presentan los datos obtenidos en la Tabla 8.5. y se representan en la Gráfica 8.2.. A partir de estos resultados se puede estimar el comportamiento en las resistencias de las placas a medida que se introducen distintos porcentajes de fibras.

Resistencia a flexión (expresada como carga de rotura a flexión) (N)				
	(F2) 0%	(F2) 2%	(F2) 4%	(F2) 6%
PYL RF	446,47	375,00	446,67	---
PYL W 0,5	356,67	326,27	396,67	---
PYL W 1	223,33	266,67	276,67	293,33
PYL W 2	203,33	146,67	176,67	133,67

Tabla 8.5. Resultados de la carga de rotura a flexión (N)

La presencia de fibras al 2% no mejora en general las prestaciones de las placas respecto a las placas sin fibras, excepto en la mezcla W1, donde la carga de rotura a flexión se incrementa un 19%, pasando de 223,33 N a 266,67 N.



Gráfica 8.2. Carga de rotura a flexión) (N)

Es necesaria la presencia de un 4% de fibras para elevar las cargas de rotura a flexión, en la dosificación de RF el incremento no es significativo, la dosificación W0,5 sube un 11%, un 24% la W1 y un 13% la



W2. La necesidad de esta cantidad de fibra en las mezclas para conseguir mejoras mecánicas, se encuentra avalada en trabajos de otros autores¹²⁸.

Para el caso del 6% no se cuenta con datos suficientes para poder establecer una pauta de comportamiento.

8.2.3. Capacidad de absorción total de agua

Los resultados del ensayo de capacidad de absorción total de las placas se detallan en la Tabla 8.6.

	Absorción Total (% medio)			
	(F2) 0%	(F2) 2%	(F2) 4%	(F2) 6%
PYL RF	27,36	21,15	21,41	---
PYL W 0,5	32,66	25,59	26,00	---
PYL W 1	40,81	32,03	32,91	34,03
PYL W 2	61,59	51,31	50,91	51,21

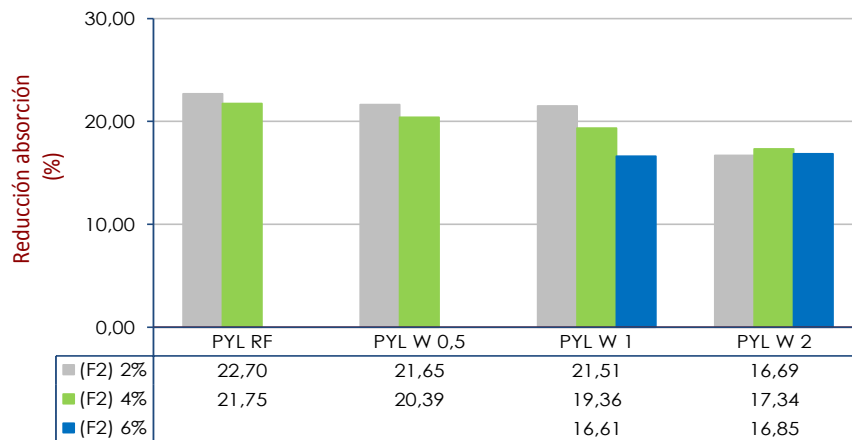
Tabla 8.6. Resultados capacidad de absorción total (% medio)

La capacidad de absorción de las placas se ve reducida al introducir fibras en la masa, no siendo significativo el porcentaje de las mismas en esta reducción. Por ejemplo, en la dosificación W0,5 con fibras al 2% el porcentaje de absorción es de un 25,59% muy similar al 26% de la PYL W0,5 (F2)4%, pero es menor al de la dosificación de referencia PYL W0,5 (F2) 0%.

Si se calcula en porcentaje (%) la reducción de la absorción por dosificaciones (Gráfica 8.3.), se advierte que tanto para la familia de probetas de referencia RF como para las mezclas W0,5 y W1, la reducción de la absorción ronda el 20%, en porcentajes de fibra al 2% y al 4%.

En las mezclas W2 para cualquier concentración de fibra, la absorción disminuye algo menos, en torno a un 17%.

¹²⁸ Gencela, O., del Coz Diaz, J.J., Sutuc, M., Koksald, F.T., Alvarez Rabanalb, F.P., Martinez-Barrerae, G., Brostowf, W. (2014). «Properties of gypsum composites containing vermiculite and polypropylene fibers: Numerical and experimental results». Energy and Buildings Volume 70, 135–144.



Gráfica 8.3. Reducción de la capacidad de absorción (%)

Esta reducción en la capacidad de absorción total se explica por las características hidrofóbicas de las fibras de polipropileno, que no absorben agua ^{129,130}.

8.2.4. Dureza superficial

La presencia de fibras en las mezclas supone en general un aumento de la dureza superficial de las placas, lo que significa que el diámetro de huella se ve reducido. Los resultados de las familias RF, W0,5 y W1 mejoran a medida que se introducen mayores porcentajes de fibras (Tabla 8.7. y Gráfica 8.4.). Otros autores han constatado este hecho de la misma forma¹³¹.

	Dureza Superficial (Ø medio mm)			
	(F2) 0%	(F2) 2%	(F2) 4%	(F2) 6%
PYL RF	11,33	9,83	9,44	---
PYL W 0,5	13,22	11,00	10,89	---
PYL W 1	14,33	12,89	12,44	11,22
PYL W 2	16,56	18,11	16,44	15,44

Tabla 8.7. Resultados dureza superficial (Ø medio mm)

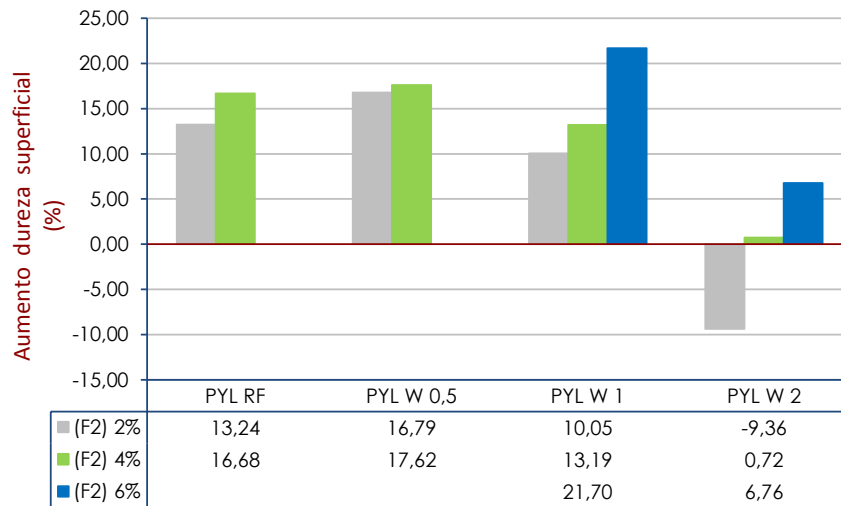
¹²⁹ Eve, S., Gomina, M., Hamel, J., Orange, G. (2006). «Investigation of the setting of polyamide fibre/latex-filled plaster composites». Journal for European Ceramic Society, 26, 2541-2546.

¹³⁰ Aulia, T. B.. (2002) «Effects of polypropylene fibres on the properties of high strength concretes». Lacer Vol. 7, pp. 43-59.

¹³¹ Aghazadeh, J., Sanghalehb, A., Nazaric, A., Pourjavada, N. (2011). « Analytical modeling of strength in randomly oriented PP and PPTA short fiber reinforced gypsum composites ». Computational Materials Science Volume 50, Issue 5, Pages 1619–1624.



Únicamente en de la familia W2 con fibras en un 2% esta tendencia se rompe, ya que disminuye la dureza, mejorando con porcentajes del 4 y 6%. En esta dosificación la presencia de residuo es muy alta, factor determinante en este ensayo, debida a la naturaleza más blanda del poliuretano respecto al yeso.



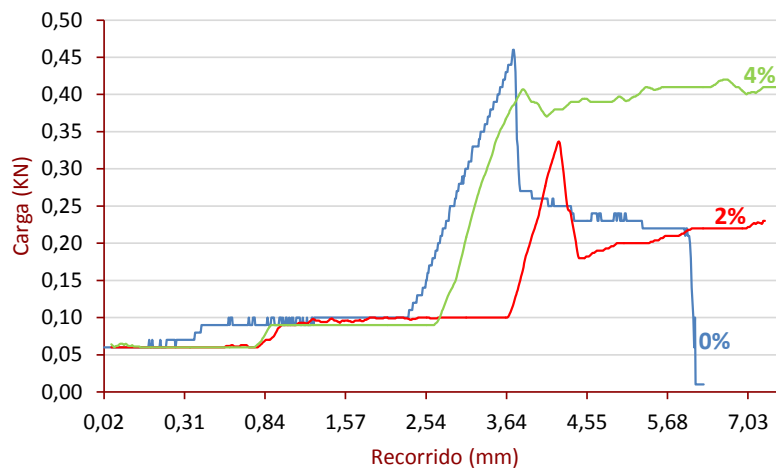
Gráfica 8.4. Aumento de la dureza superficial (%)



8.2.5. Relación recorrido-carga y relación con la interfase a nivel microscópico

El ensayo de resistencia a flexión (expresada como carga de rotura a flexión) determina la carga máxima que una placa es capaz de soportar, y proporciona datos de recorrido y tiempo. A partir de los resultados de los ensayos de placas con fibras, se presentan las siguientes gráficas, donde se relaciona la carga aplicada a la placa y el recorrido de la misma.

La Gráfica 8.5. indica la relación entre recorrido y carga de las PYL RF con porcentajes de fibra al 0%, 2% y 4%. No se dispone de datos con fibras al 6% ya que no se han podido fabricar por tener una consistencia muy seca.



Gráfica 8.5. Relación recorrido/carga PYL RF

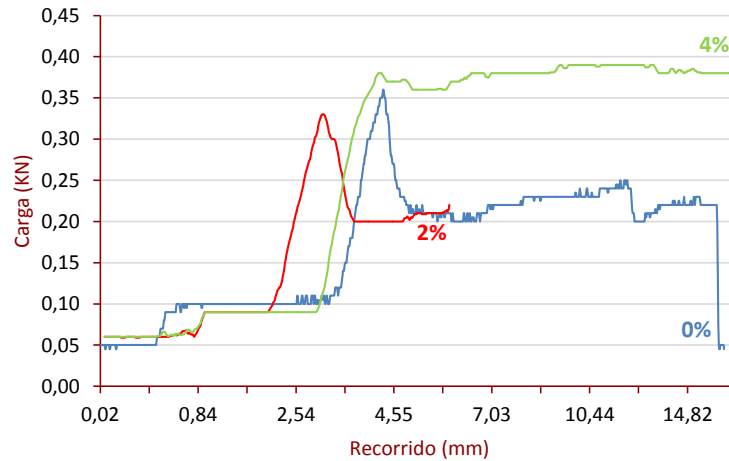
Las placas con 0% de fibras obtienen mejores resultados en cuanto a capacidad máxima de carga, pero el recorrido hasta llegar a este punto es menor que en las otras dosificaciones. En las placas con 2% de fibra la capacidad de carga se reduce de forma brusca al igual que en las placas sin fibras, aunque en este caso el recorrido es mayor.

En las dosificaciones al 4% el valor de la carga se mantiene durante el recorrido tras alcanzar su punto máximo, esto implica que la placa no llega a romper, lo cual nos indica una mejora en la flexibilidad de la placa^{132,133}.

¹³² Jarabo, R., Fuente, E., Monte M.C., et al. (2012). «Use of cellulose fibers from hemp core in fiber-cement production. Effect on flocculation, retention, drainage and product properties». Industrial Crops and Products Volume 39, Pages 89–96.



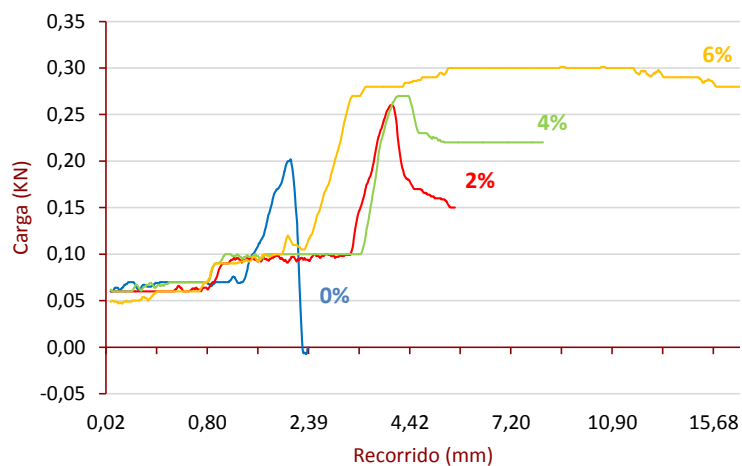
La Gráfica 8.6. presenta los resultados de las placas con residuo en la proporción 1/0,5 y con fibras al 0%, 2% y 4% en la mezcla. En este caso tampoco se dispone de datos con fibras al 6%.



Gráfica 8.6. Relación recorrido/carga PYL W0,5

Se observa una mejora sustancial en los resultados en la proporción de fibras al 4%, donde además de incrementarse el valor máximo de la carga, este se mantiene durante todo el recorrido. La introducción de proporciones de fibra al 2% no aporta mejoras al material.

En el caso de las PYL W1 se ha podido trabajar con todas las proporciones de fibras (Gráfica 8.7.).



Gráfica 8.7. Relación recorrido/carga PYL W1

¹³³ Alonso, A. Reyes, E., Gálvez, J.C. (2013). «Study of the cracking of sandwich panels of plasterboard and rockwool». *Materiales de Construcción* Vol. 63, 311, 403-421



Las placas con 0% de fibra rompe con un valor de carga cercano 0,20 KN, y a medida que se introduce fibra la carga aplicada antes de la rotura es mayor, 0,25 KN con fibras al 2% y 0,30 KN en el caso de fibras al 6%. Estas últimas además tienen esta carga sostenida en el tiempo.

Gracias a las imágenes del SEM de las PYL W1 (F2)4% (Imagen 8.2.), se puede apreciar una buena distribución de los cristales de yeso alrededor de las fibras y de las láminas de poliuretano, lo que indica una buena cohesión entre los tres materiales. Esta óptima cohesión implica mejores resultados en los ensayos de flexión.

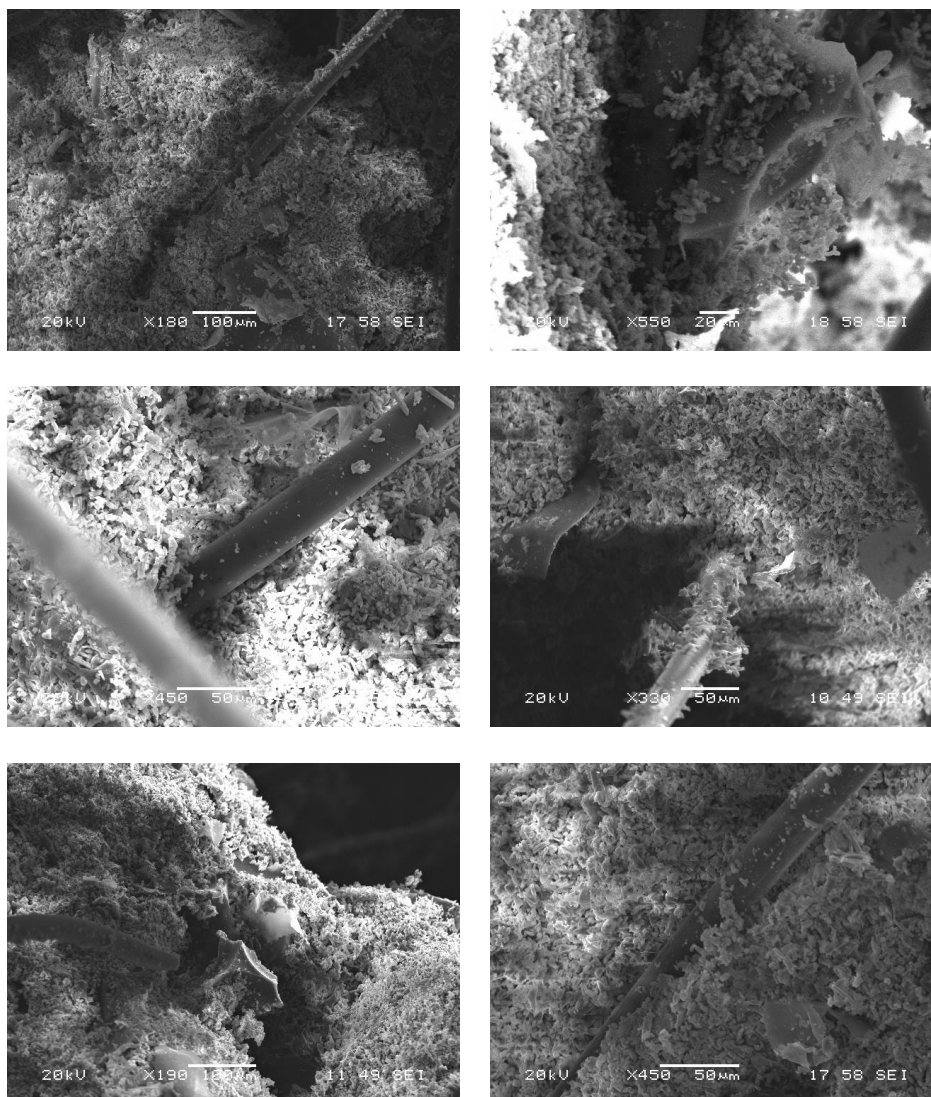
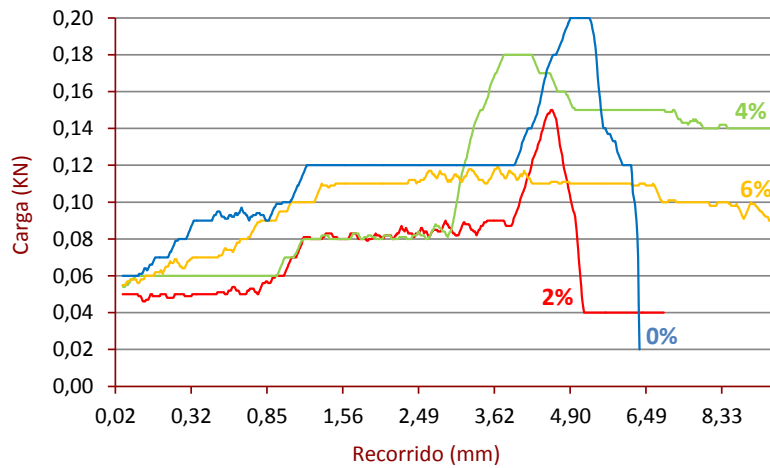


Imagen 8.2. SEM de las PYL W1 (F2) 4 %



La presencia de fibras en las dosificaciones PYL W2 no aporta mejoras en lo relativo a la carga máxima, las placas sin fibras tienen los valores más elevados (Gráfica 8.8.). Se observa un incremento del recorrido en las mezclas con fibras al 4% y 6%, por lo que en un principio la flexibilidad de estas placas es mayor, aunque no así su capacidad de carga máxima.



Gráfica 8.8. Relación recorrido/carga PYL W2

En la Imagen 8.3. de la PYL W2 (F2)4% puede verse como las fibras se introducen en la matriz del yeso.

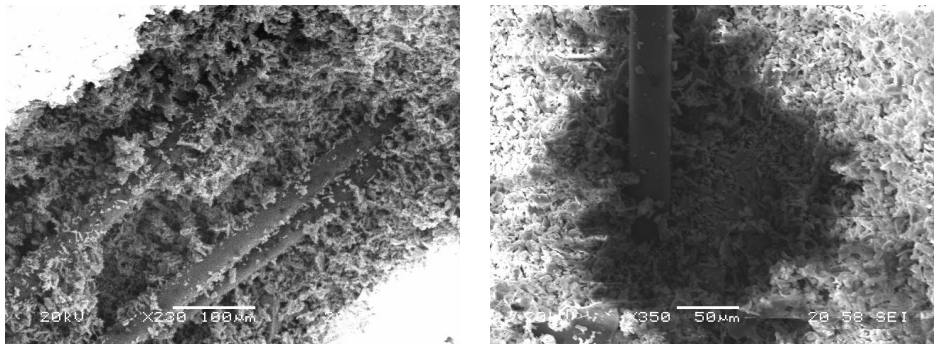


Imagen 8.3. SEM de las PYL W2 (F2)4%



8.2.6. Ensayo de reacción al fuego de productos. Ensayo de no combustibilidad

Para conocer los efectos que la incorporación de fibras produce en el ensayo de reacción al fuego, se ensaya la muestra que mejores resultados globales obtiene en los ensayos anteriormente detallados. Para ello se siguen los mismos criterios de análisis que en las muestras sin fibras (Apartado 7.4.2.).

En este caso la muestra ensayada corresponde a la PYL W 1 (F2) 4%:

- **Muestra 1/1 W (F2) 4%:** Yeso al 50% con residuo de espuma de poliuretano blanco (W) al 50%, y fibras de polipropileno al 4%.

La Tabla 8.8. detalla los resultados obtenidos en el ensayo.


	Muestra	Muestra	
	1/1 W	1/1 W (F2) 4%	
Incremento Temperatura Horno (°C)	0,6	8,6	
Persistencia de la inflamación (s)	<5	<5	
Pérdida de masa (%)	26,1	27,1	

Tabla 8.8. Resultados ensayo de reacción al fuego de productos

La muestra 1/1 W (F2) 4% presenta un tiempo de inflamación menor de 20 segundos, un incremento de temperatura en el horno por debajo de 50°C y una pérdida de masa menor del 50%.

Al comparar estos resultados con los de la muestra 1/1 W, se aprecia como el incremento de temperatura en el horno es el único valor que sufre un incremento destacable, inferior en cualquier caso a 50°C.

Los resultados indican que la composición ensayada corresponde al igual que la muestra 1/1 W a la Euroclase A2, teniendo sólo en cuenta la contribución al desarrollo del fuego del material¹³⁴.

¹³⁴ Binici, H., Aksogan, O., Nuri Bodur, M., Akca, E., Kapur, S. (2007). «Thermal isolation and mechanical properties of fibre reinforced mud bricks as wall materials». Construction and Building Materials 21 (2007) 901-906



8.3. Conclusiones

La introducción de fibras no genera cambios significativos en cuanto a la densidad de las probetas.

Los mejores resultados a flexión se obtienen con proporciones del 4% de fibra, siendo la dosificación W1 la que alcanza el mayor incremento en su resistencia (24%).

No es trascendente la cantidad de fibra incorporada a la masa de las placas en cuanto a la capacidad de absorción de las mismas, en cualquier familia se ve reducida, pero el valor de esta reducción es similar para cualquier porcentaje de fibras.

Cuanto mayor es el porcentaje de fibras incorporadas en la masa mayor es la dureza superficial de las placas.

Los mejores resultados en cuanto al ensayo recorrido/carga se obtienen en las PYL W1, para cualquier proporción de fibras.

Existe una buena cohesión en la interfase del material visualizada a través del SEM.

La muestra 1/1 W (F2) 4% ha sido sometida al ensayo de reacción al fuego de productos, no presentando propiedades inflamables. Puede clasificarse como A2.

Capítulo 9.

Puesta en obra



Como complemento a la investigación se realiza la puesta en obra del material estudiado, construyendo un tabique con las placas de yeso laminado fabricadas en laboratorio para contrastar la viabilidad de utilización.

Debido al acabado rugoso que presenta la superficie de las placas, se plantea emplearlas como placa interior en un sistema de placa de yeso laminado para tabiquería o trasdosado, en un modelo de doble o triple placa.

9.1. Sistemas de placa de yeso laminado

Este tipo de sistemas encajan dentro de la denominada construcción en seco, donde la mayor parte de los componentes utilizados son prefabricados, reduciéndose de esta forma los tiempos de ejecución de la obra así como la cantidad de escombros generada. La placa de yeso laminado se emplea generalmente en el interior de un edificio para tabiquerías no portantes, trasdosados y falsos techos.

Debido a sus prestaciones, estos sistemas se sitúan como soluciones recomendables frente a las demandas del Código Técnico de la Edificación en relación al aislamiento acústico, térmico y de resistencia frente al fuego.

9.1.1. Exigencias del Código Técnico de la Edificación

El Código Técnico de la Edificación (CTE) establece *“las exigencias básicas de calidad que deben cumplir los edificios, incluidas sus instalaciones, para satisfacer los requisitos básicos de seguridad y habitabilidad, en desarrollo de lo previsto en la Ley de Ordenación de la Edificación”*.

■ Exigencia básica de aislamiento acústico. DB HR: Protección frente al Ruido

Este documento establece las características acústicas adecuadas de los edificios, para que el ruido producido en condiciones normales de uso no genere molestias.

El comportamiento acústico de una partición varía en función de la composición de la misma. Al calcular el aislamiento acústico de una pared monolítica, no sólo hay que tener en cuenta la Ley de masas, la cual establece que el aislamiento es mayor cuanto más pesa por m² la



partición. El aislamiento real de una pared también tiene que tener en cuenta la frecuencia crítica (f_c) del material utilizado, que depende de las propiedades elásticas del mismo y de su espesor.

El uso de materiales con menor masa por unidad de superficie, pero con una f_c elevada obtienen aislamientos acústicos superiores con menos peso, es lo que se llama Fenómeno de “masa resorte masa”¹³⁵.

Los niveles mínimos de aislamiento acústico a ruido aéreo de los elementos constructivos de separación vertical vienen detallados en la Tabla 9.1. según lo establecido en el CTE DB-HR.

Recintos	Notación	Valor
<i>A recinto habitable</i>	D_{nTA}	>45 dBA
<i>A recinto protegido</i>		>50 dBA
<i>Local de instalaciones a recinto habitable</i>		>45 dBA
<i>Local de instalaciones a recinto protegido</i>		>55 dBA
<i>Zonas comunes sin oberturas a usuarios</i>		>45 dBA
<i>Zonas comunes con oberturas a usuarios</i>		Obertura >50 dBA
		Muro >54 dBA
<i>Local comercial a usuario</i>		>55 dBA
<i>Medianería a edificio contiguo</i>		>50 dBA
<i>Medianería a solar vecino sin edificar</i>		$D_{2m,nTAw}$
<i>Ruido de tráfico a recinto</i>	>30 a 46 dBA	
<i>Recintos pertenecientes a la misma unidad de uso</i>	R_A	>33 dBA

Tabla 9.1. Exigencias mínimas de aislamiento a ruido aéreo, en elementos de separación vertical. CTE DB-HR.

■ Exigencia básica de aislamiento térmico. DB HE: Ahorro de energía¹³⁶

El objeto de este documento básico es fijar los parámetros y procedimientos para reducir la demanda energética en las edificaciones. Por ello es necesario limitar las transmitancias térmicas máximas de los distintos elementos que conforman un edificio (envolvente, particiones, carpintería), atendiendo a la zona climática donde este se encuentre ubicado.

En cuanto a las particiones el CTE DB-HE, se establecen unos valores de transferencia de calor máximos entre unidades de distinto uso, zonas

¹³⁵ Las Clases de Confort Acústico. Isover Saint – Gobain (2014). www.isover.es

¹³⁶ Código Técnico de la Edificación. DB – HE: “Ahorro de energía”.



comunes y medianerías (Tabla 9.2.), y entre unidades del mismo uso del edificio (Tabla 9.3.).

Tipo de elemento	Zona climática de invierno					
	α	A	B	C	D	E
<i>Particiones horizontales y verticales</i>	1,35	1,25	1,10	0,95	0,85	0,70

Tabla 9.2. Transmitancia térmica límite de particiones interiores, cuando delimiten unidades de distinto uso, zonas comunes, y medianerías, U en $W/m^2 \cdot K$ CTE DB-HE.

Tipo de elemento	Zona climática de invierno					
	α	A	B	C	D	E
<i>Particiones horizontales</i>	1,90	1,80	1,55	1,35	1,20	1,00
<i>Particiones verticales</i>	1,40	1,40	1,20	1,20	1,20	1,00

Tabla 9.3. Transmitancia térmica límite de particiones interiores, cuando delimiten unidades del mismo uso, U en $W/m^2 \cdot K$. CTE DB-HE.

■ Exigencia básica de protección frente al fuego.

DB SI: Seguridad en caso de incendio

Este documento tiene como propósito implantar las reglas y procedimientos que permiten reducir a límites aceptables el riesgo de los usuarios de un edificio a sufrir daños derivados de un incendio.

En lo relativo a revestimientos el CTE DB-SI establece unas condiciones de reacción al fuego, que deben cumplirlo según la situación de los mismos dentro del edificio (Tabla 9.4.).

Situación del elemento	Revestimientos	
	De techos y paredes	De suelos
<i>Zonas ocupables</i>	C-s2,d0	E _{FL}
<i>Pasillos y escaleras protegidos</i>	B-s1,d0	C _{FL} -s1
<i>Aparcamientos y recintos de riesgo especial</i>	B-s1,d0	B _{FL} -s1
<i>Espacios ocultos no estancos, tales como patinillos, falsos techos y suelos elevados (excepto los existentes dentro de las viviendas) etc. o que siendo estancos, contengan instalaciones susceptibles de iniciar o de propagar un incendio.</i>	B-s3,d0	B _{FL} -s2

Tabla 9.4. Clases de reacción al fuego de los elementos constructivos. CTE DB-SI



9.1.2. Sistemas de construcción seca para tabiques y trasdosados

Algunas de las soluciones constructivas concebidas para cumplir con estas nuevas exigencias de aislamiento incluyen sistemas de entramado autoportante con placa de yeso laminado (tabiquería o trasdosados). Las prestaciones de estos sistemas se ven modificadas según las dimensiones de la estructura sobre la que se asientan, el tipo y número de placas empleadas y la incorporación o no de material aislante.

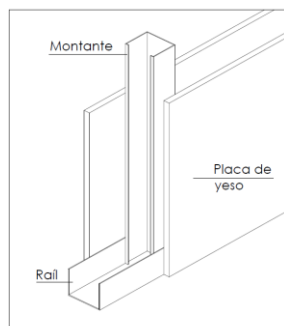
Para conseguir **prestaciones térmicas** adecuadas al CTE la cámara de aire que forma la estructura metálica de estos sistemas debe ir rellena de material aislante (lana mineral). El aislamiento térmico se calcula mediante la suma de las resistencias térmicas de cada una de las capas que componen el sistema.

El **comportamiento acústico** viene determinado por el fenómeno de “masa resorte masa”. Una combinación adecuada de placas, proporciona adecuados niveles de aislamiento acústico con muy poco peso. El relleno de la cámara de aire mejora su comportamiento.

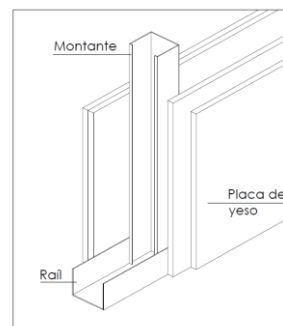
La **resistencia al fuego** de las placas de yeso se corresponde a la clasificación A2 (No combustible. Sin contribución), S1 (Baja opacidad de humos) y d0 (Nula caída de gotas inflamables).

▪ Tabiquería

Este sistema de partición interior está formado por una estructura metálica de perfiles de acero galvanizado, sobre la que se atornillan las placas de yeso laminado (una o varias). Atendiendo al número de placas atornilladas a la estructura, podemos clasificar los tabiques en: **sencillos** si se coloca una única placa de yeso a cada lado de la estructura (Esquema 9.1.) o **múltiples** si se incorporan dos o tres placas a cada lado de la estructura (Esquema 9.2.).



Esquema 9.1. Tabique sencillo



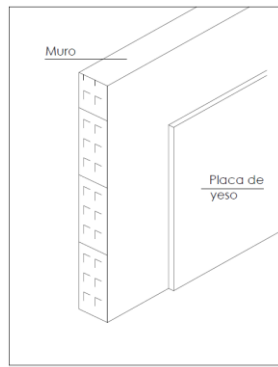
Esquema 9.2. Tabique múltiple



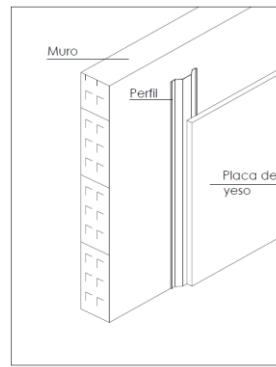
▪ Trasdoso

Un trasdoso es un revestimiento que se instala sobre la cara interior de un muro de cerramiento o sobre ambas caras de un muro interior, con el fin de mejorar las prestaciones del aislamiento térmico y acústico del soporte.

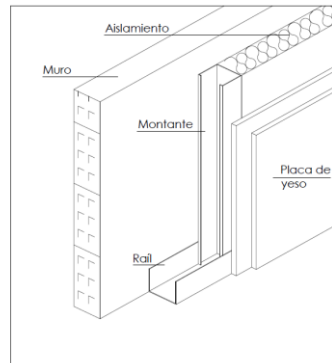
La colocación de este revestimiento se puede hacer de forma directa, utilizando para ello pastas de agarre (Esquema 9.3.), colocándolo sobre perfilaría metálica anclada al muro (Esquema 9.4.) o bien superponiendo una estructura metálica autoportante (Esquema 9.5.).



Esquema 9.3. Trasdoso directo



Esquema 9.4. Trasdoso con perfilaría



Esquema 9.5. Trasdoso con estructura autoportante



9.2. Sistemas con las placas de yeso laminado objeto de la investigación. Puesta en obra.

Para comprobar la idoneidad del uso de las placas de yeso laminado fabricadas con residuos poliméricos en laboratorio, en la construcción de tabiques y/o trasdosados en un sistema autoportante, se realizan ensayos de puesta en obra en laboratorio.

Se ha elegido un modelo de tabiquería estándar, que comercializan varias empresas del sector del yeso laminado. El sistema se compone de los siguientes elementos:

- Estructura base formada con perfilera de acero galvanizado, con elementos horizontales (railes) de 70 x 35 mm con espesor nominal 0,55 mm y elementos verticales (montantes) de 70 x 41/39 mm con espesor nominal 0,60 mm.
- Lana de roca en el interior de 60 mm de espesor.
- Doble placa de yeso laminado de uso estándar de 15 mm de espesor en ambas caras del tabique.

El espesor total del tabique es de 130 mm. El sistema presenta una resistencia térmica $R_t=2,25 \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ con una transmitancia $U=0,44 \text{ W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$, con un aislamiento acústico con $R_A=56,0 \text{ dBA}$ y una resistencia al fuego EI 120¹³⁷.

En el ensayo de idoneidad realizado, las placas con residuos se colocarán en sustitución de la placa interior. Para ello se ha fabricado en el laboratorio una estructura formada por dos entramados metálicos a base de perfiles en "U" de medidas exteriores 30 x 40 cm, colocados perpendicularmente y asentados sobre una base de madera. La cámara intermedia se rellena con lana de roca, cerrando la estructura con placas de yeso, recreando de esta forma el sistema de construcción seca con estructura autoportante, descrita anteriormente (Imagen 9.1. y 9.2.).

Las herramientas utilizadas para montar el sistema son las habitualmente empleadas en obra: nivel, tijeras, cúter, serrucho, escuadra, metro, tornillos especiales para tabiquería de cartón yeso, destornillador eléctrico, etc.

¹³⁷ Guía Placo. Soluciones innovadoras en yeso. Placo Saint-Gobain (2014). www.placo.es



Imagen 9.1. Estructura base

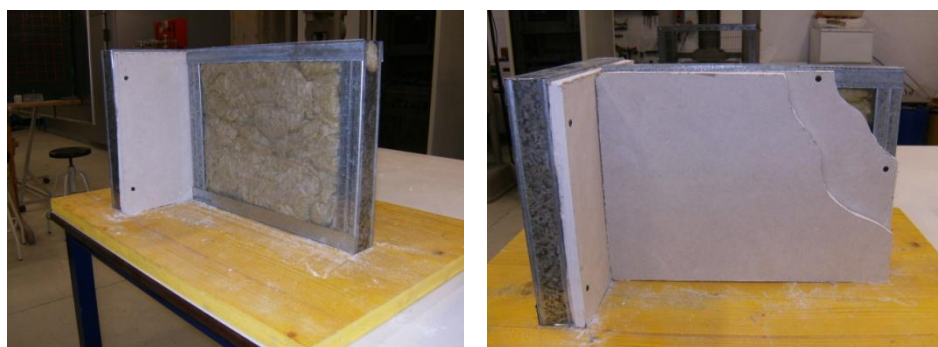


Imagen 9.2. Estructura base

Los ensayos previos para comprobar la aptitud del material para su puesta en obra, cortado de la placa y fijación al soporte, demuestran que las placas confeccionadas sin fibras añadidas rompen con facilidad en la fase de introducción del tornillo y su apriete al perfil galvanizado de la estructura portante (Imagen 9.3 y 9.4).



Imagen 9.3. Detalle rotura placa PYL W1

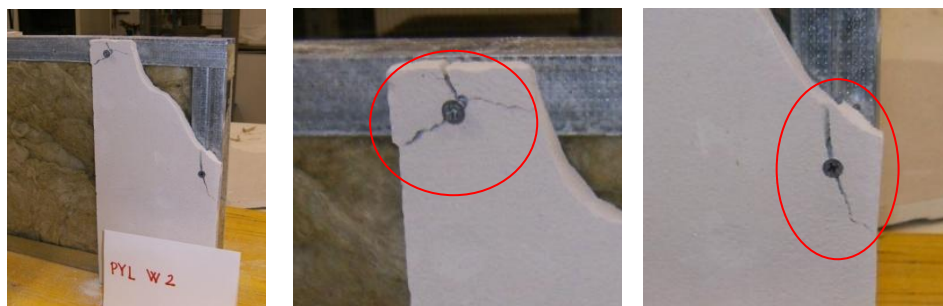


Imagen 9.4. Detalle rotura placa PYL W2

Por ello se han seleccionado únicamente las placas reforzadas con fibras de polipropileno (F2) y de ellas las de prestaciones físicas y térmicas más relevantes y que se detallan en la Tabla 9.5..

Residuo W	Residuo G	Residuo PA
PYL W1 (F2) 4%	PYL G1 (F2) 4%	PYL PA1 (F2) 4%
PYL W2 (F2) 4%	PYL G2 (F2) 4%	PYL PA2 (F2) 4%

Tabla 9.5. Dosificaciones seleccionadas

9.2.1. Placa con residuo de poliuretano blanco

▪ PYL W1 (F2) 4%

La placa de yeso con residuo de poliuretano blanco con la dosificación 1/1 con fibras (PYL W1 (F2) 4%), se atornilla en tres puntos a la estructura, pudiéndose observar en la Imagen 9.5. la ausencia de rotura en la pieza.



Imagen 9.5. Colocación placa PYL W1 (F2) 4%

Sobre esta placa se coloca otra pieza de yeso, en esta caso se trata de una placa de yeso estándar o comercial (PYL ST) (Imagen 9.6.), sujetándose sin problema alguna el conjunto (Imagen 9.7.).

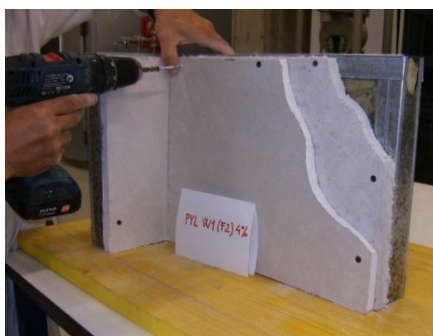


Imagen 9.6. Colocación placa estándar PYL ST sobre placa PYL W1 (F2) 4%

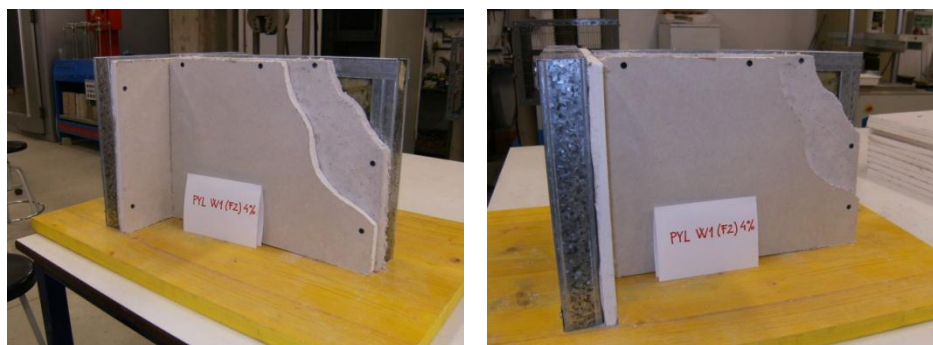


Imagen 9.7. Conjunto placa estándar PYL ST y placa PYL W1 (F2) 4%

▪ **PYL W2 (F2) 4%**

Como puede observarse en la Imagen 9.8., tras efectuar la colocación de la placa con dosificación PYL W2 (F2) 4%, se comprueba que la placa mantiene la integridad.

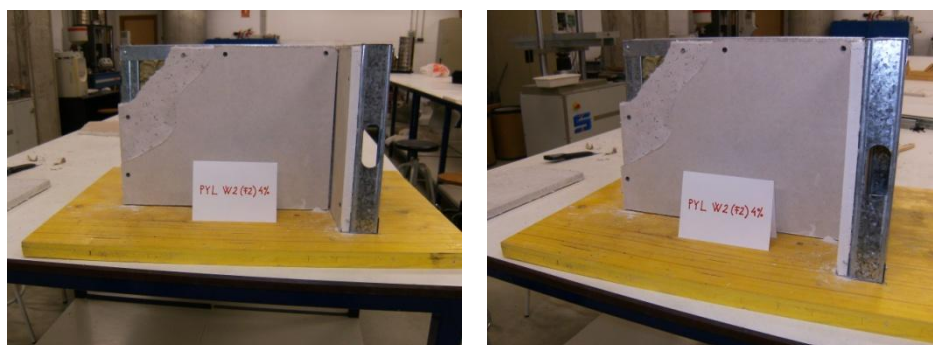


Imagen 9.8. Conjunto placa estándar PYL ST y placa PYL W2 (F2) 4%



9.2.2. Placa con residuo de poliuretano gris

En el caso de los otros dos residuos de poliuretano (G y GM), se decide realizar el ensayo únicamente con el poliuretano gris (G) ya que ambos residuos tienen características similares, siendo los resultados extrapolables.

- **PYL G1 (F2) 4% y PYL G2 (F2) 4%**

La dosificación de residuo utilizada es la 1/1 y la 1/2 con fibras al 4%, no produciéndose ningún tipo de fisura al colocar las placas. (Imagen 9.9.), colocándose a continuación la placa estándar (Imagen 9.10.).

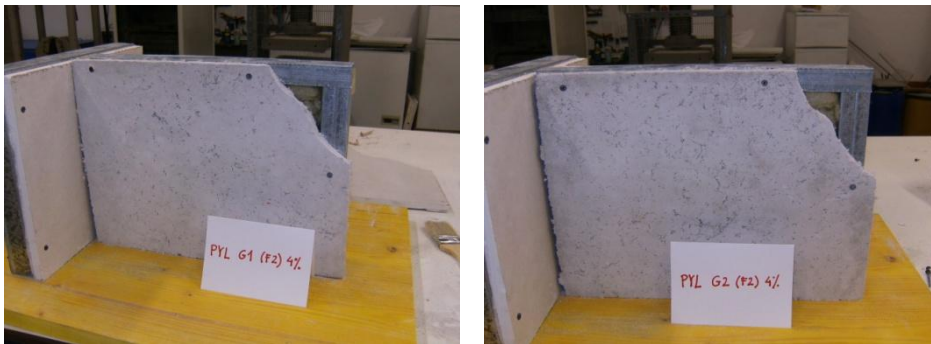


Imagen 9.9. Placa PYL G1 (F2) 4% y PYL G2 (F2) 4%

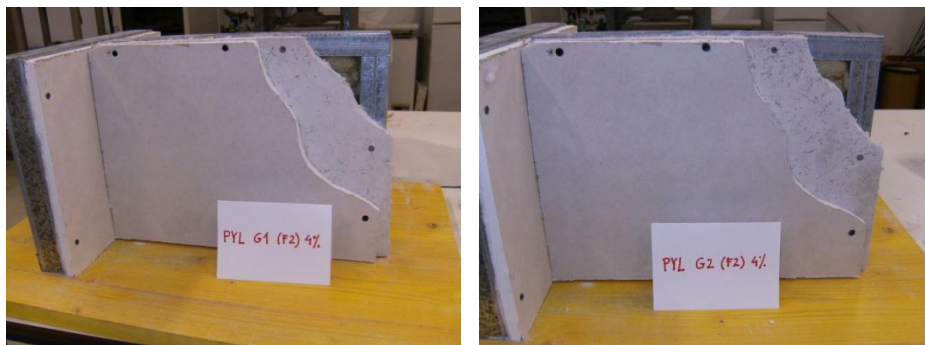


Imagen 9.10. Conjunto PYL ST - PYL G1 (F2) 4% y PYL ST -PYL G2 (F2) 4%



9.2.3. Placa con residuo de poliamida

En las placas fabricadas con residuo de poliamida, los resultados varían según la dosificación del residuo.

▪ **PYL PA1 (F2) 4%**

En la dosificación 1/1 [PYL PA1 (F2) 4%] la pieza puede atornillarse a la estructura, pero se producen microfisuras en la zona del elemento de sujeción (Imagen 9.11.). Aun así el conjunto puede considerarse estable.

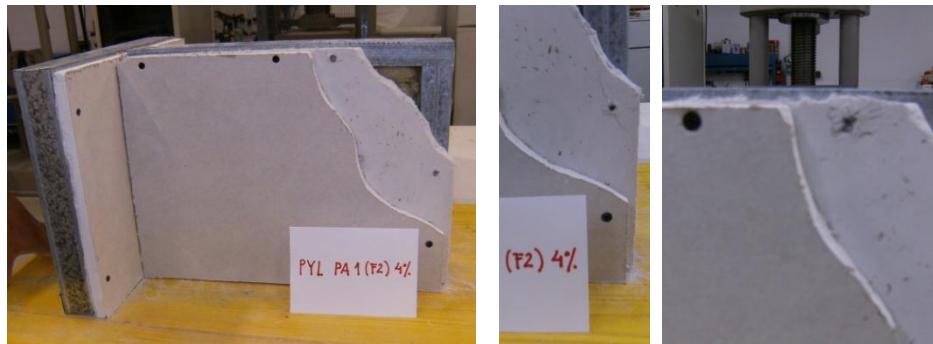


Imagen 9.11. Placa PYL PA1 (F2) 4%

▪ **PYL PA2 (F2) 4%**

En el caso en la dosificación 1/2 (PYL PA2 (F2) 4%) las fisuras son mucho más pronunciadas, llegando a romper la pieza en las zonas de sujeción (Imagen 9.12.).

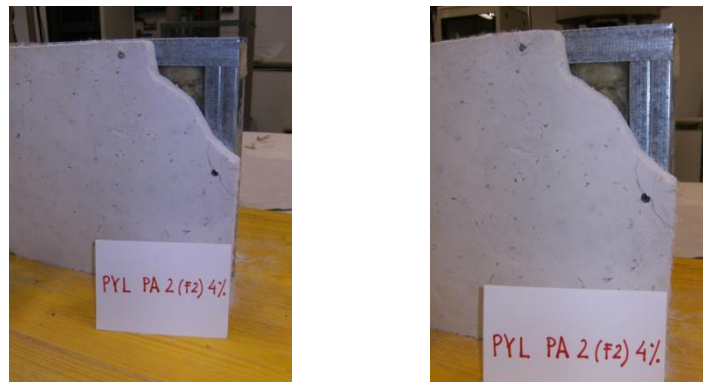


Imagen 9.12. Placas PYL PA 2 (F2) 4%



9.2.4. Resultados

Tras las pruebas realizadas, puede afirmarse que las placas fabricadas en laboratorio, con residuo de espuma de poliuretano (W y G), pueden colocarse en obra, con sistemas y herramientas tradicionales, sin que se vea afectada su integridad, por lo que constituyen un buen sustitutivo de la placa interior de yeso laminado.

■ Aislamiento acústico

A partir de estudios de otros investigadores, se conoce el comportamiento acústico de materiales que incluyen residuos elásticos en su matriz. Los resultados obtenidos con materiales de yeso con adiciones de granulado de corcho^{138,139} indican que la hidratación del yeso durante el proceso de fraguado provoca un crecimiento de su microestructura, estos movimientos son elásticamente restringidos por las adiciones, provocando reducciones en la porosidad de la matriz del material, con lo que se consigue un buen material reflectante sonoro. En morteros de cemento con coke de petróleo¹⁴⁰ el aumento de la porosidad del material mejora el aislamiento a ruido de impacto en frecuencias medias y altas.

La presencia de residuos de poliuretano podría provocar efectos similares en las placas de yeso, mejorando de esta forma su capacidad de aislamiento acústico. Para poder evaluar correctamente el aislamiento acústico del sistema sería preciso realizar ensayos específicos de absorción acústica según UNE-EN 20140-10:1994¹⁴¹ y cámara de reverberación UNE-EN ISO 354:2004¹⁴², trabajo que se deja abierto a futuras líneas de investigación.

■ Aislamiento térmico

Para comprobar el cumplimiento de los mínimos exigidos por el CTE, en cuanto a aislamiento térmico, se calculan las transmitancias térmicas del sistema ensayado en laboratorio con las placas PYL W2 (F2) 4% y de

¹³⁸ Del Rio Merino, M.. «Nuevas aplicaciones del corcho en el campo de la edificación». Ponencia Encuentro Eurocork 2005 , Huelva (España).

¹³⁹ Hernández-Olivares, F., Bollati, M.R.,del Rio, M.,B-Parga Landa. (1999) «Development of cork-gypsum composites for building applications». Construction and building materials 13.

¹⁴⁰ Frías, M., Jiménez-Mateos, J.M., Pfretzschner, J., Olmeda, J., Rodríguez, R.M., Sánchez Rojas, M.I., (2011). «Development of blend cement mortar with acoustic properties using petroleum coke». Construction and building materials 25, 1086-1092.

¹⁴¹ UNE-EN 20140-10:1994. Acústica. Medición de aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción.

¹⁴² UNE-EN ISO 354:2004. Acústica. Medición de la absorción acústica en una cámara reverberante.



un sistema comercial estándar, lo cual permite comparar ambas soluciones.

Los valores de transferencia térmica exigidos en una partición interior (tabique convencional) que delimita unidades del mismo uso se definen en el CTE DB-HE (Tabla 9.3.).

El espesor total del tabique son 130 mm, distribuidos de esta forma: estructura simple de 70 mm, con lana de roca en la cámara de aire de 60 mm de espesor y cerrando el armazón dos placas de 15 mm a cada lado.

A continuación se muestran los cálculos de ambos sistemas:

Esquema	Sistema ensayado	Rt	Zona climática
	Aire interior	0,13	Burgos Zona E1
	Placa estándar	0,06	
	PYL W2 (F2) 4%	0,08	
	Lana mineral	1,75	
	PYL W2 (F2) 4%	0,08	
	Placa estándar	0,06	
	Aire interior	0,13	
	Total Rt	2,29	
	U=1/Rt	0,43	< 1,00 (W/m ² ·K) Partición vertical

Tabla 9.6. Cálculo de las transmitancias del sistema ensayado en laboratorio

Esquema	Sistema ensayado	Rt	Zona climática
	Aire interior	0,13	Burgos Zona E1
	Placa estándar	0,06	
	Placa estándar	0,06	
	Lana mineral	1,75	
	Placa estándar	0,06	
	Placa estándar	0,06	
	Aire interior	0,13	
	Total Rt	2,25	
	U=1/Rt	0,44	< 1,00 (W/m ² ·K) Partición vertical

Tabla 9.7. Cálculo de las transmitancias sistema comercial

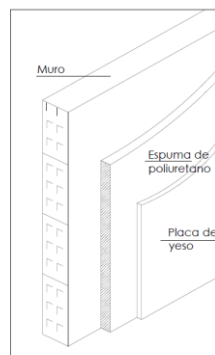


Puede constatarse que la solución constructiva ensayada en laboratorio (Tabla 9.6.) cumple con las exigencias marcadas por el CTE en cuanto a aislamiento térmico, y los resultados son mejores a los del sistema comercial (Tabla 9.7.).

■ Comportamiento frente al fuego

Para comprobar el comportamiento frente al fuego de la placa de yeso laminado con residuos de espuma de poliuretano blanco con fibra al 4% (PYL W1 (F2) 4%) en sustitución de la placa interior de yeso laminado del sistema tradicional, tomamos como referencia el Real Decreto 110/2008¹⁴³ el cual establece que para un sistema de placa de yeso laminado fijada mecánicamente a una subestructura metálica con aislante del tipo Euroclase E (espuma de poliuretano de 40 mm) se clasifica como: [B-s1,d0], (Esquema 9.6.). Este conjunto por lo tanto cumple con las condiciones exigidas en el CTE DB-SI (Tabla 9.4). En este caso se ha elegido un aislamiento cuyo comportamiento frente al fuego es sensiblemente peor que la lana de roca.

Los ensayos realizados en la placa con residuos de espuma de poliuretano blanco la clasifican como A2, es decir idéntica clasificación a la lámina sustituida, por lo que cabe esperar que el sistema de placa de yeso laminado con residuos de poliuretano blanco fijada mecánicamente a una subestructura metálica con aislante del tipo Euroclase E (espuma de poliuretano de 40 mm), alcance la clasificación B, lo cual la hace apta para su colocación en tabiquería interior.



Esquema 9.6. Sistema de placa de yeso laminado con espuma de poliuretano

¹⁴³ REAL DECRETO 110/2008, de 1 de febrero, por el que se modifica el Real Decreto 312/2005, de 18 de marzo, por el que se aprueba la clasificación de los productos de construcción y de los elementos constructivos en función de sus propiedades de reacción y de resistencia frente al fuego.



9.2.5. Conclusiones

Se ha comprobado la posibilidad de puesta en obra del material estudiado, como parte de un sistema de placa de yeso laminado para tabiquería en un modelo de doble placa.

No es viable la colocación de placas sin fibras en la estructura portante, al atornillarlas rompen con facilidad.

Las placas con residuo W y G (con fibras al 4%), se atornillan a la estructura, sin sufrir ningún tipo de fisura en la zona de sujeción, consiguiendo conjuntos estables.

En el caso de las placas con residuo de poliamida, en la dosificación 1/1 aparecen microfisuras en la zona de atornillado, pero el conjunto es estable. En el caso de la dosificación 1/2 no es viable su utilización, ya que la pieza rompe en las zonas de sujeción.

Al realizar los cálculos de las transmitancias térmicas, se puede comprobar como el sistema ensayado en laboratorio obtiene mejores resultados que el sistema estándar. Lo cual indica que el sistema cumple con las exigencias marcadas por el CTE en cuanto a aislamiento térmico.

El comportamiento frente al fuego de la placa de espuma de poliuretano blanco la hace apta para su colocación en tabiquería interior.

Capítulo 10.

Reciclaje de las placas de yeso laminado de la investigación



Se estima que cada año se llevan a vertedero unos 15 millones de toneladas de residuos de placas de yeso laminado, siendo Estados Unidos el país que lidera esta práctica con unos 7 MTn, Europa con 4 MTn, y Japón con unos 2 MTn¹⁴⁴.

En España es usual que los productos del yeso estén mezclados con el resto de residuos de la construcción, lo que significa que anualmente casi 175.000 toneladas de yeso son depositadas en vertederos¹⁴⁵.

El Plan Nacional Integral de Residuos de España (2008-2015) establece una jerarquía de cinco niveles en cuanto a prioridades en la gestión de residuos:

- 1) Prevención
- 2) Reutilización
- 3) Reciclaje
- 4) Valorización energética
- 5) Eliminación

Este orden debe aplicarse como principio rector en la legislación y política sobre prevención y gestión de residuos.

El hecho de incluir residuos poliméricos en la composición de una placa de yeso laminado supone la reutilización del material, aumentando el ciclo de vida del mismo, encontrándose este proceso en el 2º nivel de la clasificación. En el momento que este nuevo prefabricado se coloca en obra, comienza un nuevo uso del mismo arrancando una nueva vida, que en principio puede durar tantos años como la vida útil del edificio donde se coloca, y que se presupone de 100 años en el caso de edificios residenciales. Los residuos poliméricos mantienen sus propiedades teóricamente al menos durante 300 años.

Si en un momento determinado se decide eliminar la tabiquería o los trasdosados donde están colocados estos nuevos materiales se propone reciclar esas placas, entrando de esta forma en el 3º nivel de la jerarquía en las prioridades de la gestión de residuos.

Diversos investigadores trabajan con la basanita obtenida de placas de yeso laminado recicladas con el fin de mejorar la estabilidad de subbases en suelos arcillosos¹⁴⁶. Con la idea de reciclar restos de yeso

¹⁴⁴ Asociación europea de fabricantes de productos a base de yeso "Eurogypsum" (2014). <http://www.eurogypsum.org>

¹⁴⁵ Gremio de Entidades del Reciclaje de Derrivos (GERD).(2013)

¹⁴⁶ Ahmed, A.,Ugai, . (2011) «Environmental effects on durability of soil stabilized with recycled gypsum». Cold Regions Science and Technology 66, 84-92.



también se propone introducirlos en bloques de cerámica elaborados con diferentes proporciones de arcilla y cemento¹⁴⁷.

El proyecto europeo “Gypsum to Gypsum Project” (GtoG), tiene como uno de sus objetivos estudiar el reciclado de los residuos de Placa de Yeso Laminado (PYL), con el fin de incorporarlos a la fabricación de nuevas placas¹⁴⁸.

Las empresas del sector de los prefabricados de yeso ya reciclan los restos generados en sus propias industrias (resto pre-consumer) e incluso tienen proyectos para recoger y reciclar restos de demolición y de obra nueva¹⁴⁹.

Este capítulo pretende aportar algunas posibles soluciones a la problemática existente frente al cierre del ciclo de vida (reciclaje) de los residuos utilizados en esta investigación. Se trabaja con el objetivo de conocer el comportamiento del material reutilizado al incorporarlo a nuevas PYL.

A continuación se detalla el procedimiento experimental así como los resultados y conclusiones obtenidos tras la realización de ensayos en los materiales resultantes.

Con el material obtenido (a partir de este momento material reutilizado) se experimenta realizando sustituciones en nuevas mezclas y en placas de yeso laminado.

Las mezclas con material reutilizado (Apartado 10.2.) se caracterizan mediante los ensayos de densidad aparente, dureza Shore C a 7 días y resistencia a flexión y compresión a 7 días.

Las placas de yeso con material reutilizado (Apartado 10.3.) son caracterizadas mediante los ensayos de densidad, resistencia a flexión, capacidad de absorción total de agua y dureza superficial.

¹⁴⁷ Godinho-Castro, A., Testolin, R., Janke, L., Corrêa, A., Radetski, C. (2012). «Incorporation of gypsum waste in ceramic block production: Proposal for a minimal battery of tests to evaluate technical and environmental viability of this recycling process». Waste Management Volume 32, Issue 1, Pages 153–157.

¹⁴⁸ Proyecto GTOG (From Production to Recycling: A Circular Economy for the European Gypsum Industry with the Demolition and Recycling Industry) (2013-2015). Comisión Europea. Programa Life+ 2011.

¹⁴⁹ Proyecto piloto para cerrar el ciclo de vida de las placas de yeso laminado: el caso de Hostería Grau, Barcelona. (2013). Knauf GmbH Sucursal en España.



10.1. Procedimiento experimental para el reciclaje

Se plantea realizar los ensayos con placas de yeso laminado con residuo de espuma de poliuretano blanca, en dosificaciones 1/1 y 1/2, con proporciones de fibra (F2) al 4% (Tabla 10.1.). Se eligen estas placas debido al buen comportamiento obtenido en la puesta en obra de las mismas.

Residuo W
PYL W1 (F2) 4%
PYL W2 (F2) 4%

Tabla 10.1. Dosificaciones seleccionadas

10.1.1. Triturado de las placas de yeso

Las placas se rompen en trozos por golpeo y se introducen en un Molino RETSCH SM100, el cual además hace pasar el material obtenido por un tamiz de 4,00 mm de luz de malla (Imagen 10.1.)



Imagen 10.1. Proceso de triturado

10.1.2. Tamizado del material

El objetivo del tamizado es doble: por un lado definir la granulometría de los materiales obtenidos tras el triturado (Imagen 10.2.), y por otro retirar las fibras y el polímero del material final.



Imagen 10.2. Material obtenido del triturado



La serie de tamices utilizada (Tabla 10.2. e Imagen 10.3.) es la indicada para las arenas según UNE-EN 933-1:2012¹⁵⁰.

4,00	2,00	1,00	0,50	0,25	0,125	0,063	Fondo
------	------	------	------	------	-------	-------	-------

Tabla 10.2. Línea de tamices (mm)



Imagen 10.3. Serie de tamices utilizados

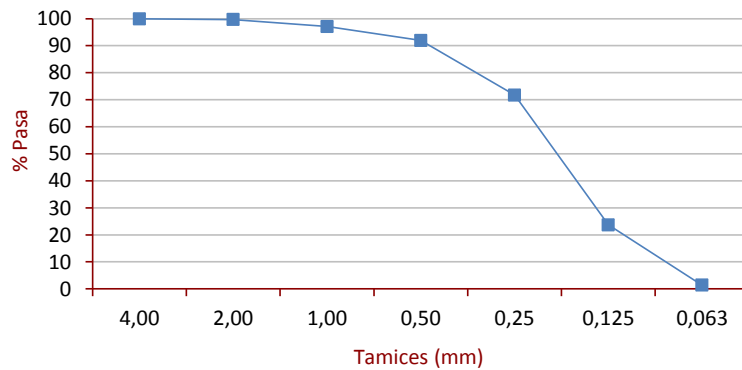
Los resultados del tamizado de la muestra PYL W1 (F2) 4% se presentan en la Tabla 10.3..

Tamiz (mm)	Retenido (g)	Retenido (%)	Acumulado (%)	Pasa (%)
4,00	0,33	0,10	0,10	99,90
2,00	0,82	0,24	0,34	99,66
1,00	8,77	2,56	2,90	97,10
0,50	17,64	5,15	8,05	91,95
0,25	69,26	20,22	28,27	71,73
0,125	164,69	48,09	76,36	23,64
0,063	76,31	22,28	98,64	1,36
Fondo	4,66	1,36	100,00	0,00
	342,48			

Tabla 10.3. Granulometría muestra PYL W1 (F2) 4%

La curva granulométrica obtenida (Gráfica 10.1.) muestra como el 91% de la muestra pasa por el tamiz de 0,50 mm, el 71% por el de 0,25 mm reduciéndose de forma brusca a un 23 % en el tamiz de 0,125 mm.

¹⁵⁰ UNE-EN 933-1:2012. Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 1: Determinación de la granulometría de las partículas. Método del tamizado.



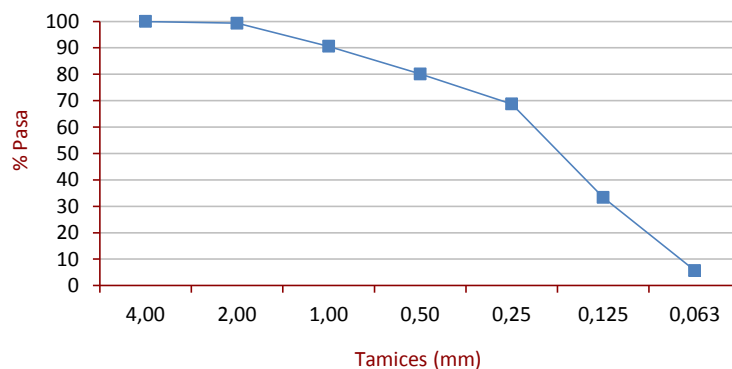
Gráfica 10.1. Línea granulométrica de la muestra PYL W1 (F2) 4%

Los resultados del tamizado de la muestra PYL W2 (F2) 4% se presentan en la Tabla 10.4..

Tamiz (mm)	Retenido (g)	Retenido (%)	Acumulado (%)	Pasa (%)
4,00	0	0,00	0,00	100,00
2,00	2,18	0,68	0,68	99,32
1,00	28,11	8,74	9,42	90,58
0,50	33,72	10,48	19,90	80,10
0,25	36,67	11,40	31,30	68,70
0,125	113,77	35,36	66,66	33,34
0,063	89,03	27,67	94,33	5,67
Fondo	18,31	5,69	100,00	0,00
	321,79			

Tabla 10.4. Granulometría muestra PYL W2 (F2) 4%

La curva granulométrica obtenida (Gráfica 10.2.) presenta una reducción en el tamaño de partícula progresivo, produciéndose el salto más significativo en el tamiz de 0,125 mm con un porcentaje de pasa del 33% y en el 0,063 mm con un porcentaje del 5,67% de pasa.



Gráfica 10.2. Línea granulométrica de la muestra PYL W2 (F2) 4%



10.1.3. Desecado

El yeso utilizado para fabricar las PYL es yeso cocido o sulfato de calcio hemihidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$). Al amasar este yeso con agua se hidrata formando sulfato cálcico hemihidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), para poder utilizar nuevamente este yeso es necesario volver a desecarlo y así obtener otra vez sulfato de calcio hemihidratado o basanita (Esquema 10.1.).

Mineral de yeso	Cocción	Yeso cocido	Hidratación	Yeso fraguado
$(\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O})$	▶▶	$(\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O})$,	▶▶	$(\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O})$
sulfato cálcico hemihidratado		sulfato de calcio hemihidratado		sulfato cálcico hemihidratado

Esquema 10.1. Fases de transformación del yeso

Del material obtenido tras el tamizado, retiramos el retenido superior a 0,25 mm donde quedan depositadas las fibras de la PYL (Imagen 10.4.). Estas se eliminan porque el material reutilizado se seca a 140°C en estufa, temperatura a la cual las fibras funden. En este retenido también se encuentra prácticamente la totalidad del poliuretano utilizado, quedando únicamente la parte más fina.



Imagen 10.4. Retenido en los tamices de 4, 2 y 1mm

El pasa de 0,25 mm es el “material reutilizado” con el que a partir de este momento se experimenta. Realizando en una primera fase sustituciones en nuevas mezclas con yeso y en una segunda sustituciones en placas de yeso laminado.



10.2. Caracterización de mezclas con material reutilizado

Se decide trabajar con sustituciones en volumen de un 33% (Esquema 10.2.) sobre nuevas mezclas de yeso B1.

La relación agua/(yeso+residuo) utilizada es de 0,40, la misma que se utiliza para realizar las probetas de referencia RF (sólo yeso B1), para comprobar cómo varía la inclusión de un nuevo material en la matriz del yeso, sin variar ningún otro parámetro.



33,3 % de sustitución

Esquema 10.2. Esquema de sustitución de yeso

Para esta caracterización se plantea el uso exclusivo de la basanita del material reutilizado, por lo que hay que prescindir del residuo de poliuretano blanco presente en el material (aquella parte tan fina que no ha podido eliminarse en el tamizado).

La separación de materias primas (yeso/residuo de espuma de poliuretano), se efectúa antes del desecado del material reutilizado mediante flotación (Imagen 10.5.), eliminado con una espátula el material que flota (poliuretano) (Imagen 10.6.). Se ha empleado agua de densidad similar al poliuretano.



Imagen 10.5. Eliminación del residuo por flotación (yeso+residuo)

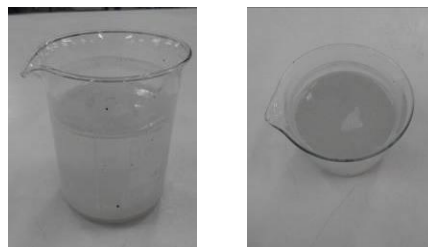


Imagen 10.6. Eliminación del residuo por flotación (yeso)



El yeso se seca en la estufa a 140 °C con lo que se obtiene la basanita (Imagen 10.7.).

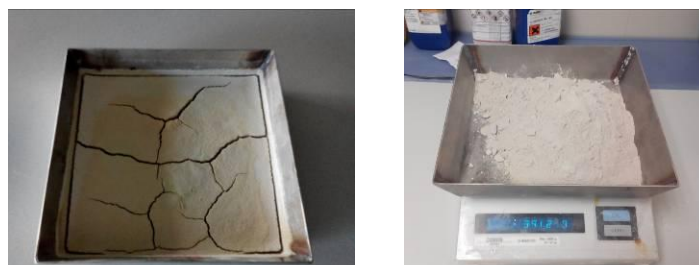


Imagen 10.7. Basanita

Las materias primas se pesan por separado (basanita y yeso B1) y se mezclan antes de amasar (Imagen 10.8.).



Imagen 10.8. Basanita - yeso B1. Mezcla de ambos materiales

Elaborando probetas suficientes para poder realizar los ensayos de densidad en húmedo y seco a 7 días, dureza Shore C, flexión y compresión (Imagen 10.9.).



Imagen 10.9. Fabricación de probetas de (40x40x160) mm³



10.2.1. Resultados

A continuación se refieren los resultados de los ensayos de caracterización de mezclas con material reutilizado (RC). También se incluyen los resultados de las probetas de RF (sólo yeso B1) para poder comparar resultados.

■ Densidad aparente

La densidad aparente de las probetas con material reciclado se reduce un 0,95% respecto a las probetas de referencia (Tabla 10.5).

Clave	Densidad aparente seca a los 7 días (Kg/m ³)
RF	1477
RC	1463

Tabla 10.5. Determinación de la densidad aparente

■ Dureza Shore C a 7 días

Hay un incremento de un 3,6% de la dureza shore C a los 7 días de las probetas con material reciclado respecto a las probetas de referencia (Tabla 10.6.).

Clave	Dureza shore C (7 días)
RF	84,78
RC	87,80

Tabla 10.6. Determinación de la dureza Shore C

■ Resistencia a flexión y compresión a 7 días

La resistencia a flexión de las probetas con material reciclado se ve reducido un 17%, respecto a las probetas de referencia. En el ensayo a compresión la reducción es de un 0,6% (Tabla 10.7.).

Clave	Resistencia a flexión 7 días (MPa)	Resistencia a compresión 7 días (MPa)
RF	5,92	15,49
RC	4,92	15,39

Tabla 10.7. Determinación de la resistencia a flexión y compresión a los 7 días



La Imagen 10.10. presenta la probeta de (40x40x160) mm³ rota en el ensayo de flexión.



Imagen 10.10. Probeta de (40x40x160) mm³ rota en el ensayo de flexión

10.2.2. Conclusiones

El hecho de incluir sustituciones de un 33% de basanita en una probeta de yeso no aporta mejoras significativas al producto.

La densidad de las mezclas con material reciclado apenas se reduce frente a los valores de densidad de las probetas de referencia.

La dureza superficial aumenta debido a la finura del material reciclado, que hace que la probeta sea más compacta.

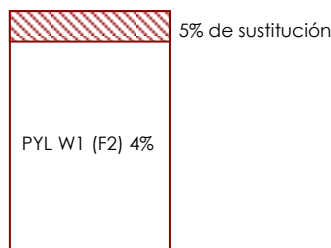
La resistencia a flexión y compresión de las probetas con material reciclado se ve reducida respecto a las probetas de referencia. La posible explicación a este efecto es el hecho de trabajar con tamaños menores de 0,25 mm, la basanita tiene un menor tamaño de partícula que el yeso B1. Por lo cual se precisaría una mayor cantidad de agua para su correcto fraguado. Sin embargo, el hecho de mantener las relaciones agua/yeso fijas, puede ocasionar una peor calidad de las mezclas que se traduce en una reducción de las resistencias mecánicas. Por otra parte, hay que tener en cuenta que se ha trabajado con un residuo de yeso y la calidad del mismo puede verse alterada. Otros autores han experimentado el mismo efecto¹⁵¹.

¹⁵¹ Ahmed, A. (2013). «Recycled bassanite for enhancing the stability of poor subgrades clay soil in road construction projects». *Construction and Building Materials* 48,151-159.



10.3. Caracterización de placas de yeso con material reutilizado

En esta caracterización se utiliza el material reciclado completo (yeso+residuo) para realizar las sustituciones, de las placas PYL W1 (F2) 4% y PYL W2 (F2) 4%. El pasa del tamiz de 0,25 mm se deseca en la estufa a 140 °C, introduciéndolo una vez enfriado dentro de una nueva placa con sustituciones del 5% (Esquema 10.3.). Este porcentaje de sustitución viene determinado por el estudio de los trabajos de otros investigadores¹⁵², donde el rango de sustitución está entre el 5% y el 20%.



Esquema10.3. Esquema de sustituciones

El proceso de fabricación es igual al de las placas previamente estudiadas. Se pesan las materias primas, mezclándolas en seco, en este caso además de yeso y poliuretano se añade el material reutilizado. Las fibras se diluyen en el agua y entonces añadimos el resto de materias primas (Imagen 10.11.).



Imagen 10.11. Fabricación de placas de yeso

Con la mezcla obtenida se rellenan los moldes de (300x400x15) mm³ (Imagen 10.12.), secando las probetas en la estufa a una temperatura

¹⁵² Ahmed, A.,Ugai, K.,Kamei, T.. (2011) «Environmental Evaluation for Clayey Soil Stabilized with Gypsum Waste Plasterboard in Japan». Advances in Unsaturated Soil, Geo-Hazard, and Geo-Environmental Engineering: pp. 9-17.



de $(40\pm 2)^{\circ}\text{C}$ hasta conseguir que alcancen una masa constante y estén listas para ensayar (Imagen 10.13.).



Imagen 10.12. Moldes de placas de yeso Imagen 10.13. Placa de yeso

Se realizan los ensayos de densidad, resistencia a flexión (expresada como carga de rotura a flexión), capacidad de absorción total de agua y dureza superficial.

10.3.1. Resultados

Los resultados de los ensayos de las placas con porcentaje de sustitución (RC 5%) se comparan con los datos obtenidos en las placas de yeso laminado reforzadas con fibras "Capítulo 8. Refuerzos con fibras".

■ Densidad

En el caso de las probetas PYL W1 (F2) 4% RC 5% la densidad aumenta del orden de un 1,3%, respecto a la placa sin material reciclado en su matriz. Por otro lado la PYL W2 (F2) 4% RC 5% ve reducida su densidad un 3,9% (Tabla 10.8.).

Clave	Densidad (Kg/m ³)
PYL W1 (F2) 4%	1264
PYL W1 (F2) 4% RC 5%	1280
PYL W2 (F2) 4%	1033
PYL W2 (F2) 4% RC 5%	993

Tabla 10.8. Resultados de la determinación de la densidad (Kg/m³)



■ Resistencia a flexión (expresada como carga de rotura a flexión)

La carga de rotura a flexión de ambas dosificaciones mejora, un 8,5% la placa PYL W1 (F2) 4% RC 5% y un 13,6% la placa PYL W2 (F2) 4% RC 5%, respecto a las que no tienen material reciclado (Tabla 10.9.) (Imagen 10.14.).

Clave	Carga de rotura a flexión (N)
PYL W1 (F2) 4%	276,67
PYL W1 (F2) 4% RC 5%	300,00
PYL W2 (F2) 4%	176,67
PYL W2 (F2) 4% RC 5%	200,00

Tabla 10.9. Resultados de la determinación de la carga de rotura a flexión (N)



Imagen 10.14. Ensayo de carga de rotura a flexión

■ Capacidad de absorción total de agua

La probeta PYL W1 (F2) 4% RC 5% reduce su capacidad de absorción total de agua un 14,7%, respecto a la placa sin material reciclado en su matriz. En la PYL W2 (F2) 4% RC 5% la disminución de la absorción es de un 11,3% (Tabla 10.10).

Clave	Absorción Total (% medio)
PYL W1 (F2) 4%	32,91
PYL W1 (F2) 4% RC 5%	28,08
PYL W2 (F2) 4%	50,91
PYL W2 (F2) 4% RC 5%	45,15

Tabla 10.10. Resultados del ensayo de la capacidad de absorción total (%)



■ Dureza superficial

El diámetro medio se ve reducido en ambas dosificaciones, un 2,2% la PYL W1 (F2) 4% RC 5% y un 6,6% en la PYL W2 (F2) 4% RC 5%, respecto a las placas sin material reciclado. Viéndose de este modo aumentada la dureza superficial de las placas (Tabla 10.11.) (Imagen 10.15).

Clave	Dureza Superficial (\varnothing medio mm)
PYL W1 (F2) 4%	12,44
PYL W1 (F2) 4% RC 5%	12,17
PYL W2 (F2) 4%	16,44
PYL W2 (F2) 4% RC 5%	15,36

Tabla 10.11. Resultados del ensayo de dureza superficial (\varnothing medio mm)



Imagen 10.15. Ensayo de dureza superficial

10.3.2. Conclusiones

Se observa una mejora en los resultados de todos los ensayos en ambas dosificaciones, excepto en la densidad de la PYL W1 (F2) 4% RC 5%.

La inclusión del material reciclado en porcentaje del 5% optimiza las prestaciones de las placas, esto puede ser debido al hecho de introducir material reciclado (con menor proporción de residuo polimérico) en la matriz de la nueva placa de yeso.



10.4. Conclusiones finales

La conclusión más significativa de este capítulo, es que las propiedades del yeso reciclado apenas merman, hecho el cual queda comprobado con la experimentación de las mezclas con material reciclado en probetas de (40x40x160) mm³.

Por otro lado, los residuos que se incorporan para hacer nuevas placas no solo no reducen las prestaciones de estos prefabricados, sino que las mejoran respecto a las placas de referencia.

Los resultados de caracterización, muestran la posibilidad de reutilizar residuos de yeso, en nuevos procesos productivos de este material.

Además, se ha demostrado que los residuos poliméricos se pueden recuperar de una forma sencilla, mediante tamizado y, en su fase más fina por flotación. Estos resultados abren una posible vía de trabajo para proponer alternativas al problema del cierre del ciclo de vida de estos residuos, dando una segunda vida a los residuos de las placas investigadas para fabricar nuevas placas de yeso+polímero.

Capítulo 11.

Estudio económico



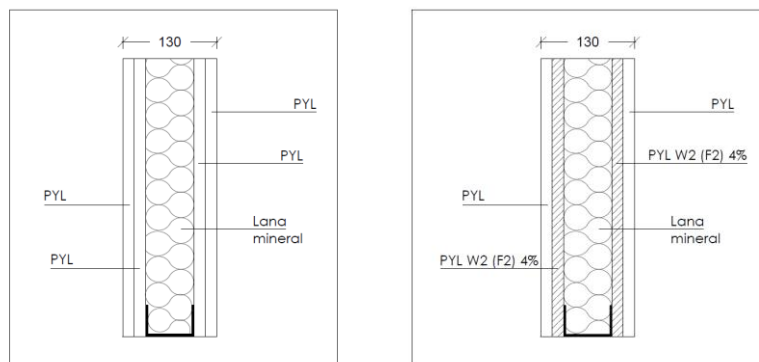
El objeto de este capítulo es analizar el coste que supone incorporar las placas de yeso laminado fabricadas en esta investigación, en un sistema de placa de yeso laminado comercial, cuya solución constructiva está ya en el mercado.

De esta forma se pretende evaluar la viabilidad económica del material investigado, lo que en consecuencia supondría haber encontrado una salida comercial a este tipo de residuos.

11.1. Valoración cuantitativa. Estudio de costes

El análisis de costes, evalúa el importe de 1 m² de un sistema de placa de yeso laminado para tabiquería, con un modelo de doble placa, donde las placas investigadas se colocan como placa interior.

El sistema evaluado se compone de los siguientes elementos: estructura metálica formada por perfiles de acero galvanizado (con montante de 70 mm), relleno de cámara con lana mineral y sistema con doble placa estándar de 15 mm a cada lado (Esquema 11.1. y 11.2.).



Esquema 11.1. Tabique comercial Esquema 11.2. Tabique modificado

Para valorar cuantitativamente un sistema de estas características hay que tener en cuenta los costes siguientes:

- Material, entendiendo como tal la placa de yeso laminado.
- Transporte a pie de obra del material.
- Colocación del material (mano de obra) y los medios auxiliares necesarios para su correcta puesta en obra.

La fabricación de las placas de yeso laminado investigadas se plantea realizarla en una planta de prefabricados de yeso (al igual que las PYL comerciales), manteniendo de igual forma las dimensiones de las



PYL de mercado, trasladándose posteriormente a un almacén para su venta o directamente a obra para su colocación.

Respecto a la mano de obra indicar, como queda reflejado en el "Capítulo 9. Puesta en obra", la instalación de las placas con residuos se realiza con las mismas herramientas y medios auxiliares que para las placas tradicionales, además los tiempos de ejecución son parejos.

Por lo tanto, se considera que los costes del transporte y de colocación del material no varían respecto al sistema tradicional de placas estándar o comerciales, por lo que estos costes no se tendrán en cuenta a la hora de la valoración cuantitativa del sistema.

La valoración de las placas de yeso laminado investigadas tiene en cuenta, los resultados de los ensayos detallados en los capítulos anteriores de esta Tesis Doctoral. Se realiza un estudio de costes de aquellas dosificaciones, que mejores prestaciones han obtenido en el proceso experimental y en la puesta en obra (Tabla 11.1.).

Residuo W	Residuo G	Residuo GM
PYL W1 (F2) 4%	PYL G1 (F2) 4%	PYL GM1 (F2) 4%
PYL W2 (F2) 4%	PYL G2 (F2) 4%	PYL GM2 (F2) 4%

Tabla 11.1. Dosificaciones seleccionadas

11.1.1. Coste de las materias primas de la placa objeto de investigación

Las materias primas con las que se fabrican las placas objeto de esta investigación son las siguientes: yeso, residuos poliméricos, fibras y agua. No hay coste extra en la fabricación de las placas ya que el residuo sólo debe añadirse seco a la misma tolva con el yeso, y el incremento por el empleo de un nuevo material se ve compensado por la reducción en la cantidad de yeso utilizada.

A continuación se enumeran los costes asociados a cada una de estas materias primas:

1) Coste del yeso:

Para el yeso se considera un coste medio del material en planta, se ha consultado a diversos proveedores.

Yeso	100 €/Tn
------	----------



2) Coste de los residuos:

o Coste de la materia prima: los materiales utilizados en esta investigación como aligerantes en las placas de yeso laminado, son residuos industriales sin ningún coste asociado a su obtención, por lo que se considera que tienen un coste cero.

o Coste de transformación: los residuos de poliuretano se presentan en planchas o pellets, por lo que deben ser procesados antes de su uso. Este proceso de transformación se plantea realizarlo en la planta generadora de los residuos.

El único coste de transformación asociado a los residuos es el de triturado del material, estimado a partir del coste de maquinaria y capacidad de producción.

i. Capacidad de producción: se estima un rendimiento medio de molturación de 0,8 Tn / hora,

$$0,80 \text{ Tn/hora} \times 352 \text{ horas producción/mes} = 281,60 \text{ Tn/mes}$$

ii. Alquiler de la maquinaria de triturado (incluido mantenimiento), se estima un coste medio de 9.324 €/año.

$$9.324 \text{ €/año} : 12 \text{ meses} = 777 \text{ €/mes}$$

iii. Personal encargado del triturado y preparación del transporte del material, considerando dos operarios para la realización del trabajo. Se estima un gasto anual de 28.800 € por trabajador.

iv. Gastos varios por instalación maquinaria: 60 €/m²/mes. Se estima 45 m² de instalación por maquinaria.

En la Tabla 11.2. se resume el coste total de trituración por tonelada de residuo.

Coste trituración/ Tn, mes (€)	
Maquinaria	2,759
Personal	17,045
Gastos varios	9,588
Total	29,392

Tabla 11.2. Coste total de trituración por tonelada de residuo



o **Coste de transporte:** incluye el trayecto desde el lugar de generación del residuo hasta la planta de fabricación de las placas.

Para calcular el coste del transporte del residuo, hay que tener en cuenta los parámetros que se enumeran a continuación.

- i. Se presupone el uso de un camión para el transporte con una capacidad de carga de 108 m³.
- ii. Los materiales a transportar tiene distintas densidades, por lo para cada residuo se obtiene una capacidad de transporte diferente (Tabla 11.3.).

	Densidad (Kg/m³)	Capacidad de transporte (Kg/camión)
Residuo W	74,60	8.056,80
Residuo G	68,00	7.344 ,00
Residuo GM	46,00	4.968,00

Tabla 11.3. Capacidad de transporte según la densidad de los residuos

- iii. Se estima un coste de kilometraje de 2,13 €/km que incluye el coste del vehículo (seguro, gastos de mantenimiento, etc.), combustible y chofer. Obteniendo de esta forma un coste por tonelada y kilómetro en función del residuo (Tabla 11.4.).

	Coste del kilometraje (€/km)	Capacidad de transporte (Tn/camión)	Coste (€/Tn·km)
Residuo W	2,13	8,06	0,2643
Residuo G	2,13	7,34	0,2902
Residuo GM	2,13	4,97	0,4286

Tabla 11.4. Coste del transporte Tn/km según los residuos

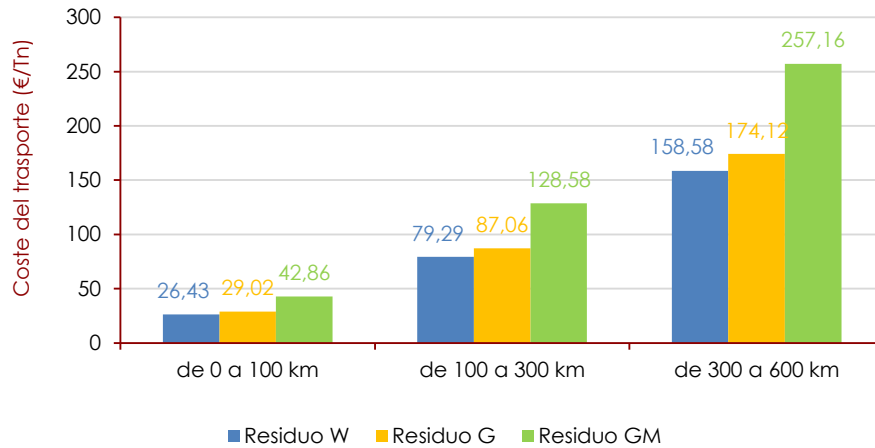
- iv. La distancia de transporte afecta de forma significativa al coste del mismo. Se presupone una distancia máxima de transporte de residuo de 600 Km, con tramos intermedios de 100 y 300 km (Tabla 11.5.).

	Coste de 0 a 100 km (€/Tn)	Coste De 100 a 300 km (€/Tn)	Coste De 300 a 600 km (€/Tn)
Residuo W	26,43	79,29	158,58
Residuo G	29,02	87,06	174,12
Residuo GM	42,86	128,58	257,16

Tabla 11.5. Coste del transporte (€/Tn) según distancias y residuos



Como se aprecia en la Gráfica 11.1. el coste del transporte en el residuo W y G tiene valores similares.



Gráfica 11.1. Comparativa del coste de transporte en función del tipo de residuo y tramo de distancia

Con todos estos valores se calcula el coste final del residuo (coste materia prima + coste de transformación + coste de transporte), según los distintos tramos de distancia de desplazamiento estimados y el tipo de residuo (Tabla 11.6.).

	Coste total de 0 a 100 km (€/Tn)	Coste total de 100 a 300 km (€/Tn)	Coste total de 300 a 600 km (€/Tn)
Residuo W	55,822	108,682	187,972
Residuo G	58,412	116,452	203,512
Residuo GM	72,252	157,972	286,552

Tabla 11.6. Coste (€/Tn) según distancias y tipo de residuo

3) Coste del agua:

El precio del agua se obtiene de la empresa Aguas de Burgos S.A..

Agua	0,44 €/Tn
------	-----------

4) Coste de las fibras:

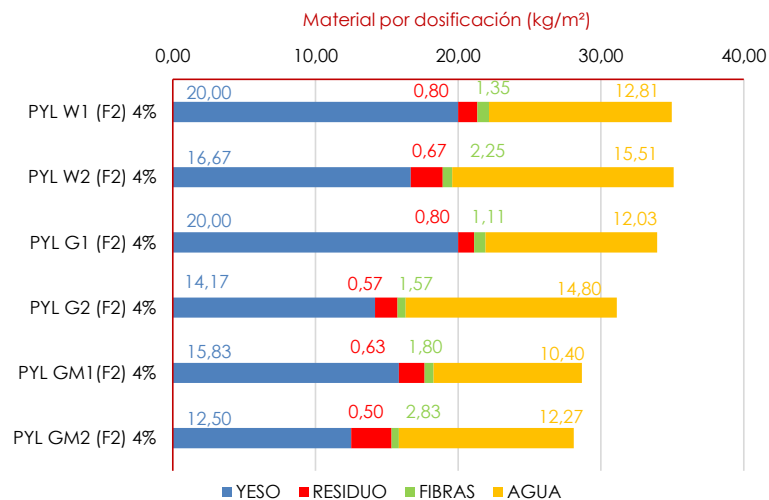
El precio de las fibras se obtiene de la empresa proveedora de las mismas. Se supone el coste de las mismas en planta.

Fibras	2,120 €/Tn
--------	------------



11.1.2. Composición de placas estudiadas

En la Gráfica 11.2. se especifican las cantidades de materiales necesarios para la fabricación de las distintas dosificaciones, las cuales determinan el coste final de cada sistema.



Gráfica 11.2. Cantidad de material por dosificación (kg/m²)

Si al calcular el coste de las distintas dosificaciones, se tienen únicamente en cuenta los costes asociados a la obtención de los residuos (0,00 €/Tn), se obtienen los valores detallados en la Tabla 11.7., donde se determinan los costes por m² tanto por componente como por dosificación, sin tener en cuenta los costes asociados al transporte de los residuos.

Denominación	Yeso	Residuo	Fibras	Agua	Total
PYL W1 (F2) 4%	2,00	0,00	1,70	0,0056	3,702
PYL W2 (F2) 4%	1,67	0,00	1,41	0,0068	3,087
PYL G1 (F2) 4%	2,00	0,00	1,70	0,0053	3,701
PYL G2 (F2) 4%	1,42	0,00	1,20	0,0065	2,625
PYL GM1 (F2) 4%	1,58	0,00	1,34	0,0046	2,931
PYL GM2 (F2) 4%	1,25	0,00	1,06	0,0054	2,315

Tabla 11.7. Coste por m² por dosificación (€/m²)

Al valorar de esta forma se obtiene que la dosificación PYL GM2 (F2) 4% es la que mejor coste alcanza, ya que es la mezcla que necesita menor cantidad de materia prima para fabricar 1m² de material.



11.1.3. Análisis del coste de una pared de 1m²

Una vez obtenidos los costes de las materias primas necesarias para la fabricación de las placas, puede evaluarse el coste de las dosificaciones seleccionadas.

En función de las cantidades de material requeridas para cada dosificación, se determinan los costes por m², tanto por componente como por placa.

Al encontrarnos con costes distintos en el residuo, en función de las distancias de generación del mismo a la planta de fabricación de la PYL, el análisis de los costes de una pared de 1m² se va a dividir en tres tramos según la distancia a recorrer, de 0 a 100 km (Tabla 11.8.), de 100 a 300 km (Tabla 11.9.) y de 300 a 600 km (Tabla 11.10.).

Denominación	Yeso	Residuo	Fibras	Agua	Total
PYL W1 (F2) 4%	2,00	0,7525	1,70	0,0056	4,454
PYL W2 (F2) 4%	1,67	1,2541	1,41	0,0068	4,341
PYL G1 (F2) 4%	2,00	0,6485	1,70	0,0053	4,350
PYL G2 (F2) 4%	1,42	0,9187	1,20	0,0065	3,543
PYL GM1 (F2) 4%	1,58	1,2996	1,34	0,0046	4,230
PYL GM2 (F2) 4%	1,25	2,0465	1,06	0,0054	4,362

Tabla 11.8. Coste para las diferentes dosificaciones de PYL (€/m²) en distancias de 0 a 100 km

Denominación	Yeso	Residuo	Fibras	Agua	Total
PYL W1 (F2) 4%	2,00	1,4650	1,70	0,0056	5,167
PYL W2 (F2) 4%	1,67	2,4417	1,41	0,0068	5,529
PYL G1 (F2) 4%	2,00	1,2929	1,70	0,0053	4,994
PYL G2 (F2) 4%	1,42	1,8315	1,20	0,0065	4,456
PYL GM1 (F2) 4%	1,58	2,8414	1,34	0,0046	5,772
PYL GM2 (F2) 4%	1,25	4,4746	1,06	0,0054	6,790

Tabla 11.9. Coste para las diferentes dosificaciones de PYL (€/m²) en distancias de 100 a 300 km

Denominación	Yeso	Residuo	Fibras	Agua	Total
PYL W1 (F2) 4%	2,00	2,5339	1,70	0,0056	6,235
PYL W2 (F2) 4%	1,67	4,2231	1,41	0,0068	7,310
PYL G1 (F2) 4%	2,00	2,2595	1,70	0,0053	5,961
PYL G2 (F2) 4%	1,42	3,2007	1,20	0,0065	5,825
PYL GM1 (F2) 4%	1,58	5,1541	1,34	0,0046	8,085
PYL GM2 (F2) 4%	1,25	8,1166	1,06	0,0054	10,432

Tabla 11.10. Coste para las diferentes dosificaciones de PYL (€/m²) en distancias de 300 a 600 km



La distancia es un factor que afecta de manera significativa el coste de la PYL, puede apreciarse en la Tabla 11.11. como para la misma dosificación, se produce un aumento en el coste a medida que la distancia de la planta generadora de residuos a la industria de fabricación de las plantas se incrementa.

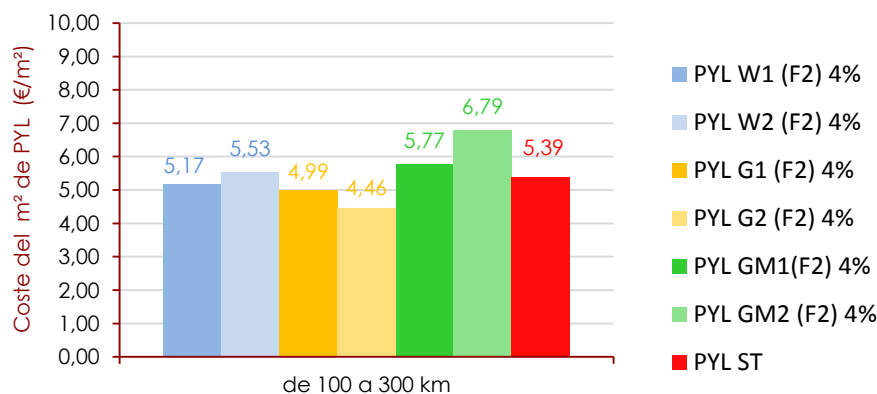
Denominación	de 0 a 100 km	de 100 a 300 km	de 300 a 600 km
PYL W1 (F2) 4%	4,45	5,17	6,24
PYL W2 (F2) 4%	4,34	5,53	7,31
PYL G1 (F2) 4%	4,35	4,99	5,96
PYL G2 (F2) 4%	3,54	4,46	5,83
PYL GM1 (F2) 4%	4,23	5,77	8,08
PYL GM2 (F2) 4%	4,36	6,79	10,43

Tabla 11.11. Comparativa de coste para las diferentes dosificaciones de PYL (€/m²) según distancias

Se establece un precio del m² de placa de yeso laminado estándar (PYL ST), teniendo en cuenta sistemas de embalaje de 30 unidades y considerando un transporte del material en el tramo de 100 a 300 km (a mayores distancias la empresa suministradora incrementa estos precios)¹⁵³.

PYL ST	5,39 €/m ²
--------	-----------------------

En la Gráfica 11.3. se compara el coste del m² de PYL fabricadas con las distintas dosificaciones de residuos (en el tramo de 100 a 300 km), con el coste del m² de PYL estándar o comercial.



Gráfica 11.3. Comparativa del coste del m² de PYL (€/m²)

¹⁵³ Gyptec IBÉRICA-Gessos Técnicos, S.A. www.gyptec.eu



En el tramo de 0 a 100 km en cualquier dosificación y clase de residuo, el coste de las placas es inferior al de la placa estándar.

Por otro lado en el tramo de 100 a 300 km, puede apreciarse como para cualquier dosificación del residuo G el coste de las PYL estudiadas es inferior a la estándar en el residuo W la dosificación W1 tiene un coste menor a la estándar, estando por encima de los costes de la estándar ambas dosificaciones del residuo GM.

11.1.4. Coste del sistema

Para poder cuantificar el coste del sistema se toma como ejemplo el coste de la placa que tiene un porcentaje de sustitución (1/1) y el residuo W que cumple con las prestaciones térmicas mínimas al incluirlo en este tipo de sistema.

A continuación se estudia el coste del sistema completo (perfilería, aislamiento y placas), con placas estándar (Tabla 11.12.), con sustitución de dos placas (Tabla 11.13.) y de una placa (Tabla 11.14.).

Esquema	Materiales	€/m ²	m ²	€
	Perfilería y material auxiliar	9,60	1	9,60
	Aislamiento	3,35	1	3,35
	PYL Estándar	5,39	4	21,56
	Total			34,51

Tabla 11.12. Costes del sistema estándar (€)

Esquema	Materiales	€/m ²	m ²	€
	Perfilería y material auxiliar	9,60	1	9,60
	Aislamiento	3,35	1	3,35
	PYL Estándar	5,39	2	10,78
	PYL W1 (F2) 4%	5,17	2	10,34
	Total			34,07

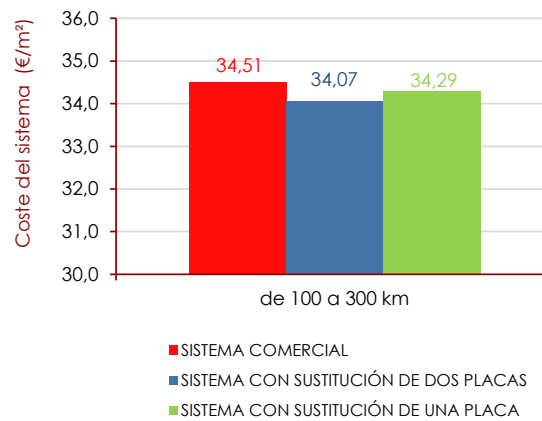
Tabla 11.13. Costes del sistema con sustitución de dos placas (€)



Esquema	Materiales	€/m ²	m ²	€
	Perfilería y material auxiliar	9,60	1	9,60
	Aislamiento	3,35	1	3,35
	PYL Estándar	5,39	3	16,17
	PYL W1 (F2) 4%	5,17	1	5,17
	Total			

Tabla 11.14. Costes del sistema con sustitución de una placa (€)

En el caso del sistema con sustitución de dos placas frente al sistema estándar, la reducción del coste es de un 1,28 %. En el supuesto de sustitución de una placa la reducción es de un 0,64 % (Gráfica 11.4.).



Gráfica 11.4. Comparativa del coste del m² de sistema (€/m²)



11.2. Valoración cualitativa o Análisis cualitativo

El estudio económico no puede tener únicamente en cuenta el análisis cuantitativo de los materiales investigados. Hay otros parámetros a valorar, como el coste de gestión de los residuos y el beneficio medioambiental que supone la reutilización de estos sobrantes.

11.2.1. Gestión del residuo

El estudio de costes de las materias primas de las placas de yeso laminado no valora el coste de gestión de los residuos por parte de las empresa generadoras.

Si se tiene en cuenta este parámetro, que incluye el coste de transporte y el canon por depósito en vertedero, hay que considerarlo como un ahorro en el coste del material.

El coste de gestión de los residuos con los que se trabaja en esta investigación son normalmente asumidos por las empresas generadoras, Se considera un gasto medio de gestión de residuos de 60 €/Tn de residuo de poliuretano. En la Tabla 11.15. se detalla el ahorro por m² de gestión según residuo y dosificación.

Denominación	Ahorro por m ²
PYL W1 (F2) 4%	0,08
PYL W2 (F2) 4%	0,13
PYL G1 (F2) 4%	0,07
PYL G2 (F2) 4%	0,09
PYL GM1 (F2) 4%	0,11
PYL GM2 (F2) 4%	0,17

Tabla 11.15. Ahorro por m² según residuo y dosificación

Esto supone una reducción en el coste final de la placa de yeso laminado (Tabla 11.16).

Denominación	de 0 a 100 km	de 100 a 300 km	de 300 a 600 km
PYL W1 (F2) 4%	4,37	5,09	6,15
PYL W2 (F2) 4%	4,21	5,39	7,18
PYL G1 (F2) 4%	4,28	4,93	5,89
PYL G2 (F2) 4%	3,45	4,36	5,73
PYL GM1 (F2) 4%	4,12	5,66	7,98
PYL GM2 (F2) 4%	4,19	6,62	10,26

Tabla 11.16. Comparativa de coste para las diferentes dosificaciones de PYL (€/m²) según distancias deduciendo gestión



11.2.2. Beneficio medioambiental del nuevo material

El beneficio medioambiental que supone dar una segunda vida a los restos de espuma poliuretano, procedente de la industria del automóvil, refrigeración y construcción, deriva de evitar el depósito en vertedero de estos residuos y de la reducción en la demanda de materia prima (recursos naturales). La huella ecológica de la industria y/o producto también se ve reducida.

Las placas de yeso laminado fabricadas tienen características térmicas que aportan mejoras a los sistemas prefabricados con placa estándar, en este sentido suponen una mejora en la eficiencia energética del sistema.

11.3. Conclusiones

Las placas fabricadas en esta investigación son competitivas respecto a las placas estándar debido a sus prestaciones térmicas, mecánicas y de utilización, así como en sus costes.

Se produce un ahorro económico por parte de la empresa de prefabricados, ya que reduce el coste por adquisición de materia prima y contaría con un aligerante a un coste reducido.

La empresa generadora de residuos convierte un desecho en una materia prima y elimina cualquier coste en la gestión

Capítulo 12.

**Conclusiones finales
Futuras líneas de
investigación**



12.1. Conclusiones finales

En este apartado se exponen las conclusiones del trabajo realizado de acuerdo con los objetivos planteados en esta investigación.

Los resultados obtenidos en los ensayos del **procedimiento experimental** proporcionan múltiples conclusiones que se enumeran a continuación. Estas conclusiones se extienden tanto a las mezclas como a las placas investigadas.

- Se confirma que es posible elaborar placas de yeso laminado con residuos poliméricos de origen industrial (espumas de poliuretano y poliamida en polvo), determinándose las concentraciones de polímero adecuadas para cada dosificación e identificando las propiedades y características físico-mecánicas de las mismas.
- La reducción en la densidad de las mezclas va unida al aumento del porcentaje de sustitución de yeso por residuo, esto se debe a los valores más reducidos de densidad real que presentan los residuos. Estas disminuciones generan, materiales con porosidades cada vez mayores.
- Para conseguir una trabajabilidad adecuada del material hay que elevar la proporción de agua ya que, a medida que se aumenta la sustitución de residuo por yeso, el requerimiento de agua es mayor.
- El incremento de la relación agua/(yeso+residuo) genera un aumento en los tiempos de principio de fraguado, lo que se considera favorable en las mezclas ya que de esta forma aumenta el tiempo de aplicación de las mismas.
- La reducción de la densidad y el aumento de la relación agua/(yeso+residuo) eleva la porosidad en la matriz del material, lo cual conlleva valores más altos en cuanto a capacidad de retención de agua, absorción por capilaridad y permeabilidad al vapor de agua.
- La dureza superficial de las mezclas disminuye de forma progresiva, por la naturaleza más blanda de los residuos utilizados frente a la matriz del conglomerado.
- La adherencia sobre soporte cerámico alcanza reducciones importantes en dosificaciones yeso/polímero superiores al 1/2.
- Los valores de resistencia a flexión/carga de rotura a flexión y compresión descienden al ampliarse el porcentaje de sustitución.



Por tanto, como era de esperar, la cantidad de residuo polimérico presente en los materiales ensayados (mezclas y placas) es la variable fundamental en el cambio de las propiedades físico-mecánicas de las muestras.

El análisis del **comportamiento térmico** del material (mezclas y placas) arroja las siguientes conclusiones:

- El cálculo de las resistencias térmicas de las distintas dosificaciones, muestra datos favorables en cualquier residuo para el porcentaje de sustitución 1/2, asemejándose a valores de materiales comerciales.
- El ensayo de reacción al fuego de productos señala, que la dosificación 1/1 de poliuretano blanco (W1) cumple con los parámetros establecidos para denominarse como A2.

La **incorporación de fibras** en las dosificaciones de las placas con mejores propiedades aporta resultados dispersos según la proporción en la sustitución y el porcentaje de fibras.

- No se presentan cambios importantes en los valores de densidad al aumentar la cantidad de fibras.
- La concentración en el porcentaje de fibras tampoco influye en la capacidad de absorción de las placas, reduciéndose en todas ellas frente a las que no tienen fibras.
- Las mejoras se presentan en los resultados del ensayo de resistencia a flexión. Con proporciones del 4% de fibra, se alcanzan incrementos en la resistencia de un 24%, en la dosificación W1.
- Los valores de dureza superficial aumentan cuanto mayor es el porcentaje de fibras incorporadas en la matriz de las placas.
- El ensayo de reacción al fuego de productos de la muestra 1/1 W (F2) 4%, indica que la muestra del material no presenta propiedades inflamables, por lo que se clasifica como A2.

Respecto a la **puesta en obra**, ha sido posible colocar las placas de yeso laminado fabricadas en laboratorio con residuo de espuma de poliuretano (W y G), como placas interiores en un sistema autoportante de placa de yeso laminado para tabiquería, en un modelo de doble placa.



En cuanto al **reciclaje de las PYL** fabricadas y ensayadas en este trabajo muestra que se considera factible el hecho de incluir material reciclado en nuevas placas, ya que sus prestaciones mejoran.

El **estudio económico** confirma la competitividad en cuanto a los costes de las placas fabricadas respecto a las placas estándar o comerciales.



12.2. Futuras líneas de investigación

El trabajo de investigación realizado en esta Tesis Doctoral unido a la revisión de los resultados obtenidos, plantea la posibilidad de continuar con las siguientes líneas de investigación:

- Completar la caracterización de las placas de yeso con material reciclado mediante ensayos acústicos, para conocer de esta forma su adaptación a las prescripciones de habitabilidad determinadas en el nuevo Código Técnico de la Edificación, estableciendo los valores de aislamiento de las mismas según las distintas bandas de frecuencia.
- Incorporar aditivos que mejoren las propiedades mecánicas de las placas fabricadas, hallando los productos más adecuados así como las dosificaciones óptimas, en función del residuo utilizado y el porcentaje de sustitución.
- Analizar las propiedades que deriven de la inclusión de las mezclas ensayadas en otro tipo de prefabricados, como en paneles de yeso (bloques de yeso) y en placas de yeso para techos suspendidos.
- Ampliar las aplicaciones de los residuos obtenidos al eliminar el material reciclado de una obra, buscando aumentar el abanico de opciones en cuanto a las posibilidades de cerrar el ciclo de reciclado de los productos obtenidos hasta el momento.
- Extender la investigación a la realización de ensayos de caracterización del sistema con arreglo al CTE.

Anexo 1.

Producción científica



PRODUCCIÓN CIENTÍFICA DIRECTAMENTE RELACIONADA CON ESTA TESIS DOCTORAL

Artículos internacionales

Título: **Characterization and thermal properties of gypsum plasterboard with lightweight polymer waste.**

Revista: Materials & Design

Autores: Lourdes Alameda Cuenca-Romero, Jesús Gadea Sáinz, Ángel Rodríguez Sáiz, Verónica Calderón Carpintero, Sara Gutiérrez González, Estado: en revisión (Enero 2015)

Patentes de invención

Denominación: **Procedimiento de obtención de placas de yeso laminado con residuo de poliamida en polvo.**

Inventores: Lourdes Alameda Cuenca-Romero, Sara Gutiérrez González, Verónica Calderón Carpintero, Ángel Rodríguez Sáiz, Carlos Junco Petrement, Jesús Gadea Sáinz y Javier Garabito López.

Número de solicitud: **P201300846** Fecha de solicitud: **16/09/2013**

Informe de Estado de la Técnica (IET): en revisión

Denominación: **Procedimiento de obtención de placas de yeso laminado aligeradas con residuo de espuma de poliuretano.**

Inventores: Lourdes Alameda Cuenca-Romero, Sara Gutiérrez González, Verónica Calderón Carpintero, Ángel Rodríguez Sáiz, Jesús Gadea Sáinz, Carlos Junco Petrement Y Javier Garabito López.

Número de solicitud: **P201300464** Fecha de solicitud: **17/05/2013**

Número de publicación: **ES2522792A1** Fecha: **18/11/2014**

Congresos nacionales e internacionales

Título de la comunicación: **Influence of superplastizer based in polycarboxilates and melamines on the properties of lightweight mortar plaster made with recycled polymers.**

Autores: S. Gutiérrez-González, L. Alameda, A. Rodríguez, C. Junco, V. Calderón.

Evento: The International Congress on Polymers in Concrete (ICPIC15)

Entidad organizadora: The American Concrete Institute - Singapore.

Lugar y fecha: Singapore, Octubre 2015.



Título de la comunicación: **Fabricación de placas de yeso laminado aligeradas con residuo de poliamida en polvo.**

Autores: Lourdes Alameda Cuenca-Romero, Sara Gutiérrez González, Verónica Calderón Carpintero, Ángel Rodríguez Sáiz, Carlos Junco Petrement.

Evento: Workshop on Environmental Impact of Buildings Construction.

Entidad organizadora: Escuela Politécnica de la Universidad de Madrid

Lugar y fecha: Madrid (España), Septiembre 2013.

Título de la comunicación: **Functional Gypsum.**

Autores: Lourdes Alameda Cuenca-Romero, Sara Gutiérrez González, Ángel Rodríguez Sáiz, Verónica Calderón Carpintero, Jesús Gadea Sáinz, Carlos Junco Petrement.

Evento: Innovation Center Construmat 2013.

Entidad organizadora: Innovation Center Construmat 2013

Lugar y fecha: Barcelona (España), Mayo 2013.

PRODUCCIÓN CIENTÍFICA INDIRECTAMENTE RELACIONADA CON ESTA TESIS DOCTORAL

Patentes de invención

Denominación: **Procedimiento de obtención de morteros de yeso de construcción con fracciones de rechazo de piedra artificial tipo cuarzo triturado.**

Inventores: Ignacio Adán Ortega, Verónica Calderón Carpintero, Jesús Gadea Sáinz, Ángel Rodríguez Sáiz, Sara Gutiérrez González, Lourdes Alameda Cuenca-Romero, Carlos Junco Petrement.

Número de solicitud: **P201300296** Fecha: **27/03/2013**

Número de publicación: **ES2500051A1** Fecha: **29/09/2014**

Denominación: **Procedimiento de obtención de mortero elaborado con melamina reticulada.**

Inventores: Ángel Rodríguez Sáiz, Sara Gutiérrez González, Verónica Calderón Carpintero, Jesús Gadea Sáinz, Carlos Junco Petrement, Javier Garabito López, Lourdes Alameda Cuenca-Romero.

Número de solicitud: **P201300297** Fecha de solicitud: **27/03/2013**

Número de publicación: **ES2499940A1** Fecha: **29/09/2014**



Denominación: **Procedimiento de obtención de yeso aligerado con residuo de poliamida en polvo.**

Inventores: Sara Gutiérrez González, Jesús Gadea Sáinz, Verónica Calderón Carpintero, Ángel Rodríguez Sáiz, Carlos Junco Petrement, Lourdes Alameda Cuenca-Romero, Sara Serna Avendaño.

Número de publicación: **ES2396096B2** Fecha de concesión: **02/09/2013**

Patente de invención concedida con examen previo.

Congresos nacionales e internacionales

Título de la comunicación: **Influencia de dos superplastificantes basados en policarboxilatos y melaminas en las propiedades de morteros de yeso con residuos poliméricos.**

Autores: Sara Gutiérrez González, Lourdes Alameda Cuenca-Romero, Verónica Calderón Carpintero, Ángel Rodríguez Sáiz, Jesús Gadea Sáinz, Javier Garabito López.

Evento: Workshop on Environmental Impact of Buildings Construction.

Entidad organizadora: Escuela Politécnica de la Universidad de Madrid

Lugar y fecha: Madrid (España), Septiembre 2013.

Título de la comunicación: **Obtención de materiales aligerados modificados con polímeros de estructura celular.**

Autores: Verónica Calderón Carpintero, Sara Gutiérrez González, Lourdes Alameda Cuenca-Romero, Yésica Pardo Delgado, Sara Serna Avendaño, Jesús Gadea Sáinz, Ángel Rodríguez Sáiz, Pablo L. Campos Fuentes y Carlos Junco Petrement.

Evento: XVI Jornadas Hispano-Francesas de Química Orgánica

Entidad organizadora: Universidad de Burgos

Lugar y fecha: Burgos (España), Junio 2011.

Título de la comunicación: **Fabricación y caracterización de yesos aligerados con espumas de poliuretano.**

Autores: Lourdes Alameda Cuenca-Romero, Sara Gutiérrez González, Jesús Gadea Sáinz, Ángel Rodríguez Sáiz y Aitor Martín de la Fuente.

Evento: XVI Jornadas Hispano-Francesas de Química Orgánica

Entidad organizadora: Universidad de Burgos

Lugar y fecha: Burgos (España), Junio 2011.

Anexo 2.

Bibliografía



- [1] Productos. Placo Saint – Gobain (2014). www.placo.es
- [2] Directiva Marco de Residuos. Parlamento Europeo y del Consejo. D 2008/98/CE.
- [3] Programa Estatal de Prevención de Residuos 2014-2020. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, Gobierno de España. BOE-A-2014-679.
- [4] Plan Nacional Integral de Residuos de España (PNIR). 2008-2015. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, Gobierno de España. BOE-A-2009-3243.
- [5] UNE-EN 13279-1:2009. Yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción. Parte 1: Definiciones y especificaciones.
- [6] Bustillo, M., Calvo, J.P., Fueyo, L. (2001). «Rocas Industriales. Tipología, aplicaciones en la construcción e industrias del sector». Editorial Rocas y minerales, Madrid, 410 pp.
- [7] De Villanueva, L. (2004). «Evolución histórica de la construcción con yeso». Informes de la Construcción Vol.56, nº 493.
- [8] Bustillo Revuelta, M., Calvo Sorando, J.P. (2005). «Materiales de construcción». Fueyo Editores, Madrid, 148 pp.
- [9] Almagro, A., (2001). «Un aspecto constructivo de las bóvedas en Al-Andalus. Al- Qantara». Revista de estudios árabes, Vol. XXII, pp. 147-170.
- [10] Gárate Rojas, I. (1999). «Artes de los Yesos. Yaserías y estucos». Instituto Español de Arquitectura. Universidad de Alcalá de Henares, 381 pp.
- [11] Salas, J. (2008). «From closed system precasting to the subtle industrialization of building construction: keys to technological change». Informes de la Construcción, Vol.60, 512, 19-34.
- [12] Escrig, C. (2010) «Evolución de los sistemas de construcción industrializados a base de elementos prefabricados de hormigón». Comunicación del Departamento de Resistencia de Materiales y Estructuras a la Ingeniería de la Universidad Politécnica de Ctaluña.
- [13] Maroto, P. (2014). «La placa de yeso laminado como material sostenible». Jornadas sobre materiales aislantes y eficiencia energética. Fundación de la energía (Madrid)
- [14] Código Técnico de la Edificación. DB – HR: "Protección frente al ruido".
- [15] UNE-EN 520:2005+A1. Placas de yeso laminado. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo.



- [16] Asociación Técnica y Empresarial del Yeso (ATEDY) (2014). www.atedyplacayeso.com
- [17] UNE-EN 13950:2006. Transformados de placa de yeso laminado con aislamiento térmico acústico. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo.
- [18] UNE-EN 14190:2006. Transformados de placa de yeso laminado procedentes de procesos secundarios. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo.
- [19] UNE-EN 13915:2009. Paneles transformados con placas de yeso laminado con alma celular de cartón. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo.
- [20] UNE-EN 12859:2012. Paneles de yeso. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo.
- [21] UNE-EN 13815:2012. Productos en staff (yeso fibroso). Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo.
- [22] UNE-EN 14246:2006. Placas de escayola para techos suspendidos. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo.
- [23] UNE EN 15283-1+A1:2009. Placas de yeso laminado reforzadas con fibras: Definiciones, requisitos y métodos de ensayo. Parte 1: Placas de yeso laminado reforzadas con tejido de fibra.
- [24] UNE EN 15283-2+A1:2009. Placas de yeso laminado reforzadas con fibras: Definiciones, requisitos y métodos de ensayo. Parte 2: Placas de yeso laminado con fibras.
- [25] Plastics – the Facts 2013. An analysis of European latest plastics production, demand and waste data. <http://www.plasticseurope.org>
- [26] Calderón, V., Clemente, F., García, J.M., Maya, E., De La Peña, J.L. (2006). «Synthesis and Characterization of New Aromatic Polyamides Bearing Crown Ethers or their Dipodal Counterparts in the Pendant Structure (I): Benzo-12-crown-4 and ortho-bis (2-ethoxyethoxy) benzene». Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry, vol 44, 2006, 2270 – 2281.
- [27] Beal, V., Paggi, R., Salmoria, G., Lago, A. (2009). «Statistical Evaluation of Laser Energy Density Effect on Mechanical Properties of Polyamide Parts Manufactured by Selective Laser Sintering». Wiley InterScience. www.interscience.wiley.com
- [28] Goodridge, R., Tuck, C., Hague, R. (2011). «Laser sintering of polyamides and other polymers». Progress in Materials Science 57, 229–267.
- [29] Gadea, J., Calderón, V., Rodríguez, A., Garabito J., Campos, P.L., Gutiérrez-González, S. Patente: Procedimiento de obtención de



- yeso aligerado con residuos de poliuretano espumado. Universidad de Burgos. (2013). Nº de publicación: ES 2 381 726 A1
- [30] Gutiérrez González, S., Gadea, J., Calderón, V., Rodríguez, A., Junco, C., Alameda, L., Serna, S. Patente: Procedimiento de obtención de yeso aligerado con residuos de poliamida en polvo. Universidad de Burgos. (2013). Nº de publicación: ES 2396096A1.
- [31] Del Río Merino, M., Hernández Olivares, F. (1998). «Escayola aligerada con sólidos celulares». Informes de la Construcción Vol.50, nº458. 43-60.
- [32] Rojas Gomáriz L. Patente: Revestimiento ignífugo aplicable en la edificación. (2000). Nº de publicación: ES 2 141 002 A1.
- [33] Placo Saint-Gobain. YPM/A (Proyal XXI, Prolite, Perlinor de Proyectar).
- [34] Peresztegi, D. (1979). «High strength lightweight building blocks». Chem. Abstr 91, 95776.
- [35] Manjit S., Mridul G. (1991). «Perlite based building materials a review of current applications». Construction & Building Materials Vol. 5, nº2, 75-81.
- [36] Yongguang, X., Tongjiang, P., Haifeng, L., Jiming, C. (2011). «Preparation and properties of expanded vermiculite/gypsum thermal insulation boards». Adv Mater Res 178, 220–225.
- [37] Román Alema, B. Patente: Mortero de yeso con vermiculita expandida y aditivado, y procedimiento para su obtención. (2010). Nº de publicación: WO 2009121984 A1.
- [38] Hernández-Olivares, F., Bollati, M.R., Del Río, M., Parga - Landa, B. (1999). «Development of cork-gypsum composites for building applications». Construction and Building Materials nº13, 179 - 186.
- [39] Agulló, L., Aguado, A., García, T. (2006). «Study of the use of paper manufacturing waste in plaster composite mixtures». Build Environ 41, 821–827.
- [40] González Madariaga, F.J., Lloveras Macia. J. (2008). «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, 35 – 43.
- [41] Karaman, S., Şahin, S., Günal, H., Örüng, I. (2006). «Stabilization of waste pet bottles with gypsum». J Appl Sci 6 (5), 1119–1122.
- [42] Gutiérrez-González, S., Gadea, J., Rodríguez, A., Junco, C., Calderón, V. (2012). «Lightweight plaster materials with enhanced thermal properties made with polyurethane foam wastes». Construction and Building Materials 28, 653 - 658.



- [43] Eve, S., Gomina, M., Jernot, J.P., Ozouf, J.C., Orange, G. (2007). «Microstructure characterization of polyamide fibre/latex-filled plaster composites». *J Eur Ceram Soc*, 27, 17-25.
- [44] Gutiérrez González, S., Gadea, J., Rodríguez, A., Blanco-Varela, V., Calderón, V. (2012). «Compability between gypsum and polyamide powder waste to produce lightweight plaster with enhanced thermal properties». *Construction and Building Materials* nº34, 179 - 185.
- [45] Gutiérrez-González, S., Gadea, J., Rodríguez, A., Alonso, M.M., Calderón, V. (2012). «Rheological behaviour of gypsum plaster pastes with polyamide powder waste» *Construction and Building Materials* 38, 407 - 412.
- [46] Rodríguez, A., Gutiérrez-González, S., Horgnies, M., Calderón, V. (2013). «Design and properties of plaster mortars manufactured with ladle furnace slag». *Materials and Design* 52, 987–994.
- [47] Adán, I., Calderón, V., Gadea, J., Rodríguez, A., Gutiérrez González, S., Alameda, L., Junco, C. Patente: Procedimiento de obtención de morteros de yeso de construcción con fracciones de rechazo de piedra artificial tipo cuarzo triturado. Número de publicación: ES2500051A1.
- [48] Khalil, A., Tawfik, A., Hegazy, A., El-Shahat, M.. (2014). «Effect of some waste additives on the physical and mechanical properties of gypsum plaster composites». *Construction and Building Materials* 68, 580–586.
- [49] Del Río Merino, M., Hernández Olivares, F. (2004). «Escayola aligerada: propuestas alternativas a la adición de sólidos celulares». *Materiales de Construcción* Vol.54, nº275. 65-76.
- [50] Jobbins, Richard M. Patente: Composiciones de yeso de bajo peso. (2002). Nº de publicación: ES 2 178 407 T3.
- [51] Méndez, Y. Patente: Ladrillo prefabricado para la construcción. (2005). Nº de publicación: ES 2 211 312 B1.
- [52] Yutaka, W., Masaharu, N. (1976). «Gypsum based nonflammable lightweight plate». *Japan Kokai Tokkyo Koho* 760 4, 213 (Cl. Co 4B, B 28B)
- [53] Yashushi, M., Yoshinobu, O., Yoshinobu, F. (1980). «Lightweight gypsum panels». *Chem. Abstr* (1980), 92. 134173.
- [54] Mushashi Susumu. (1988). «Fire resistant building boards with improved humidification and dehumidification property». *Japan*.
- [55] Placo Saint-Gobain. (Placo Phonique, Placoflam).



- [56] Baux, C., Mélinge, Y., Lanos, C., Jauberthie, R. (2008). «Enhanced Gypsum Panels for Fire Protection». *Journal of Materials in Civil Engineering*. Vol. 20, 71-77.
- [57] Del Río Merino, M., Santa Cruz Astorqui, J., Hernández Olivares, F. (2005). «New prefabricated elements of lightened plaster used for partitions and extrados». *Construction and Building Materials* 19, 487 – 492.
- [58] Del Río Merino, M., Santa Cruz Astorqui, J., Hernández Olivares, F. Patente: Yeso aligerado con corcho y su aplicación en paneles para la construcción. Universidad Politécnica de Madrid. (2002). Nº de publicación: ES 2170612 A1
- [59] Haselein, C., Calegari, L., Alberti, L., Minello, A., Anaximandro da Silva, P., Figueredo, R. (2002). «Manufacturing gypsum-bonded-particleboard with recycled paper and pine wood particles». *Ciencia Forestal* Vol.12, nº1, 81-88.
- [60] Villaplana Sánchez, J. Patente. Procedimiento de fabricación de placas para la construcción. (2005). Nº de publicación. ES 2242535A1.
- [61] Kossatz, G., Sattler, H., Kammerer, R., Sachs, H., Schäpel, D. Patente: Placas de yeso reforzadas. (1992). Nº de publicación: ES 2 028 002 T3.
- [62] Englert, M. Patente: Proceso para la fabricación de productos de yeso y fibra de madera que tienen resistencia al agua mejorada. (2005). Nº de publicación: ES 2 224 289 T3.
- [63] Song, W. Patente: Producto de fibra de madera y yeso que tiene una resistencia al agua mejorada. (2003). Nº de publicación: ES 2 191 209 T3.
- [64] Tounchuen, K., Buggakupta, W., Panpa, W. (2014). «Characteristics of Automotive Glass Waste-Containing Gypsum Bodies Made from Used Plaster Mould». *Key Engineering Materials*, Vol. 608, pp 91-96.
- [65] Rangavar, h., Khosro, KH., Payan, m., Soltani, A.. (2014). «Study on the possibility of using vine stalk waste (vitis vinifera) for producing gypsum particleboards». *Mechanics of Composite Materials*, Vol. 50, No. 4.
- [66] Favoino, F., Perino, M., Serra, V. (2012). «Improving thermal performance of plasters by means of recycled and phase change materials». 10th International Conference on Healthy Buildings. Brisbane, Australia.
- [67] Oliver Ramírez, A., Neila González, F.J., García Santos, A. (2010). «Caracterización térmica de placas de yeso con material de



- cambio de fase incorporado». *Materiales de Construcción* Vol.62, nº 519, 55 - 66.
- [68] Neila González, J., Oliver Ramírez, A., García Santos, A. Patente: Elemento constructivo con matriz yeso o escayola. Universidad Politécnica de Madrid. (2011). Nº de publicación: ES 2 346 282 A1.
- [69] González Madariaga, F.J. (2005). Tesis Doctoral: Caracterización de mezclas de residuos de Poliestireno expandido (EPS) conglomerados con yeso o escayola, su uso en la construcción. Universidad Politécnica de Cataluña
- [70] Lloveras Macià J, González Madariaga F.J. Patente: Mezclas de yeso o escayola aligeradas con gránulos de plástico expandido. (2008). Nº de publicación: ES 2 277 776 B1.
- [71] García Santos, A. (2004). «Caracterización de compuestos de escayola reforzados, en relación con el tipo de refuerzo y la relación A/Y». *Informes de la Construcción* Vol.56 nº 493, 19 - 32.
- [72] García Santos, A. (2009). «Escayola reforzada con fibras de polipropileno y aligerada con perlas de poliestireno expandido». *Materiales de Construcción* Vol.59, nº 293, 105 – 124
- [73] García Santos, A. Patente: Material de construcción de yeso o escayola aligerado y su uso en placas y paneles. Universidad Politécnica de Madrid. (2009). Nº de publicación: ES 2 292 309 B2.
- [74] Melo, M.O.B.C, Da Silva, L.B., Coutinho A.S., Sousa, V., Perazzo, N. (2012) «Energy efficiency in building installations using thermal insulating materials in northeast Brazil». *Energy Buildings* 47, 35-43.
- [75] de Oliveiral,M., Barbosal, N., Torres, S., Leal, A., Silva, C. (2012). «Gypsum-based composites with EVA waste and vermiculite». *Revista Brasileña de Ingeniería Agrícola y ambiental* Vol.16, nº6,
- [76] Alberti Barbera, R. Patente: Pieza para la construcción. (1985). Nº de publicación: ES 284858.
- [77] Lakraflı, H., Tahiri, S., Albizane, A., Bouhria, M., El Otmani, M.E..(2013). «Experimental study of thermal conductivity of leather and carpentry wastes». *Construction and Building Materials* 48, 566–574
- [78] Mayor, P., Bustamante, R., Rangel, C., Hernández Olivares, F. (2008). «Propiedades térmicas, acústicas y mecánicas de placas de morteros yeso-caucho». II Jornadas de Investigación en Construcción. Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, CSIC.
- [79] Serna, A., Del Río, M., Palomo, J.P., González, M. (2012). «Improvement of gypsum plaster strain capacity by the addition of rubber particles from recycled tyres». *Construction and Building Materials*, nº35, 633-641.



- [80] Herrero, S., Mayor, P., Hernández-Olivares, F. (2013) «Influence of proportion and particle size gradation of rubber from end-of-life tires on mechanical, thermal and acoustic properties of plaster-rubber mortars». *Materials and Design* 47, 633-642.
- [81] Jiménez, A., de Guzmán, A., García, J. (2014). «New composite gypsum plaster-ground waste rubber coming from foam insulation». *Construction & Building Materials*, nº55, 146-152
- [82] UNE-EN 1936:2007. Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la densidad real y aparente y de la porosidad abierta y total.
- [83] UNE-EN 13279-2: 2006. Yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción. Parte 2: Métodos de ensayo.
- [84] UNE-EN 102042:2013. Yesos y escayolas para la construcción. Otros métodos de análisis.
- [85] RILEM TC 25-PEM:1980. Recommended test to measure the deterioration of stone and to assess the effectiveness of treatment methods. *Protection and Erosion of Monuments*.
- [86] UNE-EN 1015-19:1999/A1. Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 19: Determinación de la permeabilidad al vapor de agua de los morteros endurecidos de revoco y enlucido.
- [87] UNE-EN 12667: 2002. Determinación de la resistencia térmica por el método de la placa caliente y el método del medidor de flujo de calor. productos de alta y media resistencia térmica.
- [88] UNE-EN ISO 1182:2011. Ensayos de reacción al fuego de productos. Ensayo de combustibilidad.
- [89] www.aguasdeburgos.com. Análisis agua tratada 2013.
- [90] Gutiérrez González, Sara. (2012). Tesis Doctoral: Yesos aligerados fabricados a partir de residuos de espumas de poliuretano y polvo de poliamida. Universidad de Burgos.
- [91] Zhao, K., Li, J., Wang, F. «Experimental study on local compression of concrete-filled glass fiber reinforced gypsum wall panel». *Advance materials research*. (2013). Vols.671-674, pp. 668-673
- [92] Li M., Wu Z., Chen M.. «Preparation and properties of gypsum-based heat storage and preservation material». *Energy Build* (2011), 43, 2314-2319.
- [93] Yu, Q.L., Brouwers H.J.H. «Thermal properties and microstructure of gypsum board and its dehydration products: A theoretical and experimental investigation». *Fire and Materials* (2012), 36:575-589
- [94] Šeputytė-Jucikė , J., Arsenij , G., Sinicaa, M., Kligysa, M., Vaitkusa, S. «Impact of granules from crushed expanded polystyrene package



- on properties of thermoinsulating plasters». *Journal of Civil Engineering and Management* (2014), 20:581–589
- [95] Muñoz, A., Chejne, F., Espinel, J., Londoño, C. «Evaluation of the cellulose of paper and coal ashes, like alternative insulating materials». *Dyna rev.fac.nac.minas* (2006), v 73 n 148:1–8
- [96] Carvalho, M.T.M., Leles, M. I. G., Tubino R. M. C.« TG and DSC studies on plaster residues as recycled material». *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Vol. 91 (2008) 2, 621–625
- [97] Alonso, J.A., Reyes, E., Gálvez, J.C. (2011). «Caracterización del comportamiento en fractura de paneles sándwich de Placas de yeso laminado y lana de roca». *Anales de Mecánica de la Fractura* 28, Vol.1.
- [98] La Placa de Yeso Laminado. Placo Saint –Gobain (2014) www.placo.es
- [99] García Santos, A. (2009). Patente: Material de construcción de yeso o escayola aligerado y su uso en placas y paneles. Universidad Politécnica de Madrid. Nº de publicación: ES 2 292 309 B2.
- [100] Mayor, P., Bustamante, R., Rangel, C., Hernández Olivares, F. (2008). «Propiedades térmicas, acústicas y mecánicas de placas de morteros yeso-caucho». II Jornadas de Investigación en Construcción. Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, CSIC.
- [101] Oliver Ramírez, A., García Santos, A., Neila González, F.J. (2011). «Caracterización física y mecánica de placas de yeso con materiales de cambio de fase incorporados para almacenamiento de energía térmica mediante calor latente». *Materiales de Construcción* Vol.61, nº 303, 465 - 484.
- [102] UNE-EN 13238:2011. Ensayos de reacción al fuego para productos de construcción. Procedimiento de acondicionamiento y reglas generales para la selección de sustratos.
- [103] UNE-EN 13501-1:2007+A1:2010. Clasificación en función del comportamiento frente al fuego de los productos de construcción y elementos para la edificación. Parte 1: Clasificación a partir de datos obtenidos en ensayos de reacción al fuego.
- [104] UNE-EN ISO 1716:2011. Ensayos de reacción al fuego de productos. Determinación del calor bruto de combustión (valor calorífico). (ISO 1716:2010)
- [105] UNE-EN 13823:2012. Ensayos de reacción al fuego de productos de construcción. Productos de construcción, excluyendo revestimientos de suelos, expuestos al ataque térmico provocado por un único objeto ardiendo.



- [106] Código Técnico de la Edificación. DB – SI: “Seguridad en caso de incendio”.
- [107] Coquard, P., Boistelle, R., Amathieu, L., Barriac, P. (1994). «Hardness, elasticity modulus and flexion strength of dry set plaster». *Journal of Material Sciences*. Vol. 29, 4611-4617.
- [108] Ali, M.A., Grimer, F.J. (1969). «Mechanical properties of glass fibre reinforced gypsum». *Journal of Material Science*. Vol. 4, No. 5, 389-395.
- [109] Dalmay, P., Smith, A., Chotarnd, T., Sahay-Yurner, P., Gloaguen, V., Knausz, P.. (2010) «Properties of cellulosic fibre reinforced plaster: influence of hemp or flax fibres on the properties of set gypsum». *J Mater Sci* 45:793-803.
- [110] De Oteiza San José, I. (1993). «Estudio del comportamiento de la escayola reforzada con fibras de sisal, para componentes en viviendas de bajo coste». *Informes de la Construcción*. Vol. 45, nº425-426.
- [111] García Santos, A. (2004). «Aplicaciones constructivas de un material compuesto de escayola y fibras naturales de *Typha Latifolia*». *Materiales de Construcción* Vol.54 nº 273, 73 - 77.
- [112] García Santos, A. Patente: Placas de escayola o yeso para su uso en construcción. (2004). Nº de publicación: ES 2 199 680 A1.
- [113] Faus, A., González, L., Franch, V., Martínez, R., Yuste, J., Sabater, J.V., Tarazona, D. Patente: Panel ligero de yeso y coco, y procedimiento de fabricación. (2012). Nº de publicación: ES 2 385 587 A1.
- [114] Reinhardt, H-W. Aicher, S. (2008). «Cellulose fiber gypsum boards and wall panels under cyclic loading». American Concrete Institute (ACI) Spring Convention. Los Angeles. United States.
- [115] Reinhardt, H-W., Finn, R., Aicher, S. (2006). «Static and dynamic response of cellulose fibergypsum-board wall elements». 8th International Symposium on Brittle Matrix Composites (BMC), Warsaw, Poland.
- [116] Del Río Merino, M., Comino, P. (2002). «Análisis de los refuerzos mixtos de fibras de vidrio E y fibras AR en la escayola, como alternativa a los refuerzos monofibras (homogéneos)». *Materiales de Construcción* Vol.52, nº268.
- [117] Del Río Merino, M., Hernández Olivares, F., Comino Almenara, P. (2004). «Estado del arte sobre el comportamiento físico-mecánico de la escayola reforzada con fibras de vidrio E». *Informes de la Construcción* Vol.56, nº493.



- [118] Del Río Merino, M., Comino, P. (2001). «Influencia del grado de dispersabilidad de la fibra de vidrio E en el comportamiento mecánico y la trabajabilidad de la escayola» *Materiales de Construcción* Vol.51, nº261.
- [119] Singh, M., Garg, M. (1991). «Glass Fibre Reinforced Water-Resistant Gypsum- Based Composites». *Cement and Concrete Composites*, nº14, 23-32.
- [120] Singh, M., Garg, M. (1994). «Gypsum-based fibre-reinforced composites: an alternative to timber». *Construction and building materials*, Vol.8, nº3, 155-160.
- [121] Evans, T.J., Majumdar A.J., Ryder, J.F. (1981) «A semi-dry method for the production of lightweight glass-fibre-reinforced gypsum». *The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, Vol. 3, Number 1, 41-44.
- [122] Yue, J.-W., Jiang, X.-L., Gu, Y. (2006). «Mechanical behavior of glass fiber reinforced gypsum panels». *Journal of Xi'an University of Architecture and Technology*. Vol. 38, Issue 5, 639-645.
- [123] García Santos, A. (1988). «Comportamiento mecánico de yeso reforzado con polímeros sintéticos». *Informes de la Construcción* Vol.40 nº 397.
- [124] Eve, S., Gomina, M., Orange, G. (2004). «Effects of polyamide and polypropylene fibres on the setting and the mechanical properties of plaster». *Key Engineering Materials*, Vol. 264-268, 2531-2536.
- [125] Deng, YH., Furuno, T. (2001) «Properties of gypsum particleboard reinforced with polypropylene fibers». *J Wood Sci* 47:445-450.
- [126] Eve, S., Gomina, M., Hamel, J., Orange, G. (2006). «Investigation of the setting of polyamide fibre/latex-filled plaster composites». *J Eur Ceram Soc*, 26, 2541-2546.
- [127] Parres, F., Crespo Amorós, J.E., Nadal-Gisbert, A. (2009). «Mechanical properties analysis of plaster reinforced with fiber and microfiber obtained from shredded tires». *Construction and Building Materials* nº23, 3182 - 3188.
- [128] Gencela, O., del Coz Diaz, J.J., Sutcuç, M., Koksald, F.T., Alvarez Rabanalb, F.P., Martínez-Barrerae, G., Brostowf, W. (2014). «Properties of gypsum composites containing vermiculite and polypropylene fibers: Numerical and experimental results». *Energy and Buildings* Volume 70, 135–144.
- [129] Eve, S., Gomina, M., Hamel, J., Orange, G. (2006). «Investigation of the setting of polyamide fibre/latex-filled plaster composites». *Journal for European Ceramic Society*, 26, 2541-2546.



- [130] Aulia, T. B.. (2002) «Effects of polypropylene fibres on the properties of high strength concretes». Lacer Vol. 7, pp. 43-59.
- [131] Aghazadeh, J., Sangghalehb, A., Nazaric, A., Pourjavada, N. (2011). « Analytical modeling of strength in randomly oriented PP and PPTA short fiber reinforced gypsum composites ». Computational Materials Science Volume 50, Issue 5, Pages 1619–1624.
- [132] Jarabo, R., Fuente, E., Monte M.C. , et all. (2012). «Use of cellulose fibers from hemp core in fiber-cement production. Effect on flocculation, retention, drainage and product properties». Industrial Crops and Products Volume 39, Pages 89–96.
- [133] Alonso, A. Reyes, E., Gálvez, J.C. .(2013). «Study of the cracking of sandwich panels of plasterboard and rockwool». Materiales de Construcción Vol. 63, 311, 403-421
- [134] Binici, H., Aksogan, O., Nuri Bodur, M., Akca, E., Kapur, S. (2007). « Thermal isolation and mechanical properties of fibre reinforced mud bricks as wall materials». Construction and Building Materials 21 (2007) 901–906
- [135] Las Clases de Confort Acústico. Isover Saint – Gobain (2014). www.isover.es
- [136] Código Técnico de la Edificación. DB – HE: “Ahorro de energía”.
- [137] Guía Placo. Soluciones innovadoras en yeso. Placo Saint-Gobain (2014). www.placo.es
- [138] Del Rio Merino, M.. «Nuevas aplicaciones del corcho en el campo de la edificación». Ponencia Encuentro Eurocork 2005 , Huelva (España).
- [139] Hernández-Olivares, F., Bollati, M.R.,del Rio, M.,B-Parga Landa. (1999) «Development of cork-gypsum composites for building applications». Construction and building materials 13.
- [140] Frías, M., Jiménez-Mateos, J.M., Pfrezschner, J., Olmeda, J., Rodríguez, R.M., Sánchez Rojas, M.I., (2011)«Development of blend cement mortar with acoustic properties using petroleum coke». Construction and building materials 25, 1086-1092.
- [141] UNE-EN 20140-10:1994. Acústica. Medición de aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción.
- [142] UNE-EN ISO 354:2004. Acústica. Medición de la absorción acústica en una cámara reverberante.
- [143] REAL DECRETO 110/2008, de 1 de febrero, por el que se modifica el Real Decreto 312/2005, de 18 de marzo, por el que se aprueba la clasificación de los productos de construcción y de los elementos



constructivos en función de sus propiedades de reacción y de resistencia frente al fuego.

- [144] Asociación europea de fabricantes de productos a base de yeso "Eurogypsum" (2014). <http://www.eurogypsum.org>
- [145] Gremio de Entidades del Reciclaje de Derribos (GERD).(2013)
- [146] Ahmed, A.,Ugai, . (2011) «Environmental effects on durability of soil stabilized with recycled gypsum». Cold Regions Science and Technology 66, 84-92.
- [147] Godinho-Castro, A., Testolin, R., Janke, L., Corrêa, A., Radetski,, C. (2012). «Incorporation of gypsum waste in ceramic block production: Proposal for a minimal battery of tests to evaluate technical and environmental viability of this recycling process». Waste Management Volume 32, Issue 1, Pages 153–157.
- [148] Proyecto GTOG (From Production to Recycling: A Circular Economy for the European Gypsum Industry with the Demolition and Recycling Industry) (2013-2015). Comisión Europea. Programa Life+ 2011.
- [149] Proyecto piloto para cerrar el ciclo de vida de las placas de yeso laminado: el caso de Hostería Grau, Barcelona. (2013). Knauf GmbH Sucursal en España.
- [150] UNE-EN 933-1:2012. Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 1: Determinación de la granulometría de las partículas. Método del tamizado.
- [151] Ahmed, A. (2013). «Recycled bassanite for enhancing the stability of poor subgrades clay soil in road construction projects». Construction and Building Materials 48,151-159.
- [152] Ahmed, A.,Ugai, K.,Kamei, T.. (2011) «Environmental Evaluation for Clayey Soil Stabilized with Gypsum Waste Plasterboard in Japan». Advances in Unsaturated Soil, Geo-Hazard, and Geo-Environmental Engineering: pp. 9-17.
- [153] Gyptec IBÉRICA-Gessos Técnicos, S.A. www.gyptec.eu