UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE EDIFICACIÓN

Programa de Doctorado Innovación Tecnológica en Edificación

Caracterización de compuestos eco-eficientes de yeso aligerado
con residuo de poliestireno extruido (XPS)

Tesis Doctoral

Alicia de San Antonio González – Máster Oficial en Técnicas y Sistemas de Edificación

Directora: Mercedes del Río Merino – Doctora Arquitecta

Codirectora: Carmen Viñas Arrebola – Doctora en Ciencias Físicas

Madrid, 2017

TESIS DOCTORAL

TÍTULO: “Caracterización de compuestos eco-eficientes de yeso aligerado con residuo de poliestireno extruido”

Tribunal nombrado por el Sr. Rector Magfco. De la Universidad Politécnica de Madrid, el día.....de.....de 2017.

Presidente

D/Dª _____

Vocales

D/Dª _____

D/Dª _____

D/Dª _____

Secretario

D/Dª _____

Realizado el acto de defensa y lectura de la Tesis el día_____de_____de_____en la Escuela Técnica Superior de Edificación, acuerda otorgarle la calificación de:

EL PRESIDENTE

LOS VOCALES

EL SECRETARIO

FINANCIACIÓN

Esta Tesis Doctoral ha sido apoyada en su realización con financiación procedente de:

- El Ministerio de Economía, Industria y Competitividad mediante el Programa Estatal de I+D+i orientado a los retos de la sociedad y en concreto a través del proyecto:

“De residuos a recursos: Valorización integral de los residuos generados en la rehabilitación energética de edificios” (BIA2013-43061-R)

- La Escuela Técnica Superior de Edificación de la Universidad Politécnica de Madrid y la empresa Farraús a través del proyecto:

“Procesos para la reducción de la densidad del yeso y la mejora de sus prestaciones térmicas y acústicas con aplicación en la fabricación de prefabricados” (P125405011)

- El Consejo Social de la Universidad Politécnica de Madrid mediante sus ayudas de internacionalización de doctorandos y en concreto a través de la estancia en el Trinity College Dublin en el periodo abril-junio de 2013.

AGRADECIMIENTOS

Quiero dar las gracias a todas las personas que me han acompañado a lo largo del desarrollo de mi Tesis Doctoral, y de forma especial:

A Mercedes del Río y Carmen Viñas, mis directoras de Tesis, por su ayuda y su apoyo. Gracias por haberme abierto el camino hacia la investigación y no dejar que me rinda.

A Gabriel Palomo, por transmitirme su entusiasmo por la estadística y las cosas bien hechas y por ayudarme a encontrarle el sentido a todos los datos que he manejado.

A David Caballol, por ayudarme con los ensayos para obtener el coeficiente de absorción acústica.

Al personal de laboratorio de la Escuela Técnica Superior de Edificación, y en especial a Santiago Villa y Emilia Blasco. Gracias por vuestra ayuda y consejos, sois increíbles.

A Sara Pavia, por facilitarme la estancia en el Trinity College Dublin de Irlanda y permitirme conocer la investigación sobre materiales de construcción desde un punto de vista un poco más químico.

A la Asociación Técnica y Empresarial del Yeso (ATEDY) por ayudarme a difundir mi encuesta y también a todos los expertos que de forma desinteresada me ayudaron contestándola.

A Ángel Rodríguez Saiz, del Departamento de Construcciones Arquitectónicas e I.C.T. de la Universidad de Burgos por ayudarme obteniendo las imágenes al microscopio.

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

A mis compañeras de doctorado Pepa, Sonia y Paola, vosotras sabéis lo duro que es el proceso y lo necesario que es contar con compañeras a lo largo del camino.

Y a toda mi familia, en especial:

A Alex, por tu apoyo y por haberme aguantado siempre que estaba estresada, sé que siempre has compartido la carga conmigo. Eres el mejor.

A mi hermana, por alegrarte por todos mis avances. Tú me das la confianza que siempre me ha faltado.

Y finalmente, gracias a mis padres. Siempre habéis hecho lo imposible para que de lo mejor de mí y me habéis apoyado en todas mis decisiones. Quiero que sepáis que todo os lo debo a vosotros y por eso os lo dedico. Os quiero.

RESUMEN

En España, el sector residencial es una de las actividades que menos ha evolucionado en los últimos años y que además tiene un mayor impacto ambiental, ya que contribuye en gran medida al consumo de recursos naturales y energía y a la generación de residuos. Una de las estrategias para modernizar este sector y a la vez reducir su impacto ambiental, es la actualización de los materiales tradicionales mediante el diseño de nuevos materiales eco-eficientes, que minimicen la explotación de recursos naturales, que ayuden a reducir el consumo de energía y que generen menor cantidad de residuos o ayuden a reducirlos.

Por ello, el objetivo de esta Tesis Doctoral es ayudar a reducir el impacto ambiental del sector residencial mediante el diseño de un nuevo material eco-eficiente a partir de un compuesto de yeso al que se le incorpora residuo de poliestireno extruido proveniente de obras de construcción, con el propósito de obtener un material aligerado con propiedades térmicas mejoradas, a la vez que se reutiliza un residuo de construcción que de otra forma sería eliminado en vertedero o incinerado.

Para el diseño de este material eco-eficiente se ha utilizado una metodología en la que se ha llevado a cabo un plan experimental para caracterizar los compuestos de yeso aligerados con residuo de poliestireno extruido. En este plan experimental se han incluido ensayos para determinar las propiedades físicas, mecánicas, frente al agua, térmicas y acústicas. Los resultados se han analizado estadísticamente mediante un análisis de la varianza y se han comparado con los resultados de otros compuestos de yeso aligerados.

Por otra parte, se ha diseñado un índice de aligeramiento eco-eficiente que permite seleccionar los compuestos óptimos para una aplicación concreta. Una vez seleccionados los compuestos óptimos se ha evaluado su comportamiento térmico en sus aplicaciones para tres sistemas constructivos diferentes mediante simulación numérica.

De los resultados obtenidos se ha observado que es posible aligerar los compuestos de yeso con residuo de poliestireno extruido, consiguiendo además mejorar el comportamiento térmico del compuesto final. De la comparación de las propiedades de este compuesto con compuestos de yeso aligerados con otros agregados, se ha observado que aunque en general la reducción de densidad de un compuesto de yeso conlleva considerables pérdidas de resistencia, en comparación con los otros agregados ligeros el compuesto de yeso aligerado con residuo de poliestireno extruido destaca porque la relación existente entre su reducción de densidad y la pérdida de dureza superficial, resistencia a flexión y adherencia superficial es bastante mejor que para el resto de agregados ligeros. Además, los compuestos con residuo de poliestireno extruido destacan por su elevada resistencia frente al agua y por su buena trabajabilidad en el amasado.

Por otra parte, gracias al índice de aligeramiento eco-eficiente se han obtenido los compuestos óptimos para tres aplicaciones: revestimiento, prefabricado para tabiques y prefabricado para falso techo. De su incorporación en tres sistemas constructivos mediante simulación numérica se ha observado que el uso del compuesto de yeso aligerado con residuo de poliestireno extruido permite aumentar la resistencia térmica de la envolvente de las viviendas.

SUMMARY

In Spain, construction sector has not practically evolved in the last years and it has a great environmental impact, as it contributes to the consumption of natural resources and energy and to the generation of waste. One of the strategies to modernize this sector and at the same time to reduce its environmental impact, is to update traditional materials by designing new eco-efficient materials that minimize the exploitation of natural resources, help reducing energy consumption and decrease waste generation.

Therefore, the objective of this Doctoral Thesis is to help reducing the environmental impact of the construction sector by designing a new eco-efficient material from a gypsum composite with extruded polystyrene waste. With the purpose of obtaining a lightened material with improved thermal properties, while reusing a construction waste that would otherwise be disposed of in landfill or incinerated.

For the design of this eco-efficient material a methodology has been used in which an experimental plan has been carried out to characterize lightweight gypsum composites with extruded polystyrene waste by their physical, mechanical, water resistance, thermal and acoustic properties. Results have been statistically analysed by analysis of the variance and have been compared with the results obtained by using other lightweight aggregates.

On the other hand, an eco-efficient lightweight index has been designed to select the optimal eco-efficient lightweight composites for a specific application. Once the optimal composites have been selected, their thermal behaviour has been evaluated by numerical simulation in three different construction systems.

From the results obtained, it has been observed that it is possible to reduce density and improve thermal behaviour of gypsum composites by incorporating extruded polystyrene waste. From the comparative analysis, it has been observed that in general the reduction of density of gypsum composite entails a considerable strength decrease. However, in comparison with other lightweight aggregates, gypsum composites with extruded polystyrene waste can be highlighted as their relationship between density reduction and the decrease of surface hardness, flexural strength and surface adhesion is much better than for the rest of the lightweight aggregates. In addition, composites with extruded polystyrene waste are notable for their high water resistance and good workability.

The eco-efficient lightweight index has been used to obtain the optimal composites for three applications: plastering, partitions and false ceiling. These applications have been introduced in the three construction systems and thermal behaviour has been analysed through numerical simulation. From this, it has been observed that the use of lightweight gypsum composites with extruded polystyrene waste allows to increase thermal resistance of the building envelope.

ÍNDICE

RESUMEN.....	VIII
SUMMARY	IX
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	3
1.1 EL CONSUMO DE ENERGÍA	3
1.1.1 Problemática derivada del uso y transformación de la energía.....	6
1.1.2 La eficiencia energética	8
1.1.3 Marco normativo referente a la eficiencia energética	10
1.2 EL POLIESTIRENO EXTRUIDO	12
1.2.1 El consumo de polímeros sintéticos.....	15
1.2.2 Los procesos de recuperación y reciclaje del poliestireno extruido.....	16
1.2.3 Problemática derivada del consumo de polímeros sintéticos	17
1.2.4 Marco normativo referente al poliestireno extruido.....	19
1.3 LOS RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN	19
1.3.1 Generación de residuos	23
1.3.2 La gestión de los residuos	26
1.3.3 Problemática derivada de la generación de residuos	27
1.3.4 Buenas prácticas de gestión de residuos	28
1.3.5 Marco normativo referente a la gestión de residuos.....	31
1.4 EL YESO COMO MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN.....	34
1.4.1 Fabricación del yeso	36
1.4.2 Aplicaciones del yeso en la construcción.....	40
1.4.3 El consumo de yeso en la construcción.....	45
1.4.4 Problemática derivada del consumo de yeso	46
1.4.5 Marco normativo referente al yeso de construcción	47
1.5 CONCLUSIONES PARCIALES	49
1.6 TRABAJOS CITADOS.....	50
CAPÍTULO 2. ESTADO DE LA CUESTIÓN.....	59
2.1 ESTUDIOS SOBRE LA INCORPORACIÓN DE ADITIVOS EN COMPUESTOS DE YESO	59
2.2 ESTUDIOS SOBRE LA INCORPORACIÓN DE RESIDUOS EN COMPUESTOS DE YESO	64
2.3 ESTUDIOS SOBRE EL USO DE POLIESTIRENO EXTRUIDO EN COMPUESTOS DE YESO	67
2.4 CONCLUSIONES PARCIALES	68
2.5 TRABAJOS CITADOS.....	69
CAPÍTULO 3. JUSTIFICACIÓN DE LA TESIS	79
3.1 NECESIDAD DE DISEÑAR MATERIALES CON MEJOR COMPORTAMIENTO TÉRMICO	79
3.2 NECESIDAD DE BUSCAR ESTRATEGIAS PARA REUTILIZAR EL RESIDUO DE XPS.....	79
3.3 NECESIDAD DE OPTIMIZAR EL YESO COMO MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN ACTUAL	80
CAPÍTULO 4. OBJETIVOS DE LA TESIS	85
CAPÍTULO 5. MÉTODOLÓGÍA	89
5.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS RESIDUOS DE XPS	89
5.1.1 Procedimiento de segregación del residuo	89
5.1.2 Formato adecuado del agregado	90
5.1.3 Caracterización del residuo.....	90
5.1.4 Ensayos realizados	90
5.2 CARACTERIZACIÓN DE COMPUESTOS DE YESO CON RESIDUO DE XPS	92
5.2.1 Plan experimental.....	93
5.2.2 Confección de probetas	96
5.2.3 Denominación de los compuestos	98
5.2.4 Ensayos realizados	99

5.2.5	Materiales utilizados	111
5.2.6	Análisis estadístico	115
5.3	ANÁLISIS COMPARATIVO CON OTROS AGREGADOS LIGEROS	115
5.3.1	Búsqueda bibliográfica	116
5.3.2	Caracterización de compuestos de yeso con otro agregado ligero	116
5.3.3	Análisis comparativo de los resultados obtenidos	116
5.4	ÍNDICE DE ALIGERAMIENTO ECO-EFICIENTE	116
5.4.1	Cálculo del valor de mejora de las variables	117
5.4.2	Estandarización de los valores de mejora de las variables	117
5.4.3	Ponderación de los valores de mejora estandarizados de las variables	117
5.5	ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO POR SIMULACIÓN NUMÉRICA.....	119
5.5.1	Modelo de referencia.....	119
5.5.2	Modelos escenario	121
5.5.3	Análisis energético	121
5.6	TRABAJOS CITADOS	121
CAPÍTULO 6.	CARACTERIZACIÓN DE LOS RESIDUOS DE XPS.....	125
6.1	PROCEDIMIENTO DE OBTENCIÓN DEL RESIDUO DE POLIESTIRENO EXTRUIDO EN OBRA	125
6.2	TRATAMIENTO DEL RESIDUO DE POLIESTIRENO EXTRUIDO PARA SU REUTILIZACIÓN	128
6.3	CARACTERIZACIÓN DEL RESIDUO	130
6.3.1	Densidad real	131
6.3.2	Densidad aparente	131
6.3.3	Microscopía electrónica de barrido (SEM)	132
6.4	CONCLUSIONES PARCIALES	132
6.5	TRABAJOS CITADOS	133
CAPÍTULO 7.	CARACTERIZACIÓN DE COMPUESTOS DE YESO CON RESIDUO DE XPS	137
7.1	FASE 1: ENSAYOS PREVIOS.....	137
7.1.1	Probetas de referencia	137
7.1.2	Porcentaje adecuado de agregado	138
7.2	FASE 2: CARACTERIZACIÓN EN ESTADO FRESCO DE LOS COMPUESTOS	141
7.2.1	Determinación de la relación agua/yeso	142
7.2.2	Determinación del tiempo de fraguado	143
7.3	FASE 3: CARACTERIZACIÓN EN ESTADO ENDURECIDO DE LOS COMPUESTOS.....	144
7.3.1	Microscopía electrónica de barrido	144
7.3.2	Densidad	146
7.3.3	Dureza superficial Shore C	147
7.3.4	Resistencia mecánica a flexión	149
7.3.5	Resistencia mecánica a compresión.....	151
7.3.6	Adherencia superficial	153
7.3.7	Absorción de agua por capilaridad.....	156
7.3.8	Durabilidad	157
7.3.9	Coeficiente de conductividad térmico "Heat insulation house"	158
7.3.10	Coeficiente de conductividad térmico <i>C-Therm TCi</i>	160
7.3.11	Coeficiente de absorción acústica	161
7.4	FASE 5: PROPUESTA DE APLICACIONES.....	163
7.5	CONCLUSIONES PARCIALES	163
7.6	TRABAJOS CITADOS	164
CAPÍTULO 8.	ANÁLISIS COMPARATIVO CON OTROS AGREGADOS LIGEROS	169
8.1	BÚSQUEDA BIBLIOGRÁFICA.....	169
8.2	CARACTERIZACIÓN DE COMPUESTOS DE YESO CON POLIESTIRENO EXPANDIDO.....	170
8.2.1	Fase 1: ensayos previos	171
8.2.2	Fase 2: caracterización en estado fresco de los compuestos	173
8.2.3	Fase 3: caracterización en estado endurecido de los compuestos	175

8.2.4 Fase 4: propuesta de aplicaciones	182
8.3 ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS.....	183
8.3.1 Caracterización en estado fresco.....	183
8.3.2 Caracterización en estado endurecido.....	185
8.4 CONCLUSIONES PARCIALES	195
8.5 TRABAJOS CITADOS.....	196
CAPÍTULO 9. ÍNDICE DE ALIGERAMIENTO ECO-EFICIENTE.....	201
9.1 CÁLCULO DEL VALOR DE MEJORA DE LAS VARIABLES.....	201
9.2 ESTANDARIZACIÓN DEL VALOR DE MEJORA DE LAS VARIABLES.....	201
9.3 PONDERACIÓN DE LOS VALORES DE MEJORA ESTANDARIZADOS DE LAS VARIABLES	202
9.3.1 Diseño de la encuesta.....	202
9.3.2 Difusión de la encuesta	203
9.3.3 Análisis de los datos recogidos.....	203
9.4 ÍNDICE DE ALIGERAMIENTO ECO-EFICIENTE.....	205
9.5 CONCLUSIONES PARCIALES	206
9.6 TRABAJOS CITADOS.....	207
CAPÍTULO 10. ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO POR SIMULACIÓN NUMÉRICA	211
10.1 CONDICIONES INICIALES DE ENTRADA.....	211
10.2 CERRAMIENTO ENVOLVENTE VERTICAL	211
10.3 CERRAMIENTO ENVOLVENTE HORIZONTAL.....	214
10.4 PARTICIÓN INTERIOR.....	216
10.5 CONCLUSIONES PARCIALES.....	219
10.6 TRABAJOS CITADOS.....	219
CAPÍTULO 11. CONCLUSIONES	223
11.1 CONCLUSIONES AL OBJETIVO 1.....	223
11.2 CONCLUSIONES AL OBJETIVO 2.....	224
11.3 CONCLUSIONES AL OBJETIVO 3.....	224
11.4 CONCLUSIONES AL OBJETIVO 4.....	225
11.5 CONCLUSIONES AL OBJETIVO 5.....	225
CHAPTER 11. CONCLUSIONS.....	227
CAPÍTULO 12. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	233
BIBLIOGRAFÍA.....	235
INDICIOS DE CALIDAD.....	247
SIGLAS Y ACRÓNIMOS.....	249
LISTADO DE TABLAS, FIGURAS Y FÓRMULAS	251
LISTADO DE FIGURAS.....	251
LISTADO DE TABLAS.....	259
LISTADO DE FÓRMULAS	262
ANEXOS.....	263

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

- 1.1 El consumo de energía**
- 1.2 El poliestireno extruido**
- 1.3 Los residuos de construcción y demolición**
- 1.4 El yeso como material de construcción**
- 1.5 Conclusiones parciales**
- 1.6 Trabajos citados**

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

Desde el inicio de la era industrial hasta hace pocos años, las sociedades creían a ciegas en la doctrina del crecimiento económico exponencial, que se basaba en las posibilidades ilimitadas de la Tierra para sustentar el crecimiento económico. A día de hoy sabemos que nuestro planeta no es capaz de soportar indefinidamente el actual orden económico internacional, que los recursos naturales no son bienes ilimitados y que los residuos sólidos, líquidos o gaseosos de nuestro sistema de vida y la destrucción de ecosistemas conllevan un grave riesgo para la salud del planeta.

En España, el sector de la construcción es una de las actividades que menos ha evolucionado en los últimos años y que además tiene un mayor impacto ambiental, ya que contribuye en gran medida al consumo de recursos naturales, a la contaminación y a la ocupación de territorio. En términos estadísticos, se puede decir que los edificios son responsables del 50% del consumo de recursos naturales, del 40% de la energía consumida y del 50% del total de los residuos generados (Anink, et al., 1996).

La modernización del sector de la construcción hacia un concepto más sostenible es inevitable, por ello debemos empezar a diseñar materiales eco-eficientes que sustituyan a los materiales tradicionales. Los materiales eco-eficientes son aquellos que minimizan la explotación de recursos naturales, que ayudan a reducir la cantidad de energía tanto en su fabricación como en su uso final y que generan menor cantidad de residuos o ayudan a reducirlos (Halada, 2003).

1.1 EL CONSUMO DE ENERGÍA

En la civilización moderna, la disponibilidad de energía está fuertemente ligada al nivel de bienestar, a la salud y a la duración de vida del ser humano. Por ello, el consumo mundial de energía se ha incrementado aproximadamente en un 33% en los últimos 40 años (CNE, 2013) y el pronóstico es que siga creciendo (véase figura 1-1).

Figura 1-1 Previsión de consumo mundial de energía (U.S. Energy Information Administration, 2013)

Estados Unidos, Asia y Europa son los mayores consumidores de energía (U.S. Energy Information Administration, 2012). Y dentro de la Unión Europea, los países que, con diferencia, más energía primaria consumen son Alemania, Francia, Reino Unido, Italia y España (European Commission, 2014). Los sectores que más contribuyen a este consumo son principalmente el de los transportes

(33% de la energía final consumida) y el sector residencial (25% de la energía final consumida) (véase figura 1-2).

Figura 1-2 Energía final consumida por sectores en la Unión Europea (European Commission, 2014)

En España, estos valores son muy similares; ya que el sector residencial es uno de los máximos consumidores con un porcentaje de casi el 19% del total de energía consumida (véase figura 1-3).

Figura 1-3 Energía final consumida por sectores en España (European Commission, 2014)

En España, el petróleo y el gas natural siguen siendo los combustibles líderes muy por encima del resto de fuentes de energía (véase figura 1-4). Por ello, a pesar de que España produce energía nuclear, energías renovables y en menor medida carbón y energía hidráulica, aún tiene una dependencia energética de casi el 80%. En general, el consumo de petróleo y gas natural dependen casi al 100% de la importación, mientras que únicamente un 40% del carbón utilizado en España es importado y tanto la energía nuclear, como la hidráulica y las energías renovables proceden 100% del autoabastecimiento (Gobierno de España, 2014)

Figura 1-4 Consumo de energía primaria en España (Gobierno de España, 2014)

En el sector residencial un 84% de la energía consumida proviene de las energías no renovables (véase tabla 1-1). Y el mayor peso de este consumo lo tiene especialmente la demanda de calefacción y refrigeración (IDAE, 2011).

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

Tabla 1-1 Consumos energéticos (ktep) por sectores en España en el año 2011 (European Commission, 2014)

1.1.1 Problemática derivada del uso y transformación de la energía

El consumo excesivo de recursos energéticos conlleva consecuencias económicas, medio ambientales y sociales. Las principales consecuencias económicas derivadas del uso de la energía provienen del agotamiento de los recursos energéticos no renovables (véase figura 1-5), que siguen siendo los combustibles líderes a nivel mundial (REN21, 2016).

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

Figura 1-5 Previsión del agotamiento de combustibles fósiles (Martín Larrañaga, 2009)

En general, los principales países que producen combustibles fósiles se encuentran en América y Asia (véase tabla 1-2), pero la importación proviene principalmente de Asia (véase tabla 1-3). Así, en el caso del petróleo los mayores productores son Turkmenistán, Arabia Saudí y Estados Unidos y sin embargo los principales importadores son Arabia Saudí y Rusia. En cuanto al carbón, los principales productores son China y Estados Unidos, mientras que el principal importador es Indonesia. Y en el caso del gas natural, los principales productores son Rusia y Estados Unidos, mientras que el principal importador es Rusia.

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

Tabla 1-2 Principales productores mundiales de combustibles fósiles (U.S. Energy Information Administration, 2011)

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

Tabla 1-3 Principales importadores mundiales de combustibles fósiles (U.S. Energy Information Administration, 2011)

En la Unión Europea, los datos muestran que los países dependen cada vez más de las importaciones de energía primaria para satisfacer su demanda energética y de hecho, son muchos los países con una dependencia energética superior al 60%, entre los que se encuentra España (véase figura 1-6). Las tasas de dependencia energética más altas corresponden a Chipre, Malta y Luxemburgo, mientras que las más bajas se registraron en Estonia, Rumania, la República Checa y Dinamarca (que además exporta energía). En cuanto a países exportadores de energía a la Unión Europea, Rusia ha mantenido su posición como principal proveedor de petróleo y gas natural.

Figura 1-6 Dependencia energética para los países de la Unión Europea (European Commission, 2014)

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

Por otra parte, las consecuencias medio ambientales derivadas del uso y transformación de las fuentes de energía no renovables son varias, destacando primero la producción de residuos, como son los residuos radiactivos o los gases de efecto invernadero, y segundo la contaminación de

aguas y suelos y el impacto ecológico derivado de la creación de centrales, líneas eléctricas, generadores, etc. (ETSIM-UPM, 2012).

Los gases de efecto invernadero son los principales responsables del cambio climático y están relacionados con el calentamiento global, la subida del nivel del mar y la disminución de precipitaciones, entre otros. En la figura 1-7 se indica la evolución de la intensidad en carbono del consumo energético mundial, donde se observa que en áreas desarrolladas la tendencia es de descenso o de relativa estabilización, mientras en los países en desarrollo de Asia tiende a crecer, debido al crecimiento del consumo de carbón para generar energía eléctrica.

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

En cuanto a las consecuencias sociales, éstas dependen directamente de las consecuencias anteriores. El consumo de energía está ligado al nivel de bienestar de las personas, y de su precio depende la accesibilidad a más y mejores servicios energéticos. Por otra parte, los gases de efecto invernadero y los residuos peligrosos afectan a la salud de las personas. Además, cabe destacar el impacto estético que suponen algunos elementos relacionados con la obtención o con el transporte de la energía, como las torres eléctricas utilizadas para distribuir la energía eléctrica, las centrales nucleares, los aerogeneradores eólicos, etc.

Figura 1-7 Evolución de las emisiones de CO₂ período 1990-2010 (Gobierno de España, 2014)

1.1.2 La eficiencia energética

El grado de sensibilización al que ha llegado la humanidad con relación a la necesidad de proteger nuestro entorno no es más que el resultado del proceso evolutivo del pensamiento humano. Aunque

la aparición de los primeros grupos ecologistas se manifiesta en Estados Unidos a principios de los setenta, en realidad ya existía un pensamiento pre-ecológico desde la antigüedad (Santos Aguilera & D. Matías, 2008). Sin embargo, no fue hasta después de la crisis energética de 1970 que el mundo empezó a concienciarse de que las fuentes de energía que actualmente dominan el mercado no son infinitas y que su uso conlleva consecuencias a largo plazo para el medio ambiente y la salud, lo que hizo posible que la política de eficiencia energética fuera tomando forma. Por todo ello, a nivel Europeo se estableció mediante la Directiva 2006/32/CE, que para el año 2020 se debe ahorrar un 20% en consumo de energía primaria y que los edificios construidos a partir del año 2020 deben de ser de emisión casi nula (El Parlamento Europeo, 2006).

En esta línea, a nivel nacional, el Código Técnico de la Edificación, que son el conjunto principal de normativas que regulan la construcción de edificios en España, cada vez es más restrictivo en cuanto a la demanda energética de los edificios. De hecho, en el año 2016 actualiza el procedimiento de cálculo de la demanda energética mediante la herramienta unificada Lider-Calener, estableciendo valores más restrictivos para las mismas calificaciones energéticas, lo que convierte a la eficiencia energética en un parámetro imprescindible para el diseño de nuevos edificios.

Según el World Energy Council (2013) la eficiencia energética se puede definir como la reducción del consumo de energía manteniendo los mismos servicios energéticos, sin disminuir el confort del usuario, asegurando el abastecimiento, protegiendo el medio ambiente, y fomentando un comportamiento sostenible en su uso, y actualmente se considera una pieza clave para mitigar el cambio climático y promover el desarrollo sostenible.

Los beneficios derivados de la aplicación de medidas de eficiencia energética se traducen directamente en una reducción del consumo de energía, lo que supone una menor presión sobre los recursos existentes y una reducción de la emisión de gases de efecto invernadero. Esto, a su vez, además de ser un beneficio medio ambiental, supone un beneficio económico, ya que si se consume menos energía se reduce la dependencia energética, que en muchos casos supone elevadas tasas de importación. Y desde el punto de vista de las emisiones de gases de efecto invernadero, se reducen las tasas que ya varios países han de pagar por tonelada de CO₂ emitido, como Dinamarca, Finlandia, Noruega, Suecia o Francia. Así, por ejemplo en Dinamarca, la tasa asciende aproximadamente a 12 euros por tonelada de CO₂ emitido, lo que ha promovido el uso de energías renovables y gracias a ello se ha conseguido reducir en un 15% las emisiones de CO₂ (Rudnick, 2010). Por otra parte, existen medidas voluntarias como la política *CEROCO2*, que promueve la compensación del CO₂ generado mediante la financiación de proyectos de reforestación o la sustitución de combustibles fósiles por energías renovables o el tratamiento de residuos (ECODES, 2013).

En España, los beneficios derivados de los menores consumos de energía y las menores emisiones de CO₂, se estiman en 133,4 millones de toneladas equivalentes de petróleo, lo que supondría 70.357 millones de euros (IDAE, 2011).

Existen diferentes estrategias de eficiencia energética, entre las que destacan las siguientes:

- El ahorro de energía en la fabricación de materiales
- El ahorro de energía en la fase de uso de los edificios

1.1.2.1 *El ahorro de energía en la fabricación de materiales*

En el caso del ahorro de energía en la fabricación de materiales, tanto la obtención de los recursos naturales básicos como la producción de materiales compuestos requieren de una gran cantidad de energía para ser obtenidos. Para reducir el impacto energético del producto final es posible sustituir parcial o totalmente estos materiales por otros que consuman menor cantidad de energía, incluyendo dentro de esta posibilidad la reutilización de residuos.

1.1.2.2 *El ahorro de energía en la fase de uso de los edificios*

En general, el ahorro de energía en la fase de uso de los edificios se basa en el control de la envolvente del edificio a través de los parámetros de confort básicos, mediante el uso del diseño y la selección de materiales más adecuados (Neila González & Bedoya Frutos, 1997). Para ello es imprescindible que los materiales se diseñen teniendo en cuenta principalmente su conductividad térmica. De acuerdo con diferentes fuentes, como el informe “Tackling Climate Change” el aislamiento térmico es la medida de ahorro de energía que mejor relación coste-beneficio tiene (Egenhoper, et al., 2006). El aislamiento térmico dificulta el paso del calor por conducción del interior al exterior durante el periodo de invierno y a la inversa durante el verano. Todos los materiales oponen resistencia térmica en mayor o menor medida, sin embargo la resistencia que un material ofrece al paso del calor depende de su espesor y de su coeficiente de conductividad térmico. En este sentido, los materiales aislantes térmicos disponen de un coeficiente de conductividad térmico muy bajo, lo que les confiere una alta resistencia al paso del calor y los convierte en la estrategia más sostenible para el sector residencial.

Por todo ello, las nuevas y más restrictivas exigencias actuales de la normativa en cuanto a demanda energética de los edificios se están viendo traducidas, en general, en un aumento del espesor de los materiales aislantes térmicos.

1.1.3 Marco normativo referente a la eficiencia energética

A continuación se presenta un registro de la normativa más representativa en cuanto a eficiencia energética.

1.1.3.1 *Normativa Europea*

Entre las directivas relacionadas con la eficiencia energética destacan:

La Directiva 2004/8/CE relativa al fomento de la cogeneración sobre la base de la demanda de calor útil en el mercado interior de la energía y los servicios energéticos.

La Directiva 2006/32/CEE, que deroga a la Directiva 93/76/CEE y trata sobre la eficiencia del uso final de la energía y los servicios energéticos. En esta Directiva se crea la figura de Empresa de Servicios Energéticos (ESE) que serán las encargadas de realizar mejoras de eficiencia energéticas y mantenimiento de las instalaciones de calefacción, climatización y generación de ACS y se fija un objetivo mínimo orientativo de ahorro energético del 9% en 2016; objetivo aún en vigor, puesto que la nueva Directiva 2012/27/UE no lo deroga.

La Directiva 2009/33/CE, relativa a la promoción de vehículos de transporte por carretera limpios y energéticamente eficientes.

La Directiva 2009/28/CE, relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables.

La Directiva 2009/125/CE, por la que se instauro un marco para el establecimiento de requisitos de diseño ecológico aplicables a los productos relacionados con la energía.

La Directiva 2010/31/UE que deroga en parte a la pionera Directiva 2002/91/CE, relativa a la eficiencia energética en los edificios y que pretende establecer un método de cálculo de la eficiencia energética en los edificios de nueva construcción y aquellos con reformas profundas de los estados miembros, teniendo en cuenta las condiciones climáticas exteriores y las particularidades locales, así como las exigencias ambientales interiores y la rentabilidad en términos de coste-eficacia. Y establece que los Estados miembros velarán por que se expida un certificado de eficiencia energética para los edificios o unidades de éstos que se construyan, vendan o alquilen a un nuevo arrendatario, y para los edificios en los que una autoridad pública ocupe una superficie útil total superior a 500 m² y que sean frecuentados habitualmente por el público (El 9 de julio de 2015, este umbral de 500 m² se reducirá a 250 m²). Además, esta Directiva marca unos requisitos mínimos en eficiencia energética en las instalaciones de iluminación, producción de agua caliente sanitaria (ACS), calefacción, refrigeración y ventilación.

La Directiva 2012/27/UE, relativa a la eficiencia energética, que deroga a las directivas 2004/8/CE y 2006/32/CEE. En este documento, siguiendo las directrices de la Directiva 2006/32/CE, se dictamina que a más tardar el 30 de abril de 2014, y a continuación cada tres años, los Estados miembros deberán presentar Planes nacionales de acción para la eficiencia energética, donde se fijarán las actuaciones y mecanismos para conseguir los objetivos.

Por su parte la Comisión de la Unión Europea dispone de un Plan de Acción para la eficiencia energética, publicado en el año 2006 y cuyo objetivo es reducir el consumo de energía en un 20% en un plazo que finaliza en el año 2020. Este plan de acción incluye medidas destinadas a mejorar el rendimiento energético de los productos, los edificios y los servicios; mejorar la eficiencia de la producción y la distribución de energía; reducir el impacto de los transportes en el consumo energético; facilitar la financiación y la realización de inversiones en este ámbito, y suscitar y reforzar un comportamiento racional con respecto al consumo de energía, así como reforzar la acción internacional en materia de eficiencia energética. Como complemento de este plan, se publicó en 2008 la comunicación: “Eficiencia energética: alcanzar el objetivo del 20%”, conocida también como “horizonte 20-20-20”, cuyo objetivo es más ambicioso, ya que no sólo pretende reducir un 20% el consumo de energía primaria de la Unión Europea, sino que también busca reducir otro 20% las emisiones de gases de efecto invernadero; y elevar la contribución de las energías renovables al 20% del consumo. Este último documento se complementa a su vez con el “Plan de Eficiencia Energética 2011”, que considerando la gran complejidad de reducir el consumo de energía en un 20%, propone nuevas líneas de acción globales para la eficiencia energética teniendo en cuenta parámetros actuales.

1.1.3.2 Normativa Nacional

En España, el primer punto de inflexión en cuanto a eficiencia energética corresponde al año 1979, en el que se publicó la Norma Básica NBE-CT-79 de Condiciones Térmicas del edificio, cuya innovación fue el establecimiento de unas condiciones térmicas mínimas que exigían la incorporación de aislamiento térmico en la envolvente del edificio. Posteriormente, se han publicado leyes y Reales Decretos que hablan específicamente de eficiencia energética, entre los que destacan:

El Código Técnico de la Edificación (CTE), publicado en el año 2006, promovido por la Ley de Ordenación de Edificación (LOE) y que establece unos criterios mínimos de seguridad, funcionalidad, seguridad y habitabilidad. Este documento derogó las Normas Básicas y el RITE e introdujo nuevos parámetros y exigencias mínimas en cuanto a eficiencia energética.

El Real Decreto 661/2007 por el que se regula la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial.

El Real Decreto 1890/2008 sobre eficiencia energética en instalaciones de alumbrado exterior.

El Real Decreto 187/2011, relativo al establecimiento de requisitos de diseño ecológico aplicables a productos relacionados con la energía.

La Ley 2/2011 o Ley de Economía Sostenible, cuyo objetivo es el desarrollo de la economía sostenible mediante un conjunto de reformas de impulso de la sostenibilidad de la economía española.

Y el Real Decreto 235/2013, que deroga al Real Decreto 47/2007 sobre Certificación Energética en Edificios, ampliando su aplicación no sólo a edificios de nueva construcción, sino también al resto de edificios existentes.

Además como complemento a la normativa nacional, el Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, en colaboración con el IDAE, elaboró el Plan de Acción de Ahorro y Eficiencia Energética 2011-2020, que incluye un anexo con la cuantificación de los ahorros energéticos obtenidos en el año 2010 respecto a los años 2004 y 2007, de acuerdo con las recomendaciones metodológicas sobre medida y verificación de los ahorros de la Comisión Europea.

1.2 EL POLIESTIRENO EXTRUIDO

El poliestireno extruido (XPS) es una espuma rígida de estructura celular cerrada compuesta, que se forma por la extrusión del poliestireno (véase figura 1-8) en presencia de un gas espumante bajo condiciones muy controladas de presión y temperatura (ANAIP, 2014).

- ① Extrusora ② Alimentación de sólidos (resina de PS, agente ignífugo, colorantes, etc) ③ Dosificación agente espumante
④ Depósito agente espumante (líquido) ⑤ Mezcladores (gel) ⑥ Plancha continua de espuma ⑦ Curado ⑧ Corte y embalaje

Figura 1-8 Proceso de fabricación del poliestireno extruido (AIPEX, 2014)

El poliestireno es un polímero sintético termoplástico que se obtiene de la polimerización del estireno y actualmente existen cuatro tipos principales de poliestireno: el poliestireno cristal, que es transparente, rígido y quebradizo; el poliestireno de alto impacto, resistente y opaco; el poliestireno expandido, de baja densidad y buen comportamiento térmico y por último el poliestireno extruido, cuyas propiedades son similares a las del poliestireno expandido, por lo que compite con este en sus aplicaciones, principalmente como material aislante térmico.

Los polímeros son macromoléculas, generalmente orgánicas, formadas por la unión de moléculas más pequeñas llamadas monómeros a través de un proceso denominado polimeración (Textos científicos.com, 2013). Los polímeros se pueden clasificar atendiendo a diferentes factores, como su origen, su forma o el tipo de monómero. A continuación se desarrollan las tres clasificaciones que, por su uso, se consideran más importantes: A) atendiendo a su origen, B) atendiendo a su comportamiento frente al calor y C) atendiendo a su comportamiento mecánico:

Clasificación de los polímeros atendiendo a su origen:

- **Polímeros naturales:** son aquellos que son derivados de productos de origen natural como, por ejemplo, la celulosa, y el caucho.
- **Polímeros sintéticos:** son aquellos que se obtienen en laboratorio o en la industria, generalmente a partir del petróleo, como el polietileno.
- **Polímeros semisintéticos:** son aquellos que se obtienen por transformación de polímeros naturales. Por ejemplo, la nitrocelulosa (celuloide) o el caucho vulcanizado.

Clasificación de los polímeros atendiendo a su comportamiento frente al calor:

- **Termoplásticos:** son polímeros que, a temperatura ambiente, son plásticos o deformables, se convierten en líquido cuando se calientan y endurecen a un estado vítreo cuando se enfrían lo suficiente. Comprenden las resinas celulósicas, los polietilenos y derivados, los derivados de las proteínas y los derivados del caucho.
- **Termoestables:** son aquellos que una vez que han sufrido el proceso de calentamiento-fusión y formación-solidificación, se convierten en materiales rígidos que no vuelven a fundirse. Comprenden los polímeros del fenol, las resinas epoxi y las melamínicas, la baquelita, los aminoplásticos y los poliésteres.

Clasificación de los polímeros atendiendo a su comportamiento mecánico:

- **Plásticos:** son polímeros que durante alguna etapa de su fabricación son llevados al estado líquido para moldearlos por calor o presión en un molde. Una vez que ha solidificado el material es químicamente muy estable bajo condiciones ambientales normales. Comprenden el polietileno, el polipropileno, el poliestireno, etc.
- **Elastómeros:** son materiales de moléculas grandes las cuales después de ser deformadas a temperatura ambiente, recobran en mayor medida su tamaño y geometría al ser liberada la fuerza que los deformó. Comprenden los cauchos naturales, obtenidos a partir del látex natural y los sintéticos; entre estos últimos se encuentran el neopreno y el polibutadieno.

- **Fibras:** son materiales que tienen una relación longitud/diámetro muy grande. Las fibras están constituidas frecuentemente por macromoléculas lineales orientadas longitudinalmente. Comprenden los poliésteres, las poliamidas, el poliacrilonitrilo, etc.

Como polímero sintético, el poliestireno extruido destaca principalmente por su comportamiento térmico, con una conductividad térmica que varía entre 0.029 y 0.036 W/mK y por su comportamiento frente al agua, ya que su capacidad de absorción de agua por inmersión total de larga duración es inferior a un 0,7% y su factor de resistencia a la difusión del vapor de agua alcanza valores superiores a 150. Además, en algunos casos, el poliestireno extruido incorpora aditivos ignífugos que le aportan resistencia al fuego, obteniéndose un producto de Euroclase E, autoextinguible, que evita la propagación de llamas en caso de incendio (AIPEX, 2014).

El poliestireno extruido es muy utilizado en la industria del envasado para fabricar bandejas para alimentos (Álvarez, 2010). Sin embargo, dadas sus propiedades, también destaca su uso como material aislante térmico en el sector de la construcción, principalmente para realizar cubiertas invertidas, por su elevada durabilidad, su resistencia mecánica y su resistencia al agua. El poliestireno extruido se comercializa generalmente en planchas de 30 a 100 mm de espesor, en diferentes colores y con cantos lisos o bien cajeados a media madera. Sin embargo, debido a su extenso uso en cubiertas invertidas, se están comercializando productos de acabado en cubiertas y azoteas como las baldosas porosas de hormigón con poliestireno extruido (véase figura 1-9) o los paneles sándwich revestidos de madera (véase figura 1-10).

Figura 1-9 Baldosa aislante de hormigón poroso con poliestireno extruido (Danosa, 2014)

Figura 1-10 Panel sándwich de poliestireno extruido revestido con madera (Thermochip, 2014)

1.2.1 El consumo de polímeros sintéticos

Antes de la aparición del primer polímero sintético, el hombre ya utilizaba algunas resinas naturales, como el betún o la goma, de hecho se tienen referencias de que éstas se utilizaban en Egipto, Babilonia, India, Grecia y China. En el año 1860, el inventor estadounidense Wesley Hyatt desarrolló un método de procesamiento a presión de la piroxilina, un nitrato de celulosa de baja nitración tratado previamente con alcanfor y una cantidad mínima de alcohol. Este producto, patentado con el nombre de celuloide, fue el primer polímero semisintético y tuvo un notable éxito comercial a pesar de ser inflamable y deteriorarse al exponerlo a la luz. Sin embargo, no fue hasta 1907 cuando se introdujeron los polímeros sintéticos, cuando el Dr. Leo Baekeland descubrió un compuesto de fenol-formaldehído, de gran resistencia mecánica, aislamiento eléctrico y resistencia a elevadas temperaturas, al cual denominó “baquelita” y que se comercializó en 1909 (IngenieriaPlastica.com, s.f.).

Desde su descubrimiento, el consumo mundial de polímeros sintéticos se ha visto incrementado anualmente y ya en 2012 se consumieron en el mundo 241 millones de toneladas de polímeros sintéticos. Siendo China y la Unión Europea los máximos consumidores (PlasticsEurope, 2012).

En la Unión Europea, el consumo de polímeros sintéticos se estima en 49 millones de toneladas y los países más consumidores son Alemania, con un consumo de casi 12 millones de toneladas, Italia, con un consumo de aproximadamente 6,8 millones de toneladas y Francia, Reino Unido y España, con un consumo por encima de los 3 millones de toneladas (véase figura 1-11). Este consumo general corresponde en un 39% a la industria del envasado y en un 21% al sector de la construcción (Plastech, 2011).

Figura 1-11 Consumo de polímeros sintéticos en la Unión Europea (PlasticsEurope, 2013)

En el caso específico de España, se consumen 3,2 millones de toneladas de polímeros sintéticos de los cuales el 47,4% corresponde a envases, el 14,4% corresponde al sector de la construcción y el resto a la industria del automóvil, la agricultura y otros (Mundoplast, 2013).

El consumo de poliestireno se estima en un 8% del total del consumo de polímeros sintéticos en la Unión Europea (véase figura 1-12). En el sector de la construcción es uno de los polímeros sintéticos más empleados tanto a nivel mundial como en España (Winterling & Sonntag, 2011) y cada vez es mayor el porcentaje utilizado en este sector, debido principalmente a las exigencias en cuanto a demanda energética de los edificios que se están implementando a nivel Europeo y nacional.

Figura 1-12 Demanda de polímeros sintéticos por tipos (PlasticsEurope, 2012)

1.2.2 Los procesos de recuperación y reciclaje del poliestireno extruido

En general, los polímeros sintéticos desechados pueden ser reciclados o recuperados. Inicialmente los procesos de recuperación y reciclaje siguen, por regla general, las siguientes fases previas (González Madariaga, 2005):

- **Recolección o recogida**, son numerosos los métodos para la recolección de polímeros sintéticos, destacando la recolección selectiva.
- **Segregación de residuos**, en general los residuos, aunque se separen en origen, siempre vienen mezclados con otros residuos y en el caso de los residuos de polímeros sintéticos, es imprescindible obtener un buen grado de pureza para su recuperación. Los métodos de segregación utilizados actualmente son:
 - a) **Macroselección**: es la opción de segregación más sencilla y consiste en separar los productos de polímeros sintéticos en sus diferentes componentes individuales. Esta operación puede hacerse de forma manual o automáticamente (con electromagnetos, sistemas de inducción eléctrica, sistemas de chorros de aire, sistemas de separación por gravedad, etc.).
 - b) **Microselección**: es la separación por tipo de residuo de polímero sintético mediante técnicas como la flotación por diferencia de densidades. Para realizar este proceso el residuo debe ser triturado hasta una granulometría de 3-6 mm.

- c) Selección molecular de componentes: este proceso consiste en la disolución de todos los residuos de polímeros sintéticos y su posterior selección aprovechando la temperatura de disolución diferente de cada polímero sintético.

Una vez recogidos y segregados los residuos de polímeros sintéticos, existen tres procesos para realizar su recuperación y reciclaje (UNED, 2014):

- **Reciclado mecánico**, consiste en trocear el material para introducirlo posteriormente en una máquina extrusora-granceadora para moldearse después por los métodos tradicionales. Solamente puede aplicarse a los termoplásticos, que son aquellos que funden por la acción de la temperatura. Presenta dos problemas fundamentalmente. El primero es que el plástico ya utilizado pierde parte de sus propiedades, lo que obliga a emplearlos en la fabricación de otro tipo de productos con menos exigencias. El segundo es que el residuo debe tener un nivel de impurezas mínimo, por lo que debe ser lavado y acondicionado
- **Reciclado químico**, se utiliza cuando el plástico está muy degradado o es imposible aislarlo de la mezcla en que se encuentra. Se define como la reacción reversible de la polimerización hacia la recuperación de las materias primas. Según el tipo de polímeros se distinguen dos clases de procesos: polímeros de adición (vía térmica y vía catalítica) y polímeros de condensación (hidrólisis, metanólisis, etc.).
- **Valorización energética**, es un tratamiento adecuado para plásticos muy degradados. Es una variante de la incineración en la que la energía asociada con el proceso de combustión es recuperada para generar energía. Las plantas en las que se realiza se asemejan a una central térmica pero difieren en el combustible, que en este caso son residuos plásticos.

1.2.3 Problemática derivada del consumo de polímeros sintéticos

El 99% de la totalidad de los polímeros sintéticos se produce a partir de combustibles fósiles, con lo que su precio y disponibilidad depende básicamente de ellos. Sin embargo, los polímeros sintéticos necesitan menos recursos energéticos que otros sectores. Actualmente, en la Unión Europea, solo el 4% del petróleo es usado para la elaboración de polímeros sintéticos, mientras que el 86% se destina al sector del transporte y a la producción de energía. Si se compara la cantidad de energía que se necesita para elaborar polímeros sintéticos con la cantidad de energía necesaria para elaborar el vidrio, es importante señalar que para producir 1000 botellas de plástico se necesitan 100 kilogramos de petróleo, mientras que para producir 1000 botellas de vidrio se necesitan 230 kilogramos de petróleo. Además, los polímeros sintéticos, al ser ligeros, producen un menor impacto ambiental derivado de su transporte, en comparación con el vidrio (Ambientum, 2014).

Por tanto, el mayor problema derivado de los polímeros sintéticos corresponde a los residuos que generan, que pueden permanecer inalterables por un período de tiempo entre 100 y 500 años. Esto se debe a que su degradación es muy lenta y consiste principalmente en su fragmentación en partículas más pequeñas, que se distribuyen en los mares, ríos, sedimentos y suelos, entre otros (Ortiz Hernández, 2009).

Los polímeros sintéticos pueden ser recuperados para su reciclado, pero previo a su recuperación, los diferentes tipos de polímeros sintéticos deben ser segregados, ya que en general no aceptan tratamientos homogéneos y además, no deben contener otro tipo de residuos, por lo que son

imprescindibles operaciones de lavado y separación. Por esta razón, la recuperación y reciclado de polímeros sintéticos es más costosa que la de otros materiales y por tanto la opción más rentable de tratamiento es la de incineración para valorización energética. Este sistema permite reducir considerablemente el volumen de residuos que va a vertedero y recuperar el valor calorífico de los polímeros sintéticos, que en el caso del poliestireno es uno de los más elevados entre los polímeros sintéticos (46.000 KJ/kg) (Ambientum, 2014). Aunque se debe tener en cuenta que este proceso puede generar materiales tóxicos. Así por ejemplo, la presencia de PVC en la mezcla, aporta a los gases de combustión ácido clorhídrico que en presencia de materia orgánica puede originar productos tóxicos derivados de las dioxinas y de los dibenzofuranos (UNED, 2014).

En la Unión Europea, la cantidad total de residuos de polímeros sintéticos generados ha ido aumentando desde 2009, llegando en 2012 a los 25,2 millones de toneladas, principalmente procedentes de la industria del envasado (62,2%). Más del 77% de estos residuos fueron generados en Alemania, Reino Unido, Francia, Italia, España, Polonia y Holanda y un 61,9% de ellos fueron recuperados, aunque la mayoría corresponde a la industria del envasado. De hecho, el porcentaje de reciclado de residuos de polímeros sintéticos correspondientes a la industria del envasado es superior a la media de reciclaje de polímeros sintéticos en general (PlasticsEurope, 2013).

En España, menos del 30% de los residuos de polímeros sintéticos generados son reciclados y más de un 55% son llevados directamente a vertedero (véase figura 1-13).

Figura 1-13 Tratamiento de residuos de polímeros sintéticos en la Unión Europea (PlasticsEurope, 2013)

Por otra parte, según datos obtenidos en diferentes obras repartidas por España por una empresa suministradora e instaladora de productos de aislamiento térmico con poliestireno extruido, los residuos obtenidos de la colocación de aislamiento térmico de poliestireno extruido se estiman en un 5% aproximadamente en peso del total del material suministrado, lo que supone un gran volumen de material dada su baja densidad (véase tabla 1-4). Y este valor no tiene en cuenta ni el desperdicio producido en fábrica, ni el material que podría ser recuperado en las demoliciones.

28 viviendas en Valdebebas, Madrid (Ortiz Construcciones)		Desperdicio
Aislamiento suministrado 8 cm	770 m ²	5,19%
Aislamiento facturado	730 m ²	
Edificio AON en As Gandaras, Lugo (Vías y construcciones)		Desperdicio
Aislamiento suministrado 7 cm	1318 m ²	4,02%
Aislamiento facturado	1265 m ²	
Teatro y centro cultural en Coslada, Madrid (FCC Industrial)		Desperdicio
Aislamiento suministrado 10 cm	3352 m ²	4,95%
Aislamiento facturado	3186 m ²	
152 viviendas en Los Molinos, Getafe (FCC Construcciones)		Desperdicio
Aislamiento suministrado 7 cm	4451,46 m ²	5,07%
Aislamiento facturado	4225,80 m ²	
Sede Banco Popular en Madrid (Vías y Construcciones)		Desperdicio
Aislamiento suministrado 4 cm	5827,66 m ²	3,73%
Aislamiento facturado	5610 m ²	
67 viviendas en Valdebebas, Madrid (Ferrovia)		Desperdicio
Aislamiento suministrado 5 cm	1913,80 m ²	5,65%
Aislamiento facturado	1805,62 m ²	
92 viviendas en Toledo (Ferrovia)		Desperdicio
Aislamiento suministrado 6 cm	1603,18 m ²	5,67%
Aislamiento facturado	1512,30 m ²	

Tabla 1-4 Datos de aislamiento suministrado y facturado en diferentes obras (Impernor, 2015)

1.2.4 Marco normativo referente al poliestireno extruido

A continuación se presenta un registro de la normativa más representativa en cuanto a las aplicaciones del poliestireno extruido en edificación:

UNE 92182:2008 IN Características mínimas recomendables para distintas aplicaciones. Productos aislantes térmicos para aplicaciones en la edificación. Productos manufacturados de poliestireno extruido (XPS).

UNE-EN 14934:2008 Productos aislantes térmicos y de relleno ligero para aplicaciones en la ingeniería civil. Productos manufacturados de poliestireno extruido (XPS).

UNE-EN 14307:2010+A1:2013 Productos aislantes térmicos para equipos en edificación e instalaciones industriales. Productos manufacturados de poliestireno extruido (XPS).

UNE-EN 13164:2013 Productos aislantes térmicos para aplicaciones en la edificación. Productos manufacturados de poliestireno extruido (XPS).

1.3 LOS RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN

Los residuos son productos de la actividad humana a los que se les considera sin valor y por tanto son considerados como desecho. De hecho, la Directiva Marco de Residuos 2008/98/CE los define

como “*cualquier sustancia u objeto del cual su poseedor se desprenda o tenga la intención o la obligación de desprenderse*” (El Parlamento Europeo, 2008).

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

Actualmente, la producción en masa y la fabricación de materiales sintéticos daña cada vez más los ciclos de vida naturales. Los residuos han pasado de ser biodegradables a ser en gran parte materiales de degradación lenta y difícil, generados en grandes volúmenes y con mayor toxicidad, lo que ha hecho imprescindible la creación de políticas y medidas para su correcta gestión (Tiscareño Vizcarra, 2005).

Los residuos se pueden categorizar atendiendo a diferentes factores, como su naturaleza, su composición, su destino o su efecto en el medio ambiente. A continuación se desarrollan las tres clasificaciones, que por su uso, se consideran más importantes: A) atendiendo a su naturaleza, B) atendiendo a su procedencia y C) atendiendo a la codificación de la Lista Europea de Residuos (LER).

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

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

b) Clasificación de los residuos atendiendo a su procedencia:

- **Residuos del sector productivo primario:** que proceden de las actividades agrícolas, ganaderas, forestales o mineras.
- **Residuos del sector productivo secundario:** que proceden de las actividades industriales de transformación y se pueden clasificar a su vez en:
 - Residuos inertes: son aquellos residuos que no experimentan transformaciones físicas, químicas o biológicas significativas. Los residuos inertes no son solubles ni combustibles, ni reaccionan física ni químicamente ni de ninguna otra manera, ni son biodegradables, ni afectan negativamente a otras materias con las cuales entran en contacto de forma que puedan dar lugar a contaminación del medio ambiente o perjudicar a la salud humana. La lixiviabilidad total, el contenido de contaminantes de

los residuos y la del lixiviado deberán ser insignificantes, y en particular no deberán suponer riesgo para la calidad de las aguas superficiales y/o subterráneas. Algunos ejemplos de estos residuos son los restos de escombros y la chatarra (Gobierno de España, 2001).

- Residuos peligrosos: son aquellos residuos que en cualquier estado físico o químico, contienen elementos o sustancias que pueden representar un peligro para el medio ambiente, la salud humana o los recursos naturales. Para identificarlos se debe comprobar si presentan una o varias de las características peligrosas enumeradas en el anexo III de la Ley 22/2011, pudiendo ser calificados como: explosivos, oxidantes, fácilmente inflamables, inflamables, irritantes, nocivos, tóxicos, cancerígenos, corrosivos, infecciosos, tóxicos para la reproducción, mutagénicos, que emiten gases tóxicos o muy tóxicos al entrar en contacto con el aire, con el agua o con un ácido, sensibilizantes, ecotóxicos y/o susceptibles, después de su eliminación, de dar lugar a otra sustancia por un medio cualquiera, por ejemplo, un lixiviado que posee alguna de las características anteriormente enumeradas; además de aquellos que pueda aprobar el Gobierno de conformidad con lo establecido en la normativa europea o en los convenios internacionales de los que España sea parte, así como los recipientes y envases que los hayan contenido (Jefatura del Estado, 2011). A su vez, estos residuos aparecen en la Lista Europea de Residuos identificados con el símbolo asterisco (*).
 - Residuos radiactivos: son aquellos materiales o productos de desecho, para los cuales no está previsto ningún uso y que contienen o están contaminados con radionucleidos en concentraciones o niveles de actividad superiores a los establecidos por el Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, previo informe del Consejo de Seguridad Nuclear (Comisión Nacional de Energía, 1997).
- **Residuos del sector productivo terciario:** que proceden de la actividad doméstica, comercial y de la construcción. Los más importantes son:
- Residuos sanitarios: son aquellos residuos generados en hospitales, clínicas o laboratorios farmacéuticos.
 - Residuos de construcción y demolición.
 - Residuos sólidos urbanos: son aquellos residuos generados en las actividades realizadas en los núcleos urbanos o en sus áreas de influencia y se pueden clasificar a su vez en:
 - Residuos domésticos: son aquellos residuos generados en los hogares como consecuencia de las actividades domésticas. Se consideran también residuos domésticos los similares a los anteriores generados en servicios e industrias, los residuos y escombros procedentes de obras menores de construcción y reparación domiciliaria, los residuos procedentes de limpieza de vías públicas, zonas verdes, áreas recreativas y playas, los animales domésticos muertos y los vehículos abandonados (Jefatura del Estado, 2011).
 - Residuos comerciales: son aquellos residuos generados por la actividad propia del comercio, al por mayor y al por menor, de los servicios de restauración y bares, de las oficinas y de los mercados, así como del resto del sector servicios (Jefatura del Estado, 2011).
 - Residuos de la limpieza de las calles, zonas verdes, mercados...

c) Clasificación de los residuos atendiendo a la codificación de la Lista Europea de Residuos

La Lista Europea de Residuos (LER), inicialmente publicada en la Orden MAM/304/2002 (Gobierno de España, 2002), establece un listado de 20 capítulos en los que tienen cabida todos los residuos existentes. El sistema de codificación LER se estructura en 3 niveles de desagregación: el primer nivel correspondiente a los capítulos es representado mediante un código numérico de 2 cifras; el segundo nivel correspondiente a los subcapítulos se caracteriza por un código numérico de 4 cifras que incorpora en sus 2 primeras cifras el código del capítulo al que pertenece; finalmente, los residuos son codificados con un código numérico de 6 cifras que incorpora el código del subcapítulo del que forma parte. Los residuos peligrosos aparecen en la lista señalados con un asterisco de acuerdo con la Directiva del Consejo 91/689/CEE (El Consejo de las Comunidades Europeas, 1991).

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

- Residuos de la prospección, extracción de minas y canteras y tratamientos físicos y químicos de minerales
- Residuos de la agricultura, horticultura, acuicultura, silvicultura, caza y pesca; residuos de la preparación y elaboración de alimentos
- Residuos de la transformación de la madera y de la producción de tableros y muebles, pasta de papel, papel y cartón
- Residuos de las industrias del cuero, de la piel y textil
- Residuos del refino de petróleo, purificación del gas natural y tratamiento pirolítico del carbón
- Residuos de procesos químicos inorgánicos
- Residuos de procesos químicos orgánicos
- Residuos de la fabricación, formulación, distribución y utilización (FFDU) de revestimientos (pinturas, barnices y esmaltes vítreos), adhesivos, sellantes y tintas de impresión
- Residuos de la industria fotográfica
- Residuos de procesos térmicos
- Residuos del tratamiento químico de superficie y del recubrimiento de metales y otros materiales; residuos de la hidrometalurgia no férrea
- Residuos del moldeo y del tratamiento físico y mecánico de superficie de metales y plásticos
- Residuos de aceites y de combustibles líquidos (excepto los aceites comestibles y los de los capítulos 05, 12 y 19)
- Residuos de disolventes, refrigerantes y propelentes orgánicos (excepto los capítulos 07 y 08)
- Residuos de envases; absorbentes, trapos de limpieza, materiales de filtración y ropas de protección no especificados en otra categoría
- Residuos no especificados en otro capítulo de la lista
- Residuos de la construcción y demolición (incluida la tierra excavada de zonas contaminadas)
- Residuos de servicios médicos o veterinarios o de investigación asociada (salvo los residuos de cocina y de restaurante no procedentes directamente de la prestación de cuidados sanitarios)
- Residuos de las instalaciones para el tratamiento de residuos, de las plantas externas de tratamiento de aguas residuales y de la preparación de agua para consumo humano y de agua para uso industrial

- Residuos municipales (residuos domésticos y residuos asimilables procedentes de los comercios, industrias e instituciones), incluidas las fracciones recogidas selectivamente

1.3.1 Generación de residuos

La generación de residuos está muy ligada al consumo, por tanto a nivel mundial las grandes potencias son las que más residuos generan en general, destacando Asia, Norte América y Europa. En la Unión Europea, en 2010, la generación total de residuos por parte de las actividades económicas y los hogares ascendió a 2.502 millones de toneladas. Esta cifra fue ligeramente superior a la de 2008, pero inferior a las de 2004 y 2006. Las cifras relativamente bajas correspondientes a 2008 y 2010 reflejan, en parte, la desaceleración de la actividad económica como consecuencia de la crisis económica y financiera (véase figura 1-14).

Figura 1-14 Residuos generados en la Unión Europea años 2004-2010 (European Commission, 2014)

De los países de la Unión Europea que más residuos generan destacan Alemania y Francia, que generan más de 300 millones de toneladas de residuos anuales cada uno. Además, casi la mitad de los países de la Unión Europea, entre los que se encuentra España, generan más de 100 millones de toneladas de residuos anualmente (véase figura 1-15).

Figura 1-15 Residuos generados por países de la Unión Europea (European Commission, 2014)

La actividad económica que más residuos genera en la Unión Europea es la del sector de la construcción, responsable de un 33% de los residuos totales generados (véase figura 1-16). La gran mayoría de los residuos de construcción y demolición (RCD) están compuestos por residuos minerales o del suelo (tierra excavada, residuos de la construcción de carreteras, lodos de drenaje, rocas residuales, residuos mineros, etc.). Si no se tienen en cuenta estos residuos, la generación de residuos en el sector de la construcción no ha dejado de aumentar desde 2004 en la Unión Europea (European Commission, 2014).

Figura 1-16 Generación de residuos en la Unión Europea por sectores (European Commission, 2014)

Fischer y Werge analizan la generación de RCD per cápita en los Estados miembros de la Unión Europea y Noruega durante la época 1995-2006 y entre los datos que recogen se observa que todos los países donde los datos de más de un año están disponibles, a excepción de Alemania, han aumentado su generación de RCD per cápita en el período 1995 a 2006, siendo Luxemburgo, Francia y Finlandia los países con mayor generación de residuos per cápita (Fischer & Werge, 2009).

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

En España, en los últimos años el crecimiento de los núcleos urbanos (promovido por una buena situación económica) y por tanto de la actividad de construcción, ha ocasionado unos índices muy elevados de generación de residuos. Al igual que en la Unión Europea, las estadísticas europeas para el año 2014 reflejan que el sector de la construcción en España es uno de los sectores que más residuos genera, con un 22% sobre el residuo total generado (véase figura 1-17).

En cuanto al estudio por comunidades autónomas, el Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos (PEMAR) analiza la generación de residuos en la industria española durante los años 2004 y 2012, y publica los datos de RCD generados en cada comunidad autónoma. De los datos publicados se

observa que la generación de RCD en España ha crecido en los cinco años analizados a un ritmo medio del 8,7% anual y que casi la mitad de los residuos (el 49,2%) se han generado en Cataluña, la Comunidad Valenciana y Andalucía. Una cuarta parte se ha generado en Madrid, Castilla-La Mancha y Galicia. El resto de los residuos se distribuyen de una forma casi homogénea entre Ceuta, Melilla y las restantes comunidades autónomas (véase tabla 1-5).

Figura 1-17 Generación de residuos en España por sectores (European Commission, 2014)

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

Tabla 1-5 Toneladas de RCD generados en España por comunidad autónoma para el período 2008-2011 (GERD, 2013)

Por otra parte, según datos publicados en la estrategia de residuos de la Comunidad de Madrid para los años 2006-2016, el 80% de los RCD generados corresponden a residuos minerales o áridos. Si

no se tienen en cuenta los áridos, los residuos más generados son la madera, los metales y los plásticos (Consejería de Medio Ambiente y Ordenación, 2006).

1.3.2 La gestión de los residuos

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

Dentro de la gestión de residuos se incluye una jerarquía de prioridades que establece medidas destinadas a proteger el medio ambiente y la salud humana mediante la prevención o la reducción de los impactos adversos de la generación y gestión de los residuos, la reducción de los impactos globales del uso de los recursos y la mejora de la eficacia de dicho uso (véase figura 1-18). Cada una de estas opciones debe ser analizada para cada tipo de residuo para determinar cuál es la opción que mejores resultados medio ambientales globales supone (Villoria Sáez, et al., 2012). Aunque existen varias opciones para gestionar los residuos, no todos los procesos permiten aplicar con éxito medidas que tienden a la prevención, por lo que una vez que se da el residuo, generalmente la manera más indicada para disminuir su impacto al medio ambiente es volver a utilizarlo (González Madariaga, 2005).

Figura 1-18 Jerarquía de gestión de residuos (El Parlamento Europeo, 2008)

La Directiva 98/2008/CE establece el siguiente objetivo para los RCD: "En el año 2020, la reutilización, el reciclado y la recuperación de otros materiales, incluyendo las operaciones de relleno con residuos no peligrosos de construcción y demolición se incrementará alcanzando como mínimo el 70% en peso de los RCD generados (excluido el material de origen natural definido en la categoría de 170504 en la LER)". Cabe señalar que esta Directiva no establece objetivos para cada categoría de residuo de forma individual, sino que exige un objetivo global y que, por otra parte, la definición de reciclado excluye explícitamente "[...] la transformación en materiales que se van a usar como combustibles o para operaciones de relleno."

1.3.3 Problemática derivada de la generación de residuos

Actualmente el promedio de reciclaje de RCD en la Unión Europea no llega al 40%. Los únicos países con un porcentaje de reciclaje por encima del 70% son Italia y Bélgica. España sigue teniendo un índice de reciclaje por debajo del 40% y además se encuentra entre los países con una mayor tasa de eliminación en vertedero, con casi un 50% (véase tabla 1-6).

	Reciclaje	Recuperación energética	Relleno	Incineración	Vertedero
Italia	76,9	1,6	0,2	5,2	16,0
Bélgica	73,9	13,6	0,0	4,3	8,2
Dinamarca	57,6	20,7	0,0	0,0	21,7
Letonia	55,5	8,7	0,9	0,0	34,8
Portugal	55,0	3,1	0,0	10,0	31,8
Francia	53,8	4,4	10,4	2,0	29,4
Eslovenia	51,8	4,9	33,5	0,6	9,2
Polonia	50,5	2,1	21,5	1,0	24,9
Hungría	49,6	8,5	3,5	0,7	37,7
Republica Checa	48,1	5,1	29,1	0,4	17,3
Países bajos	46,2	8,5	0,0	0,9	44,4
Croacia	45,6	1,4	2,0	0,0	51,0
Luxemburgo	43,3	2,5	16,0	0,0	38,3
Reino Unido	43,1	0,9	10,5	3,6	41,8
Alemania	42,7	10,5	25,3	2,3	19,2
Eslovaquia	41,2	4,4	0,0	0,8	53,6
España	36,3	3,4	12,5	0,0	47,7
Austria	34,7	6,5	20,1	0,2	38,6
Malta	33,7	0,0	37,4	0,4	28,5
Lituania	25,8	4,1	2,5	0,1	67,6
Estonia	20,0	2,5	11,9	0,0	65,6
Finlandia	13,8	4,8	0,0	0,5	80,9
Chipre	13,5	1,7	25,9	0,0	58,9
Irlanda	10,3	5,0	24,7	0,2	59,8
Suecia	9,3	4,7	1,6	0,1	84,4
Romania (1)	7,1	0,6	0,4	0,1	91,8
Grecia	3,2	0,2	8,1	0,0	88,4
Bulgaria	2,0	0,1	0,0	0,0	97,9

Tabla 1-6 Tratamiento de los residuos en la Unión Europea en porcentaje (European Commission, 2014)

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

- El agotamiento de los ecosistemas.
- La contaminación de suelos.

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

1.3.4 Buenas prácticas de gestión de residuos

Una correcta gestión de residuos, además de ser beneficiosa para el medio ambiente, puede llegar a suponer una reducción de costes al disminuirse el gasto en recursos naturales y al propiciar una disminución de tiempos de trabajo debido a la organización que precisa (Cámaras Oficiales de Comercio, 2006). Además, las buenas prácticas en gestión de residuos pueden convertirse en una herramienta eficaz de promoción, ya que los criterios ambientales son cada vez más tenidos en cuenta a la hora de adjudicar obras por la Administración o el sector privado (Villoria Sáez, et al., 2013).

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

Como el sector de la construcción es el máximo generador de residuos, tanto en la Unión Europea como en España, la correcta gestión de los RCD debe ser uno de los objetivos a alcanzar, ya que con pequeños cambios enfocados a mejorar la gestión de los RCD podemos conseguir grandes beneficios tanto económicos como ambientales. Dentro del sector de la construcción existen diferentes buenas prácticas de gestión de RCD que se pueden clasificar según sean buenas prácticas de prevención, reutilización o reciclado.

Entre las buenas prácticas de prevención de RCD destacan principalmente:

- **El uso de prefabricados**, que al ser productos de dimensiones estándar permiten controlar mejor su uso en fase de diseño de proyectos, para así generar una menor cantidad de residuos (Osmani, et al., 2008).
- **La compra de material a granel**, de esta forma se evitan numerosos materiales de embalaje innecesarios (Tam, 2008)
- **La previsión del movimiento de tierras**, en la ejecución de obras de construcción se genera gran cantidad de residuo mineral en la fase de movimiento de tierras. Este residuo puede ser valorizado in situ para su utilización como material de relleno (Villoria Sáez, et al., 2013).

Entre las buenas prácticas de reutilización de RCD destaca principalmente:

- **La separación en origen**, para facilitar la reutilización de los RCD estos deben estar limpios y libres de trazas de otros residuos, por ello es imprescindible que sean acopiados y separados del resto de RCD (Wang, et al., 2010). Así, por ejemplo, algunos elementos de madera que no necesitan tratamiento posterior pueden reutilizarse directamente, como las barreras de seguridad, los paneles de madera, la laminación para hacer parqué, etc. (Consejería de Medio Ambiente y Ordenación, 2006).

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

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

Y entre las buenas prácticas de reciclaje de RCD destacan principalmente:

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

Según la EHE-08 el árido reciclado puede emplearse, en su fracción gruesa, tanto para hormigón en masa como hormigón armado de resistencia característica no superior a 40 N/mm², quedando excluido su empleo en hormigón pretensado. Aunque es recomendable que la proporción de árido grueso reciclado no supere el 20%

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

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

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

Como se puede observar en la tabla 1-7, el precio medio del árido reciclado ronda los 3,27 €/T, frente a los 8,00 €/T del árido natural extraído en cantera.

Tarifa venta de para el 2014 (€/toneladas)	
Arena de miga	4,75
Zahorra 0-20mm	3,00
Zahorra 0-40mm	4,00
Grava 20-40mm	4,00
Zahorra 0-60mm	2,00
0-40mm Cerámico-hormigón	3,50
20-40mm Cerámico- hormigón	1,00
40-80mm Cerámico- hormigón	3,50
0-6 mm Material para relleno	3,00

Tabla 1-7. Precio de árido reciclado en la planta de reciclaje de Navalcarnero (UTE, Planta de Navalcarnero, 2014)

- **El reciclaje de residuos cerámicos**, por lo que respecta a los residuos cerámicos pueden, por un lado, recuperarse y reutilizarse directamente, como los ladrillos sobrantes o las tejas, o transformarse y utilizarse como sustitución de materias primas naturales, principalmente como áridos reciclados. Las principales aplicaciones de los residuos cerámicos son:
 - Rellenos y terraplenes. Deben evitarse residuos de árido procedente de ladrillos refractarios, por su contenido en periclase, que puede hacerlos expansivos y debe evitarse también la presencia de madera, ya que puede pudrirse y dejar huecos en la capa de relleno (CEDEX, 2012).
 - Bases y sub-bases granulares de nuevos firmes, tratadas o sin tratar. La reutilización que se puede hacer de los ladrillos de demoliciones de edificación depende de su naturaleza y del tipo de mortero empleado. La contaminación con cal o cemento no suele representar un problema, pero la presencia de mortero de yeso puede originar contenidos inaceptablemente altos de sulfatos en los ladrillos triturados.
 - En el caso de que el constructor disponga de ladrillos y tejas cerámicos en cantidades significativas, se pueden triturar para constituir una sub-base excelente para carreteras con tráfico medios o ligeros, siempre y cuando la granulometría y el nivel de contaminantes sean aceptables y no superen espesores superiores a 20 cm para su correcta compactación.
 - Fabricación de hormigones y morteros. Dada la reducida densidad del escombros triturado, estaría en la condición de árido ligero, por lo que puede ser de aplicación para la obtención de hormigones ligeros sin finos (CEDEX, 2012).

- El hormigón no ligero fabricado con ladrillo triturado suficientemente denso se puede utilizar en la construcción de estructuras de hormigón en masa y hormigón armado, tales como: muros de sótano, pilares, chimeneas, hormigón armado prefabricado, elementos para tejados y bloques de hormigón o tejas de hormigón para tejados.
 - Además, también es viable el uso de los residuos cerámicos procedentes de la construcción y la demolición como árido grueso en la fabricación de elementos de hormigón no estructural, así como para la ejecución de pavimentos continuos sobre mortero, tipo empedrados.
 - Para pavimentos asfálticos el ladrillo triturado no es aceptable debido a su alto requerimiento de betún y alto contenido de huecos.
- **El reciclaje de material asfáltico**, la opción de reciclaje más extendida y habitual para los residuos asfálticos es su uso como materia prima alternativa en la construcción de nuevos firmes. Utilizar el material bituminoso recuperado para la fabricación de nuevas capas bituminosas es la única manera de recuperar el betún que contiene y todas sus propiedades en obras de carreteras. Sin embargo, estos materiales también se pueden usar como materiales granulares, en capas de base o sub-base principalmente, en arcenes o en caminos. Otra posible aplicación sería su uso en rellenos y terraplenes, aunque no es habitual (CEDEX, 2012).
 - **El reciclaje del plástico PEAD y PVC**, este plástico reciclado se puede utilizar para construir losas para aceras, losas para parques y jardines, pavimentos de colegios y edificios públicos, etc. Sin embargo, el procedimiento de obtención de este material es muy costoso, por lo que es necesaria la recogida de suficientes residuos, limpios y no muy degradados para la viabilidad industrial y económica (CEDEX, 2012).

1.3.5 Marco normativo referente a la gestión de residuos

A continuación se presenta un registro de la normativa más representativa en cuanto a gestión de residuos.

1.3.5.1 Normativa europea

Debido al ordenamiento jurídico europeo, las normativas, en este caso directivas, deben de desarrollarse en cada estado miembro en función de sus particularidades pero tomando como base la orden europea. Este mecanismo se denomina transposición y entre las directivas relacionadas con la gestión de los residuos destacan:

La Directiva 94/62/CE, del Parlamento Europeo y del Consejo, de 20 de diciembre, relativa a los Envases y Residuos de Envases.

La Directiva 1999/31/CE, del Consejo, de 26 de abril de 1999, relativa al vertido de residuos, que pretende prevenir o reducir en lo posible los efectos negativos sobre el medio ambiente de los vertidos de residuos, tanto peligrosos como no peligrosos, durante todo el ciclo de vida del vertedero, y los posibles riesgos para la salud.

La Decisión 2000/532/CE de la Comisión, de 3 de mayo de 2000 que sustituye a la Decisión 94/3/CE por la que se establece una lista de residuos de conformidad con la letra a) del artículo 1 de la Directiva 75/442/CEE del Consejo relativa a los residuos y a la Decisión 94/904/CE del Consejo por

la que se establece una lista de residuos peligrosos en virtud del apartado 4 del artículo 1 de la Directiva 91/689/CEE del Consejo relativa a los residuos peligrosos.

La Directiva 2000/53/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, 18 de septiembre de 2000, relativa a los vehículos al final de su vida útil.

La Directiva 2002/96/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 27 de enero de 2003, sobre residuos de aparatos eléctricos y electrónicos.

La Decisión 2003/33/CE del Consejo, de 19 de diciembre de 2002, por la que se establecen los criterios y procedimientos de admisión de residuos en los vertederos con arreglo al artículo 16 y al anexo II de la Directiva 1999/31/CEE.

La Directiva 2004/12/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 11 de febrero de 2004, que modifica a la Directiva 94/62/CE, relativa a los Envases y Residuos de Envases, con la finalidad, entre otras consideraciones, de aumentar el grado de valorización y reciclado de envases para reducir su impacto medio ambiental, para lo que se fijan plazos y objetivos concretos.

La Directiva 2005/20/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 9 de marzo de 2005, que modifica a la Directiva 94/62/CE, relativa a los Envases y Residuos de Envases

La Directiva 2008/98/CE, del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de noviembre de 2008, que deroga a las Directivas 75/439/CEE (gestión de aceites usados), 91/689/CEE (residuos peligrosos) y 2006/12/CE (relativa a los residuos).

La Directiva 2008/99/CE del Parlamento y del Consejo Europeo, de 19 de noviembre de 2008, relativa a la protección del medio ambiente mediante el Derecho penal, publicada en el Diario Oficial de la Unión Europea. Esta Directiva establece medidas relacionadas con el Derecho penal para tratar de proteger con mayor eficacia el medio ambiente. Dicha Directiva obliga a los países del Espacio Económico Europeo a poner en vigor las disposiciones legales, reglamentarias y administrativas necesarias para dar cumplimiento a lo establecido en ella.

La Directiva 2009/31/CE, de 23 de abril de 2009, relativa al almacenamiento geológico de dióxido de carbono, que modifica a la Directiva 2006/12/CE.

EL Reglamento (UE) nº 57/2013 de la Comisión de 23 de enero de 2013 que modifica el Reglamento (CE) nº 1418/2007, relativo a la exportación, con fines de valorización, de determinados residuos a determinados países no miembros de la OCDE.

El Reglamento (UE) nº 715/2013 de la Comisión de 25 de julio de 2013 por el que se establecen criterios para determinar cuándo la chatarra de cobre deja de ser residuo con arreglo a la Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo.

1.3.5.2 Normativa Nacional

El Real Decreto 833/1988, de 20 de julio, por el que se aprueba el Reglamento para la ejecución de la Ley 20/1986, Básica de Residuos Tóxicos y Peligrosos y que recoge los preceptos de la Directiva 91/689/CEE del Consejo, de 12 de diciembre de 1991, relativa a los residuos peligrosos.

La Ley 11/1997, de 24 de abril, de Envases y Residuos de Envases, que es la primera transposición hecha por un Estado miembro de la Unión Europea de la Directiva 94/62/CE, y que puede

considerarse, junto con las determinaciones que son de aplicación a los residuos urbanos contenidas en la Ley básica de Residuos, como la principal norma reguladora del tratamiento y gestión de este tipo de residuos. Esta ley ha sido desarrollada por el Reglamento aprobado por el Real Decreto 782/1998, de 30 de abril (BOE de 1 de mayo de 1998), y completada por la Orden de 27 de abril de 1998, por la que se establecen las cantidades individualizadas a cobrar en concepto de depósito y el símbolo identificativo de los envases que se pongan en el mercado a través del sistema de depósito, devolución y retorno. El citado Reglamento ha sido posteriormente modificado por el Real Decreto 252/2006, de 3 de marzo, que también modifica la propia Ley de Envases y Residuos de Envases.

El Real Decreto 952/1997, de 20 de junio, por el que se modifica el Reglamento para la ejecución de la Ley 20/1986, de 14 de mayo, Básica de Residuos Tóxicos y Peligrosos, aprobado mediante Real Decreto 833/1988, de 20 de julio.

El Real Decreto 1481/2001, de 27 de diciembre, que se transpone de la Directiva 1999/31/CE y por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero. El artículo 8.1.b).10º del Real Decreto 1481/2001, ha sido modificado mediante la disposición final primera del Real Decreto 105/2008, de 1 de febrero, por el que se regula la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición, o residuos inertes.

La Orden MAM/304/2002, de 8 de febrero, por la que se publican las operaciones de valorización y eliminación de residuos y la LER, donde figuran con asterisco los residuos peligrosos.

El Real Decreto 9/2005, de 14 de enero, por el que se establece la relación de actividades potencialmente contaminantes del suelo y los criterios y estándares para la declaración de suelos contaminados, aprobado por el Consejo de Ministros de 14 de enero de 2005, a propuesta de los Ministerios de Medio Ambiente y de Sanidad y Consumo.

El Real Decreto 208/2005, de 25 de febrero, sobre aparatos eléctricos y electrónicos y la gestión de sus residuos.

El Real Decreto 252/2006, de 3 de marzo, por el que se revisan los objetivos de reciclado y valorización establecidos en la Ley 11/1997 y que transpone a la Directiva 2004/12/CE relativa a los envases y residuos de envases.

El Real Decreto 679/2006, de 2 de junio, por el que se regula la gestión de los aceites industriales usados.

El Real Decreto 105/2008, de 1 de febrero, por el que se regula la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición y se modifica al Real Decreto 1481/2001 que se regula la eliminación de residuos mediante su depósito en vertedero. Este Real Decreto es el punto de referencia legal relacionado con la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición, yendo más allá de la normativa europea y contemplando la concreta aplicación del principio de responsabilidad del productor y el poseedor a estos residuos.

El Real Decreto 1304/2009, de 31 de julio, que modifica al Real Decreto 1481/2001, para subsanar algunas deficiencias en la transposición de la Directiva 1999/31/CE, puestas de manifiesto por la Comisión Europea. En julio de 2009 finalizó el plazo para que todos los vertederos que existían en España a la fecha de entrada en vigor del Real Decreto 1481/2001, cumplan con los requisitos en él establecidos. En este marco, se ha aprobado el Real Decreto 1974/2008, por el que se regula la

concesión directa de una subvención a las comunidades autónomas para la ejecución urgente de actuaciones de clausura de vertederos ilegales.

La Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados, que deroga la antigua Ley 10/1998, de 21 de abril de Residuos y se transpone de la Directiva 2008/99/CE. Esta ley define y clasifica los residuos en: domésticos, comerciales, industriales y peligrosos, involucra a todos los agentes económicos, promueve la estricta aplicación de los principios “quien contamina, paga” y pretende, como objetivo ambiental prioritario, minimizar en origen el creciente volumen de los residuos, reciclar todos los materiales posibles, reutilizar aquéllos que sean aprovechables, compostar la materia orgánica y valorizar energéticamente el resto de desechos para reducir al máximo las basuras que van a parar a los vertederos. Además, uno de los cambios que aportó la ley 10/1998 y que mantiene la ley 22/2011 es la relación, a través de un listado, de todos los residuos que pueden ser generados.

La Orden AAA/661/2013, de 18 de abril, por la que se modifican los anexos i, ii y iii del Real Decreto 1481/2001, de 27 de diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero.

La Ley 5/2013, de 11 de junio, por la que se modifican la Ley 16/2002, de 1 de julio, de prevención y control integrados de la contaminación y la Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados.

La Orden AAA/1072/2013, de 7 de junio, sobre utilización de lodos de depuración en el sector agrario.

El Real Decreto 815/2013, de 18 de octubre, por el que se aprueba el Reglamento de emisiones industriales y de desarrollo de la ley 16/2002, de 1 de julio, de prevención y control integrados de la contaminación, que deroga al Real Decreto 653/2003.

La Resolución de 20 de diciembre de 2013, de la dirección general de calidad y evaluación ambiental y medio natural, por la que se publica el acuerdo del Consejo de Ministros de 13 de diciembre de 2013, por el que se aprueba el programa estatal de prevención de residuos 2014-2020.

Además, el Estado, aparte de aprobar la legislación básica sobre residuos, elabora los distintos planes nacionales sobre residuos, que son el resultado de la integración de los respectivos planes autonómicos tras las oportunas tareas de coordinación llevadas a cabo en el seno de la Conferencia Sectorial de Medio Ambiente. (Actualmente está vigente el Plan Nacional Integral de Residuos (PNIR) 2008-2015).

1.4 EL YESO COMO MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN

El término yeso hace referencia por una parte a la piedra natural denominada “aljez” o “piedra de yeso”, compuesta químicamente por sulfato de calcio cristalizado y agua, y por otra parte al producto en polvo que se obtiene por calcinación y molienda de la piedra de aljez¹.

¹ Actualmente también se considera la obtención de yeso como subproducto del proceso industrial por el que se produce el ácido fosfórico. Este subproducto se conoce por el nombre de fosfoyeso o flue gas desulfurization (FGD) Gypsum.

La obtención de yeso a partir de la piedra de aljez se conoce desde la antigüedad y por ello el yeso es uno de los materiales de construcción más antiguos que aún se utiliza. De hecho, ya en el neolítico se utilizaba como elemento de unión de piezas de mampostería y para revestir los paramentos de las viviendas, sustituyendo al mortero de barro.

La cultura musulmana difundió en España el empleo del yeso, ampliamente adoptado en el valle del Ebro y sur de Aragón, dejando hermosas muestras de su empleo decorativo en el arte de las zonas de Aragón, Toledo, Granada y Sevilla.

El yeso es un buen material de construcción porque cuando se calienta pierde rápidamente su agua de hidratación, produciendo yeso calcinado, deshidratado parcial o totalmente, que recupera su estructura cristalina cuando se hidrata, fraguando y endureciendo (Gomis Yagües, 2014).

Sus principales propiedades son (Villanueva Domínguez, 1975):

- Es un material incombustible y es capaz de retardar la propagación del fuego hasta tres horas.
- Debido a su contenido en agua, que puede llegar hasta un 20,6%, en caso de incendio hasta que se evapora se evita que la temperatura del paramento supere los 100°C.
- No contiene sustancias peligrosas, por tanto no es tóxico.
- Es un material moldeable, por lo que puede ser usado en múltiples derivados de prefabricados y directamente en obra gracias a su facilidad para adaptarse a superficies o moldes.
- Tiene un fraguado regulable que depende, entre otras cosas, de la dosificación o del método de ejecución de la pasta y que se puede controlar mediante la incorporación de aditivos.
- Evita, generalmente, la fisuración por retracción durante el secado gracias a la expansión que se produce durante su fraguado.
- Es un material fácilmente mecanizable con herramientas comunes, como serruchos o martillos, sin ocasionar grandes costes.
- Su difusión de vapor de agua relativa es aproximadamente quince veces menor que a través del aire, afirmando por tanto que a través del yeso las edificaciones transpiran.
- Tiene una dureza superficial que, por regla general y en condiciones normales de utilización, es suficiente.

Por otra parte, los principales inconvenientes del yeso son:

- Su fragilidad, ya que se rompe o fisura con facilidad cuando una fuerza impacta sobre él.
- La falta de tenacidad que determina una rotura frágil, sin prácticamente capacidad de deformación.
- Las alteraciones que sufre a causa del agua, lo que, en condiciones normales, lo inutiliza para aplicaciones en el exterior. Estas alteraciones pueden producir variaciones dimensionales, que oscilan entre 1,5 y 2 mm/m y pérdidas de resistencia. El grado de absorción de agua del yeso depende de su porosidad y por tanto, de su densidad y del agua de amasado. Puede decirse que los yesos a medida que se aproximan a su peso específico absorben menos agua y se comportan mejor frente a ella.
- Su coeficiente de conductividad térmico, que en algunos casos es mayor incluso que el de los ladrillos cerámicos.

1.4.1 Fabricación del yeso

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

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

Desde el final de los años 50 se comenzó a industrializar la fabricación del yeso mediante el empleo de hornos continuos o intermitentes en instalaciones fijas. Consiguiéndose materiales más uniformes a los que se denominaba yesos industriales o yesos de segunda generación. Los yesos de segunda generación mantenían el yeso grueso y fino originales aunque más uniformes y añadían un yeso más fino y de mejor calidad denominado escayola.

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

Actualmente los tipos de yeso normalizados en España, de acuerdo con la norma UNE-EN 13279-1 (AENOR, 2009), son los que aparecen en la tabla 1-8.

Designación	Identificación
Conglomerantes a base de yeso ² , por ejemplo:	A
Para su uso directo o para su transformación (productos en polvo, secos)	A1
Para su empleo directo en la obra	A2
Para su transformación (por ejemplo, en paneles de yeso, en places de yeso laminado, en places de escayola para techos)	A3
Yeso para la construcción:	B
Yeso de construcción	B1
Mortero de yeso	B2
Mortero de yeso y cal	B3
Yeso de construcción aligerado	B4
Mortero de yeso aligerado	B5
Mortero de yeso y cal aligerado	B6
Yeso de construcción de alta dureza	B7
Yeso para aplicaciones especiales:	C
Yeso para trabajos con staff	C1
Yeso para morteros de agarre	C2
Yeso acústico	C3
Yeso con propiedades de aislamiento térmico	C4
Yeso para proteínas contra el fuego	C5
Yeso para su aplicación en capa fina, producto de acabado	C6

Tabla 1-8. Tipos de conglomerantes a base de yeso y de yesos para la construcción según la norma UNE-EN 13279-1 (AENOR, 2009)

² De acuerdo con la norma UNE-EN 13279-1 (AENOR, 2009) se entiende que los conglomerantes a base de yeso incluyen también las escayolas.

1.4.1.1 *Química del yeso*

El aljez, o piedra de yeso, constituye la materia prima necesaria para la obtención del yeso y la escayola. El aljez es una roca sedimentaria cuyo origen geológico se encuentra en la desecación, por evaporación, de lagos salados o mares interiores sin aliviaderos al mar, con láminas de agua de poco espesor y bajo un clima árido, y está compuesto por sulfato cálcico dihidratado, generalmente acompañado de impurezas de tipo arcilloso (Villanueva Domínguez & García Santos, 2001).

El compuesto de sulfato cálcico se caracteriza por cinco fases sólidas: sulfato de calcio dihidratado, sulfato de calcio semihidrato (o hemidrato), anhidrita II y III y anhidrita I (que sólo existe por encima de los 1.180°C).

El sulfato de calcio dihidratado ($\text{SO}_4\text{Ca} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) es tanto el material inicial antes de la deshidratación, como el producto final después de la rehidratación. El sulfato de calcio semihidrato ($\text{SO}_4\text{Ca} \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}$) aparece en dos formas distintas: alfa y beta, representando dos estados cristalinos. Se diferencian entre ellos por sus características en la aplicación, por sus calores de hidratación y por sus métodos de preparación. El semihidrato alfa está formado por grandes partículas primarias compactas, bien formadas y transparentes; el semihidrato beta se caracteriza por estar formado por partículas secundarias escamosas y rugosas que se agrupan formando cristales muy pequeños.

Los rangos de estabilidad termodinámica para las fases del sulfato de calcio son las siguientes: por debajo de los 40°C, y en condiciones atmosféricas normales, sólo es estable el sulfato de calcio dihidratado; las otras fases son obtenidas a temperaturas más altas por la progresiva deshidratación del dihidrato de calcio, en el siguiente orden: Dihidrato – Semihidrato – Anhidrita III – Anhidrita II.

En condiciones atmosféricas normales, el semihidrato y la anhidrita III son estables, y por debajo de 40°C, en presencia de agua o vapor de agua se convierten en dihidrato; lo mismo ocurre con la anhidrita II; de todas formas, entre 40°C y 1°C, la anhidrita II es estable.

Para sintetizar fases puras en el laboratorio se parte del semihidrato beta, obtenido calentando entre 45°C y 200°C el dihidrato bajo presión de vapor de agua, es decir, en aire seco o en vacío. Un calentamiento más homogéneo a 50°C, en vacío, o hasta 200°C a presión atmosférica, produce anhidrita III beta.

Con una presión parcial de vapor de agua pequeña, si hay una eliminación rápida del vapor de agua desprendido y si el tamaño de partícula es pequeña, se forma directamente anhidrita III' beta, sin formación intermedia de semihidrato. La superficie específica de esta anhidrita puede ser hasta diez veces superior a la de la Anhidrita III beta.

El semihidrato alfa se obtiene a partir del dihidrato con una presión parcial de vapor de agua elevada, por ejemplo, por encima de 45°C en soluciones ácidas o salinas, o por encima de 97,2°C en agua bajo presión. Una eliminación cuidadosa del agua a 50°C en vacío o 100°C a presión atmosférica produce anhidrita III alfa.

La anhidrita III presenta dificultades para ser preparada de manera pura, porque por encima de los 100°C empieza a formarse anhidrita II y entonces la anhidrita III reacciona inmediatamente con el vapor de agua para formar semihidrato.

El semihidrato beta obtenido a partir de la anhidrita III beta y el obtenido a partir de la anhidrita III' beta deberían ser designados como semihidratos 'beta. La anhidrita III alfa absorbe el vapor de agua para formar semihidrato alfa, además el semihidrato en contacto con la humedad absorbe, de forma reversible, hasta un 12% de su peso en agua sin convertirse en dihidrato. Esta agua no estequiométrica del semihidrato puede ser eliminada completamente secando a 40°C.

La anhidrita II se forma entre los 200°C y los 1180°C. Por encima de 1180°C se forma la anhidrita I. La cinética de la deshidratación del dihidrato en contacto con soluciones acuosas o con una fase gaseosa sustenta estos procesos reactivos. De todas formas, las hipótesis relativas a los mecanismos de reacción en la fase gaseosa aún no han sido consistentemente demostradas, debido a que la cinética de los cambios de fase está a menudo inhibida porque las condiciones de ensayo no han sido definidas con precisión (Del Río Merino, 1999).

1.4.1.2 Aditivos que modifican las propiedades del yeso

Se denominan aditivos a los productos sólidos, pulverulentos o líquidos que se incorporan en las pastas, morteros y hormigones en estado fresco con objeto de mejorar alguna de sus características en sentido positivo y de forma permanente, tanto en estado fresco como endurecido (acción estable a lo largo del tiempo). Se recomienda principalmente el empleo de aditivos líquidos, pues con ellos se consigue una mayor homogeneidad.

Hace 25 años el uso de aditivos en España era muy inferior al nivel alcanzado en los países tecnológicamente más avanzados donde se incorporaban aditivos en un 80% del hormigón fabricado. Hoy en día, y debido fundamentalmente a los avances de la química en la construcción y a la aparición de normativa, se han igualado estas cifras, considerando el profesor Fernández Cánovas a los aditivos como el cuarto componente de los hormigones (Del Río Merino, 1999).

Los aditivos tienen una función principal que se caracteriza por modificar una de las características del hormigón o pasta y una función secundaria y accesorio de modificar alguna/s de las características de los materiales, independiente de la principal. A la propiedad del aditivo de modificar características, sin ser función secundaria, se denomina efecto secundario.

Los aditivos se pueden utilizar siempre que se justifique que la sustancia agregada en las proporciones y condiciones previstas produzca el efecto deseado sin perturbar excesivamente las restantes características del hormigón, o afectando a su durabilidad o a la corrosión de las armaduras. Hay que tener en cuenta las dosificaciones del aditivo y los componentes de la masa. Salvo casos especiales los aditivos no deben superar el 5% en peso.

La norma UNE-EN 934-2 (AENOR, 2010) clasifica los aditivos en:

- Aditivo reductor de agua/plastificante: aditivo que, sin modificar la consistencia, permite reducir la cantidad de agua de amasado, o que, sin modificar el contenido en agua, aumenta el asiento/escurrimiento, o que produce ambos efectos a la vez.
- Aditivo reductor de agua de alta actividad/superplastificante: aditivo que, sin modificar la consistencia, permite reducir fuertemente la cantidad de agua de amasado, o que, sin modificar el contenido de agua, aumenta considerablemente el asiento/escurrimiento, o que produce ambos efectos a la vez.
- Aditivo retenedor de agua: aditivo que reduce la pérdida de agua, disminuyendo la exudación.

- Aditivo inclusor de aire: aditivo que permite incorporar, durante el amasado, una cantidad controlada de pequeñas burbujas de aire, uniformemente repartidas, que permanecen después del endurecimiento.
- Aditivo acelerador de fraguado: aditivo que disminuye el tiempo del principio de transición de la mezcla para pasar del estado plástico al estado rígido.
- Aditivo acelerador de endurecimiento: aditivo que aumenta la velocidad de desarrollo de las resistencias iniciales, con o sin modificación del tiempo de fraguado.
- Aditivo retardador de fraguado: aditivo que aumenta el tiempo del principio de transición de la mezcla para pasar del estado plástico al rígido.
- Aditivo hidrófugo: aditivo que reduce la absorción capilar.
- Aditivo retardador de fraguado/reductor de agua/plastificante: aditivo que combina los efectos de un aditivo reductor de agua y los de un aditivo retardador de fraguado (función secundaria).
- Aditivo retardador de fraguado/reductor de agua de alta actividad/superplastificante: aditivo que combina los efectos de un aditivo reductor de agua de alta actividad y los de un aditivo retardador de fraguado (función secundaria).
- Aditivo acelerador de fraguado/reductor de agua/plastificante: aditivo que combina los efectos de un aditivo reductor de agua y los de un aditivo acelerador de fraguado (función secundaria).

1.4.1.3 Yesos aligerados

La norma UNE-EN 13279-1:2009 denomina a los yesos aligerados como B4 y los define como conglomerantes a base de yeso con un mínimo de un 50% de sulfato de calcio como componente activo principal, y con un contenido en cal inferior al 5%, que llevan incorporados agregados ligeros inorgánicos tales como perlita expandida o vermiculita, o agregados ligeros orgánicos (AENOR, 2009).

Por otra parte, el reglamento particular de la marca AENOR para yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción RP 35.03, específico para yesos de construcción aligerados, establece como valor de referencia una densidad máxima de probeta de 1 g/cm³ para yesos aligerados. Por encima de esta densidad se consideraría un defecto del material.

El yeso aligerado se vende principalmente como yeso de proyección con propiedades térmicas, acústicas o de protección contra incendios mejoradas, y también para la producción de prefabricados ligeros para tabicar o trasdosar. Respecto a los yesos aligerados que se han encontrado en el mercado se han encontrado principalmente tres tipos de agregados ligeros utilizados para aligerarlos:

- Perlita: utilizada especialmente para producir yeso de proyección con propiedades contra incendios o para incrementar el aislamiento térmico y acústico de los paramentos. Como por ejemplo el Yeso de proyección aligerado de *Yesamsa* (Yesamsa, 2014) o el yeso de proyectar de *Yedesa* (Yedesa, 2014)
- Vermiculita: utilizada especialmente para producir yeso de proyección con propiedades contra incendios. Como por ejemplo el *Yeso Igniver* de Placo (Placo, 2014).
- Poliestireno expandido: utilizado para mejorar las propiedades térmicas de los yesos tradicionales, como por ejemplo el *insulation plaster* de Groetz (Groetz, 2016).

1.4.2 Aplicaciones del yeso en la construcción

Las principales aplicaciones reconocidas del yeso en la construcción se pueden dividir en dos categorías:

- Aplicación tradicional: se comercializa en polvo y se trabaja in situ.
- Prefabricado: los prefabricados se consideran el futuro de los materiales de construcción, porque benefician el aprovechamiento de la materia prima, ayudan a reducir la generación de residuos en obra y mejoran la calidad del producto final.

a) Aplicaciones tradicionales

La aplicación más tradicional del yeso es en forma de revestimiento continuo y se denomina guarnecido o enlucido, dependiendo de si se utiliza yeso grueso o yeso fino, respectivamente. Las principales características de este tipo de aplicaciones son las siguientes:

- **Guarnecido**, es un revestimiento continuo confeccionado con pasta de yeso grueso y aplicado sobre un soporte para regularizar su superficie. Su espesor se determina en función de las irregularidades planimétricas del soporte que se recubre, debiendo estar comprendido entre 10 y 20 mm.

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

- Densidad aparente: para yesos aligerados³ (YA) <800 kg/dm³, de acuerdo con RP 35.03 (AENOR, 2009).
- Reacción al fuego: A1 (<1% materia orgánica). Con mayor cantidad de materia orgánica seguir norma UNE-EN 13501-1 (AENOR, 2010).
- Conductividad térmica: si no cumple los valores mínimos de la siguiente tabla seguir norma UNE-EN 12664 (AENOR, 2002).

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

Tabla 1-9 Conductividad térmica mínima para yesos, norma UNE-EN 13279-1 (AENOR, 2009)

³ El reglamento particular 35.03 define los yesos aligerados como aquel conglomerante a base de yeso que puede contener agregados ligeros como perlita expandida o vermiculita y tiene una densidad aparente menor de 800 kg/dm³, una densidad de probeta menor de 1 g/cm³ o que consigue una reducción de densidad aparente de un 8% o más (AENOR, 2009).

- Contenido en conglomerante: > 50%.
- Tiempo de fraguado mínimo: 20 min (aplicación manual).
- Tiempo de fraguado mínimo: 50 min (aplicación mecánica).
- Resistencia a flexión: en general $\geq 1 \text{ N/mm}^2$, valores más específicos se muestran en la tabla 1-10.

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

Tabla 1-10 Resistencia mecánica a flexión mínima para yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso, especificadas en el RP 35.01 (AENOR, 2009), el RP 35.02 (AENOR, 2009) y el RP 35.03 (AENOR, 2009).

- Resistencia a compresión: $\geq 2 \text{ N/mm}^2$.
- Adherencia: si la rotura aparece en la interfase yeso-soporte, el valor debe ser $\geq 0,1$.
- Dureza superficial: $\geq 65 \text{ u. Shore C}$ y $\geq 45 \text{ u. Shore C}$ para yesos aligerados, de acuerdo con RP 35.03 (AENOR, 2009).
- Dureza superficial sobre soporte: los valores mínimos se muestran en la tabla 1-11.

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

Tabla 1-11 Dureza superficial mínima para yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso especificadas en el RP 35.01 (AENOR, 2009) y el RP 35.02 (AENOR, 2009).

Otros requerimientos opcionales se presentan a continuación:

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

- **Enlucido**, es una capa de terminación preparada con pasta de yeso fino y aplicado sobre una superficie previamente guarnecida. Con él se obtiene un acabado más liso y satinado, que puede servir de base a cualquier tipo de pintura.

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

- Densidad: para yesos aligerados (YA) $< 800 \text{ kg/dm}^3$, de acuerdo con RP 35.03 (AENOR, 2009).
- Reacción al fuego: A1 ($< 1\%$ materia orgánica). Con mayor cantidad de materia orgánica seguir norma UNE-EN 13501-1 (AENOR, 2010).

- Conductividad térmica: si no cumple los valores mínimos de la tabla 1-9 seguir norma UNE-EN 12664 (AENOR, 2002).
- Contenido en conglomerante: > 50%.
- Tiempo de fraguado mínimo: 20 min (aplicación manual).
- Tiempo de fraguado mínimo: 50 min (aplicación mecánica).
- Resistencia a flexión: en general ≥ 1 N/mm², valores más específicos se muestran en la tabla 1-10.
- Resistencia a compresión: ≥ 2 N/mm².
- Adherencia: si la rotura aparece en la interfase yeso-soporte, el valor debe ser $\geq 0,1$.
- Dureza superficial: ≥ 65 u. Shore C y ≥ 45 u. Shore C para yesos aligerados, de acuerdo con RP 35.03 (AENOR, 2009).
- Dureza superficial sobre soporte: los valores mínimos se muestran en la tabla 1-11.
- Tiempo de fraguado Vicat: > 20 min.

Otros requerimientos opcionales se presentan a continuación:

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

b) Aplicación prefabricados

- **Paneles para tabiques**, son elementos de yeso con forma de paralelepípedo y con un espesor de 50-150 mm que se destinan a la elaboración de particiones interiores sin carga. Estos elementos suelen ir machihembrados y se unen entre sí mediante mezclas preparadas en la misma obra o con adhesivos especiales. Estos elementos se fabrican industrialmente y generalmente se utilizan para su elaboración yesos o escayola de alta pureza, aditivos, fibras y en alguna ocasión adiciones inorgánicas ligeras.

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

- Dimensiones: longitud ≤ 1000 mm, espesor 50-150 mm y superficie mínima 0,1 m².
- Densidad: baja (600-800 kg/m³), media (800-1100 kg/m³) y alta (1100-1500 kg/m³).
- Resistencia mecánica a flexión: > 1,7 KN (espesor 50 mm), > 1,9 KN (espesor 60 mm), > 2,3 KN (espesor 70 mm), > 2,7 KN (espesor 80 mm), > 4,0 KN (espesor 100 mm).
- Dureza superficial: 40 unidades Shore C (densidad baja), 55 unidades Shore C (densidad media), 80 unidades Shore C (densidad alta).
- Resistencia al impacto: la huella dejada por una bola de acero con una energía potencial de 245 J no será superior a 20mm de diámetro.
- Reacción al fuego: A1 (<1% materia orgánica). Con mayor cantidad de materia orgánica seguir norma UNE-EN 13501-1 (AENOR, 2010).
- Resistencia al fuego (véase tabla 1-12), para los casos no contemplados en la siguiente tabla, es necesario el ensayo en un laboratorio acreditado.

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

Tabla 1-12 Valores de uso para la resistencia al fuego de tabiques de paneles de yeso, norma UNE-EN 15318 (AENOR, 2009)

- Aislamiento acústico (véase tabla 1-13), para los casos no contemplados en la tabla anterior, es necesario el ensayo en un laboratorio acreditado.

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

Tabla 1-13 Valores de uso para el aislamiento acústico en dB de tabiques sin aberturas y tabiques sin aberturas y de gran altura, norma UNE-EN 15318 (AENOR, 2009)

- Desviación en la planicidad de los paneles: <1 mm.
- Contenido de humedad: ≤8%.
- Capacidad de absorción de agua: clase H2 ≤5% y clase H1 ≤2.5% (véase tabla 1-15).

Otros requerimientos opcionales se presentan a continuación:

- Aislamiento directo al ruido aéreo, normas UNE-EN ISO 140-3 (AENOR, 1995) y UNE-EN ISO 717-1 (AENOR, 2013).
- **Placas de yeso laminado**, son productos prefabricados que ofrecen soluciones en "seco" para tabiquería, trasdosados y falsos techos, con soluciones de entramado autoportante, que incorporan a la edificación: calidad, aislamiento, seguridad y estética.

A continuación se presentan los requerimientos mínimos exigidos a esta aplicación, que vienen regulados principalmente por la norma UNE-EN 520 (AENOR, 2010):

- Resistencia a flexión: los valores mínimos son los que aparecen en la tabla 1-14.

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

Tabla 1-14 Valores mínimos de resistencia a flexión de placas de yeso laminado, norma UNE-EN 520 (AENOR, 2010)

Otros requerimientos opcionales se presentan a continuación:

- Deformación bajo carga, norma UNE-EN 520 (AENOR, 2010).
- Resistencia al fuego, norma UNE-EN 13501-2 (AENOR, 2010).
- Resistencia al impacto, norma ISO 7892 (International Organization for Standardization, 1988).
- Permeabilidad al vapor de agua, norma UNE-EN 12524 (AENOR, 2000) y UNE-EN ISO 12572 (AENOR, 2002).
- Permeabilidad al aire, norma UNE-EN 12114 (AENOR, 2000).
- Aislamiento directo al ruido aéreo, normas UNE-EN ISO 140-3 (AENOR, 1995) y UNE-EN ISO 717-1 (AENOR, 2013).
- Absorción acústica, norma UNE-EN ISO 354 (AENOR, 2004).
- Resistencia térmica, norma UNE-EN 12664 (AENOR, 2002).
- Absorción de agua para placas de yeso laminado con capacidad de absorción de agua reducida, los valores máximos son los que aparecen en la tabla 1-15.

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

Tabla 1-15 Valores de absorción máximos para placas de yeso laminado con capacidad de absorción de agua reducida, norma UNE-EN 520 (AENOR, 2010)

- Factor de resistencia al vapor de agua para placas de yeso laminado para exteriores, ≤25.
 - Densidad de placas de yeso laminado de densidad controlada, $\geq 0,8 \times 10^3$ kg/m³.
 - Diámetro de huella para dureza superficial de placas de yeso laminado de alta dureza, ≤15 mm.
- **Paneles para techos suspendidos**, son productos prefabricados que ofrecen soluciones en "seco" para la construcción de techos suspendidos en aplicaciones de interior como techos continuos o techos desmontables.

A continuación se presentan los requerimientos mínimos exigidos a esta aplicación, que vienen regulados principalmente por las normas UNE-EN 13964 (AENOR, 2008) y UNE-EN 14246 (AENOR, 2007):

- Ortogonalidad: <1 mm.

- Reacción al fuego: A1 (<1% materia orgánica). Con mayor cantidad de materia orgánica seguir norma UNE-EN 13501-1 (AENOR, 2010).
- Humedad: se debe comprobar el aislamiento térmico y el punto de condensación de acuerdo con las normas UNE-EN ISO 6946 (AENOR, 2012) y UNE-EN ISO 10211-1 (AENOR, 1995). El contenido medio de humedad no debe ser superior al 6% y ningún valor individual debe ser superior al 8%.
- Resistencia a flexión: $\geq 6\text{kg}$ en paneles para techos desmontables y $\geq 4\text{kg}$ en paneles para techo continuos.
- PH: 6,5-10,5.

Otros requerimientos opcionales se presentan a continuación:

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

1.4.3 El consumo de yeso en la construcción

En general, el consumo mundial de yeso no ha dejado de crecer y de hecho se prevé que para el año 2023 se duplique con respecto al consumo estimado para el año 2014. De todos los continentes, Asia es el mayor consumidor de yeso, seguido de lejos por América y Europa. El país con mayor consumo es China y además es el país con la previsión de aumento de consumo más importante, a diferencia de los países de la Unión Europea y Estados Unidos cuyo consumo se prevé que aumente en próximos años pero de manera poco significativa (véase figura 1-19).

Figura 1-19 Previsión de consumo mundial de yeso (Smithers Apex, 2016)

1.4.4 Problemática derivada del consumo de yeso

La producción mundial de yeso proveniente de fuentes naturales se estima en 100 millones de toneladas anuales. Esta producción se obtiene principalmente de seis países, entre los que se encuentra España (figura 1-20).

Figura 1-20 Producción mundial de yeso en 2014 (USGS, 2014)

En la Unión Europea, España es el líder indiscutible de producción y el principal exportador del continente. A nivel nacional, como se puede ver en la figura 1-21, Andalucía es la Comunidad Autónoma con mayor porcentaje de producción. Seguido por la Comunidad de Madrid, Castilla la Mancha y Cataluña.

Figura 1-21 Producción de yeso en España en 2014 (Gobierno de España, 2014)

Uno de los principales factores que hacen que el yeso tenga un elevado impacto ambiental y que afectan especialmente a España por su importante producción, es el debido a la explotación de canteras de aljez, ya que pueden producir:

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

Otro de los factores que tiene un menor impacto es el proceso de calcinación, por el uso de combustibles fósiles y la emisión de gases de efecto invernadero. Y también hay que tener en cuenta que, a pesar de que no es un material escaso, al ser un recurso natural, es necesario transportarlo tanto a las fábricas donde se produce, como a los países o zonas donde sí es escaso, lo que en general conlleva un consumo de combustibles fósiles.

Por último, aunque no sea un factor de impacto ambiental, el yeso es un material con un coeficiente de conductividad térmica normal dentro de los materiales de construcción, por lo que no aporta ningún valor añadido de eficiencia energética dentro de un sistema constructivo.

1.4.5 Marco normativo referente al yeso de construcción

A continuación se presenta un registro de la normativa más representativa en cuanto al yeso de construcción:

UNE 102037:1985 Yesos y escayolas de construcción. Método de análisis de fases.

UNE-EN 14195:2005 Perfilería metálica para su uso en sistemas de placas de yeso laminado. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo.

UNE-EN 14195:2005/AC: 2006 Perfilería metálica para su uso en sistemas de placas de yeso laminado. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo.

UNE-EN 520:2005+A1:2010 Placas de yeso laminado. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo.

UNE-EN 13914-2:2006 Diseño, preparación y aplicación del revoco exterior y del enlucido interior. Parte 2: Diseño, consideraciones y principios esenciales para enlucidos interiores.

UNE-EN 13914-1:2006 Diseño, preparación y aplicación del revoco exterior y del enlucido interior. Parte 1: Revoco exterior.

UNE-EN 14209:2006 Molduras preformadas de yeso laminado. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo.

UNE-EN 13658-1:2006 Mallas y junquillos metálicos. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo. Parte 1: Revestimientos interiores.

UNE-EN 13658-2:2006 Mallas y junquillos metálicos. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo. Parte 2: Revestimientos exteriores.

UNE-EN 13963:2006 Material para juntas para placas de yeso laminado. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo.

UNE-EN 13963:2006 ERRATUM: 2009 Material para juntas para placas de yeso laminado. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo.

UNE-EN 14246:2007 Placas de escayola para techos suspendidos. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo.

UNE-EN 15318:2009 Diseño e instalación de paneles de yeso.

UNE-EN 14353:2009+A1:2012 Guardavivos y perfiles metálicos para placas de yeso laminado. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo.

UNE-EN 14566+A1:2009 Elementos de fijación mecánica para sistemas de placas de yeso laminado. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo.

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

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.

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.

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

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

UNE-EN 15319:2012 Principios generales de proyecto de los trabajos en staff.

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

UNE 102011:2013 Escayolas para la construcción. Especificaciones.

UNE 102043:2013 Montaje de los sistemas constructivos con placa de yeso laminado (PYL). Tabiques, trasdosados y techos. Definiciones, aplicaciones y recomendaciones.

UNE-EN 14190:2014 Transformados de placa de yeso laminado procedentes de procesos secundarios. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo.

UNE-EN 13950:2014 Transformados de placa de yeso con aislamiento térmico/acústico. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo.

UNE-EN 13279-2:2014 Yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción. Parte 2: Métodos de ensayo.

UNE 102001:2014 Aljez o piedra de yeso. Caracterización.

UNE 102042:2014 Yesos y escayolas de construcción. Otros métodos de ensayo.

UNE-EN 16703:2015 Código de ensayo para sistemas de paneles secos de placas de yeso con montantes de acero. Aislamiento acústico a ruido aéreo.

UNE 136001:1995 EX Paneles prefabricados de cerámica y yeso. Definiciones y especificaciones.

UNE 136002:1995 EX Paneles prefabricados de cerámica y yeso. Métodos de ensayo.

1.5 CONCLUSIONES PARCIALES

El consumo de energía sigue aumentando en el mundo entero junto con la emisión de gases contaminantes y España se encuentra entre los países de la Unión Europea que más energía consumen, sobre todo en calefacción y refrigeración en el sector residencial. Por ello, la normativa es cada vez más restrictiva con la demanda energética de los edificios, lo que se traduce en que la envolvente de los edificios cada vez se diseña con mayores espesores de aislamiento térmico.

El poliestireno extruido es uno de los polímeros sintéticos más empleados en España en el sector de la construcción, debido principalmente a sus propiedades térmicas y su comportamiento frente al agua. De su uso se genera un 5% de residuos en peso del total de material suministrado, lo que supone un gran volumen de material dada su baja densidad. A pesar de que puede ser recuperado para su reciclaje o su reutilización, la opción más rentable para la gestión de estos residuos sigue siendo la incineración y aun así un gran porcentaje de estos residuos se siguen eliminando en vertederos. Además, con las nuevas exigencias de la normativa en cuanto a la demanda energética de los edificios cada vez se utiliza más aislamiento térmico, lo que supone también más residuos.

España se encuentra entre los países de la Unión Europea que más residuos genera con más de 100 millones de toneladas anuales, destacando el sector de la construcción como el sector que más residuos genera. En este sentido, la Directiva 98/2008/CE establece como objetivo para el año 2020, la reutilización, el reciclado y la recuperación de un 70% en peso de los RCD. Sin embargo, en España este porcentaje está por debajo del 40%.

El yeso, a pesar de que en su aplicación tradicional sigue teniendo gran importancia como material de construcción, no aporta ningún valor representativo al ahorro de energía de los edificios, ya que su coeficiente de conductividad térmica es elevado en comparación con otros materiales. Por otra parte, el consumo mundial de yeso no ha dejado de crecer en los últimos años y España es el mayor productor de yeso de la Unión Europea y uno de los mayores productores a nivel mundial. La obtención de este material de construcción genera un gran impacto ambiental derivado principalmente de la explotación de las canteras.

El impacto ambiental del sector de la construcción destaca por tanto por el gran consumo de energía que supone la demanda de calefacción y refrigeración de los edificios y la elevada generación de residuos que acaban en los vertederos. La construcción debe evolucionar y para ello se deben empezar a crear materiales eco-eficientes que minimicen la explotación de recursos naturales, que ayuden a reducir la cantidad de energía tanto en su fabricación como en su uso final y que generen menor cantidad de residuos o ayuden a reducirlos.

1.6 TRABAJOS CITADOS

- AENOR, 1995. UNE-EN ISO 10211-1:1995 Puentes térmicos en edificación. Madrid: s.n.
- AENOR, 1995. UNE-EN ISO 140-3:1995 Acústica. Medición del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte 3. Madrid: s.n.
- AENOR, 2000. UNE-EN 12114:2000 Prestaciones térmicas de los edificios. Permeabilidad al aire de componentes y elementos de los edificios. Método de ensayo de laboratorio. Madrid: s.n.
- AENOR, 2000. UNE-EN 12524:2000 Materiales y productos para la edificación. Propiedades higrotérmicas. Valores de diseño tabulados. Madrid: s.n.
- AENOR, 2002. UNE-EN 12664:2002 Materiales de construcción. Determinación de la resistencia térmica por el método de la placa caliente guardada y el método del medidor del flujo de calor. Productos secos y húmedos de baja y media resistencia térmica. Madrid: s.n.
- AENOR, 2002. UNE-EN 12667:2002 Materiales de construcción. Determinación de la resistencia térmica por el método de la placa caliente guardada y el método del medidor de flujo de calor. Productos de alta y media resistencia térmica. Madrid: s.n.
- AENOR, 2002. UNE-EN ISO 12572:2002 Hygrothermal performance of building materials and products - Determination of water vapour transmission properties. Madrid: s.n.
- AENOR, 2004. UNE-EN ISO 354:2004 Acústica. Medición de la absorción acústica en una cámara reverberante. Madrid: s.n.
- AENOR, 2007. UNE-EN 14246:2007 Placas de escayola para techos suspendidos. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo. Madrid: s.n.
- AENOR, 2008. UNE-EN 13964:2006/A1:2008 Techos suspendidos. Requisitos y métodos de ensayo. Madrid: s.n.
- AENOR, 2009. RP 35.01 Yesos para la construcción (B1) YG, YG/L, YPM. Madrid: s.n.
- AENOR, 2009. RP 35.02 Conglomerantes a base de yeso para la construcción (A) E30, E30/L, E35, E35/L e YP. Madrid: s.n.
- AENOR, 2009. RP 35.03 Yesos de construcción aligerados (B4) YA, YPM/A. Madrid: s.n.
- AENOR, 2009. UNE-EN 13279-1:2009 Yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción. Parte 1: Definiciones y especificaciones. Madrid: s.n.
- AENOR, 2009. UNE-EN 15318 Diseño e instalación de paneles de yeso. Madrid: s.n.
- AENOR, 2010. Aditivos para hormigones, morteros y pastas. Parte 2: Aditivos para hormigones. Definiciones, requisitos, conformidad, marcado y etiquetado. Madrid: s.n.
- AENOR, 2010. UNE-EN 13501-1:2007+A1:2010 Clasificación en función del comportamiento frente al fuego de los productos de construcción y elementos para la edificación. Parte 1: Clasificación a partir de datos obtenidos en ensayos de reacción al fuego. Madrid: s.n.
- AENOR, 2010. UNE-EN 13501-2:2009+A1:2010 Clasificación en función del comportamiento frente al fuego de los productos de construcción y elementos para la edificación. Parte 2. Madrid: s.n.

- AENOR, 2010. UNE-EN 520:2005+A1:2010 Placas de yeso laminado. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo. Madrid: s.n.
- AENOR, 2011. UNE-EN 1998-1:2011 Eurocódigo 8: Proyecto de estructuras sismorresistentes. Parte 1: Reglas generales. Madrid: s.n.
- AENOR, 2012. UNE-EN 12859:2012 Paneles de yeso. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo. Madrid: s.n.
- AENOR, 2012. UNE-EN ISO 6946:2012 Componentes y elementos para la edificación. Resistencia térmica y transmitancia térmica. Método de cálculo. Madrid: s.n.
- AENOR, 2013. UNE-EN ISO 717-1:2013 Acústica. Evaluación del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte 1. Madrid: s.n.
- AENOR, 2014. UNE-EN 13279-2:2014 Yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción. Parte 2: Métodos de ensayo. Madrid: AENOR.
- AIPEX, 2014. Asociación Ibérica de Poliestireno extruido. [En línea] Disponible en: <http://www.aipex.es/> [Último acceso: 11 febrero 2014].
- Alcaide Tur, Á., 2012. Residuos sólidos urbanos, una consecuencia de la vida. Castellón: Universitat Jaume I.
- Álvarez, C., 2010. La bandeja blanca de poliestireno. [En línea] Disponible en: <http://blogs.elpais.com/eco-lab/2010/10/la-bandeja-blanca-de-poliestireno.html> [Último acceso: 11 febrero 2014].
- Ambientum, 2014. Impacto ambiental de los plásticos. [En línea] Disponible en: http://www.ambientum.com/revista/2001_24/2001_24_SUELOS/MPCTPLST1.htm [Último acceso: 12 febrero 2014].
- ANAIP, 2014. Asociación Española de Industriales de Plásticos. [En línea] Disponible en: <http://www.anaip.es/> [Último acceso: 10 febrero 2014].
- Anink, D., Boonstra, C. & Mak, J., 1996. Handbook of Sustainable Building. An Environmental Preference Method for Selection of Materials for Use in Construction and Refurbishment. Londres: s.n.
- Begum, R. A., Siwar, C., Pereira, J. & Jaafar, A., 2007. Implementation of waste management and minimisation in the construction industry of Malaysia. Resources, Conservation and Recycling, 51(1), pp. 190-202.
- Cámaras Oficiales de Comercio, I. y. N., 2006. Cámara Santiago Compostela. [En línea] Disponible en: <http://www.camaracompostela.com/index.asp?ind=4A0&p=36>
- CEDEX, 2012. Catálogo de Residuos utilizables en la construcción. [En línea] Disponible en: <http://www.cedexmateriales.vsf.es/view/catalogo.aspx> [Último acceso: 10 marzo 2014].
- CNE, 2013. Comisión Nacional de Energía. [En línea] Disponible en: <http://www.cne.es/>
- Comisión Nacional de Energía, 1997. Ley 54/1997, de 27 de noviembre, del sector eléctrico. Madrid: s.n.
- Consejería de Medio Ambiente y Ordenación, 2006. Estrategia de residuos de la Comunidad de Madrid (2006-2016). Madrid: s.n.
- Danosa, 2014. Danolosa-Aislamiento térmico. [En línea] Disponible en: www.danosa.es [Último acceso: 27 febrero 2014].
- Del Río Merino, M., 1999. Elaboración y aplicaciones constructivas de paneles prefabricados de escayola aligerada y reforzada con fibras de vidrio E y otros aditivos (tesis doctoral). Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- Department of the environment, 2012. Construction and demolition waste guide recycling and re-use across the supply chain. Australia: Edge Environment Pty Ltd for the department.

- ECODES, 2013. CeroCO2. [En línea] Disponible en: www.ceroco2.org [Último acceso: 12 diciembre 2013].
- Egenhoper, C., Jansen, J., Bakker, S. & Jussila Hammes, J., 2006. Revisiting EU Policy Options for Tackling Climate Change: A Social Cost-Benefit Analysis of GHG Emissions Reduction Strategies, Bruselas: Centre for European Policy Studies.
- El Consejo de las Comunidades Europeas, 1991. Directiva 91/689/CEE del Consejo, de 12 de diciembre de 1991, relativa a residuos peligrosos. s.l.:s.n.
- El Parlamento Europeo, 2006. Directiva 2006/32/CE sobre la eficiencia del uso final de la energía y los servicios energéticos y por la que se deroga la Directiva 93/76/CEE del Consejo. s.l.:s.n.
- El Parlamento Europeo, 2008. Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 19 de noviembre de 2008 sobre los residuos. s.l.:s.n.
- ETSIM-UPM, 2012. Cambio climático. Emisiones en el mundo. [En línea] Disponible en: <http://www.minas.upm.es/investigacion/co2/cambioClimatico.EWorld.htm>
- European Commission, 2014. Eurostat. [En línea] Disponible en: <http://ec.europa.eu/eurostat/en/web/products-statistical-books/-/KS-EN-16-001> [Último acceso: 20 mayo 2017].
- European Commission, 2014. Eurostat. [En línea] Disponible en: <http://ec.europa.eu/eurostat/en/web/products-statistical-books/-/KS-EN-16-001> [Último acceso: 20 mayo 2017].
- European Commission, 2014. Eurostat. [En línea] Disponible en: [http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/File:Waste_generation_by_economic_activities_and_households,_EU-28,_2014_\(%25\)_YB16.png](http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/File:Waste_generation_by_economic_activities_and_households,_EU-28,_2014_(%25)_YB16.png) [Último acceso: 23 octubre 2016].
- European Commission, 2014. Eurostat statistics for waste flow generation. [En línea] Disponible en: <http://ec.europa.eu/eurostat/web/environment/waste/main-tables>
- Fischer, C. & Werge, M., 2009. EU as a Recycling Society. Copenhagen: ETC/SCP.
- GERD, 2013. Informe sobre gestión y control de la producción de los RCD en España periodo 2008 – 2011, Madrid: Feracd.
- Gobierno de España, 2001. Real Decreto 1481/2001, de 27 de diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero. Madrid: s.n.
- Gobierno de España, 2002. Orden MAM/304/2002, de 8 de febrero por la que se publican las operaciones de valorización y eliminación de residuos y la lista europea de residuos. Madrid: s.n.
- Gobierno de España, 2014. Estadística Minera de España. [En línea] Disponible en: <http://www.minetad.gob.es/energia/mineria/Estadistica/2014/anual-2014.pdf>
- Gobierno de España, 2014. Libro de la Energía en España 2014. 1ª edición ed. Madrid: s.n.
- Gomis Yagües, V., 2014. El yeso como materia prima. [En línea] Disponible en: <http://iq.ua.es/Yeso/> [Último acceso: 17 febrero 2014].
- González Madariaga, F. J., 2005. Caracterización de mezclas de residuos de poliestireno expandido (EPS) conglomerados con yeso o escayola, su uso en la construcción (tesis doctoral). Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya.
- Greenpeace, 2010. La incineración de residuos en cifras. [En línea] Disponible en: <http://www.greenpeace.org/espana/Global/espana/report/contaminacion/100720.pdf>
- Groetz, 2016. Insulation plaster. [En línea] Disponible en: <http://www.groetz.de/en/our-services/plasteringinsulation-materials.html> [Último acceso: 26 enero 2017].

- Gruzen Samton LLP with City Green Inc., 2003. Construction & Demolition Waste Manual. New York: s.n.
- Halada, K., 2003. Progress of ecomaterials toward a sustainable society. Current Opinion in Solid State and Materials Science, Volumen 7, pp. 209-216.
- IDAE, 2011. Análisis del consumo energético del sector residencial en España. Informe final. [En línea] Disponible en: www.idae.es [Último acceso: 9 enero 2014].
- IDAE, 2011. Plan de Ahorro y Eficiencia Energética 2011-2020. [En línea] [Último acceso: 11 diciembre 2013].
- Impernor, S., 2015. Datos de aislamiento suministrado y facturado en diferentes obras. Madrid: s.n.
- IngenieriaPlastica.com, s.f. La Historia del Plástico. [En línea] Disponible en: http://www.ingenieriaplastica.com/novedades_ip/instituciones/cipres_historia.html [Último acceso: 11 febrero 2014].
- International Organization for Standardization, 1988. ISO 7892:1988. Vertical building elements. Impact resistance tests. Impact bodies and general test procedures. Switzerland: s.n.
- Jefatura del Estado, 2011. Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados. Madrid: s.n.
- Lorenzo García, S., 2013. Un futuro en peligro. Cuadernos de Tomás, pp. 283-295.
- Martín Larrañaga, M., 2009. La bioenergía: estrategia para una economía verde. Revista Ambienta.
- Mundoplast, 2013. España, demanda de plásticos por sector 2012. [En línea] Disponible en: <http://www.mundoplast.com/noticia/la-produccion-materias-primas-plasticas-cayo-84-espana-2012-70832> [Último acceso: 11 febrero 2014].
- National Academy of Engineering, 1990. Energy: Production, Consumption, and Consequences. Washington, D.C.: National Academy Press.
- Neila González, F. J. & Bedoya Frutos, C., 1997. Técnicas arquitectónicas y constructivas de acondicionamiento ambiental. Madrid: Munilla-Lería.
- Ortiz Hernández, M. L., 2009. El impacto de los plásticos en el ambiente. Hypatia, Volumen 30.
- Osmani, M., Glass, J. & Price, A. D., 2008. Architects' perspectives on construction waste reduction by design. Waste Management, 28(7), pp. 1147-1158.
- Placo, 2014. Yeso Igniver. [En línea] Disponible en: <https://www.placo.es/Portals/0/Documentacion/Productos/Morteros/Igniver%20feb14.pdf> [Último acceso: 26 enero 2017].
- Planética.org, 2011. Clasificación de los residuos. [En línea] Disponible en: <http://www.planetica.org/clasificacion-de-los-residuos>
- Plastech, 2011. Plastics demand in Europe by types and by sectors. [En línea] Disponible en: <http://www.plastech.biz/news/Plastics-demand-in-Europe-by-types-and-by-sectors,n5728> [Último acceso: 11 febrero 2014].
- PlasticsEurope, 2012. World plastics materials production 2012. [En línea] Disponible en: <http://www.plasticseurope.org/> [Último acceso: 11 febrero 2014].
- PlasticsEurope, 2013. Plastics - the Facts 2013. [En línea] Disponible en: http://www.plasticseurope.org/documents/document/20131014095824-final_plastics_the_facts_2013_published_october2013.pdf [Último acceso: 11 febrero 2014].
- REN21, 2016. Renewables 2016. Global Status Report. [En línea] Disponible en: http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2016/06/GSR_2016_Full_Report.pdf [Último acceso: 2 enero 2017].
- Rudnick, H., 2010. Impuestos al carbono. Chile: Pontificia Universidad Católica de Chile.

- Santos Aguilera, J. H. & D. Matías, J., 2008. Pensamiento ecológico y ambiental. [En línea] Disponible en: <http://revistaambiental.blogspot.co.uk/> [Último acceso: 17 diciembre 2013].
- Smithers Apex, 2016. Worldwide Gypsum Market to Reach \$3.8 Billion by 2023. [En línea] Disponible en: <https://www.smithersapex.com/market-reports/news/worldwide-gypsum-market-to-reach-3-8-billion-by-2023.aspx> [Último acceso: 17 diciembre 2016].
- Tam, V., 2008. On the effectiveness in implementing a waste-management-plan method in construction. *Waste management*, 28(6), pp. 1072-1080.
- Tejero González, A., 2012. Reducción del consumo energético y emisiones anhídrido carbónico en edificios combinando enfriamiento evaporativo, enfriamiento gratuito y recuperación de energía en sistemas todo aire. Valladolid: Universidad de Valladolid.
- Textos científicos.com, 2013. Polímeros sintéticos. [En línea] Disponible en: <http://www.textoscientificos.com/polimeros/sinteticos> [Último acceso: 11 febrero 2014].
- Thermochip, 2014. [En línea] Disponible en: www.thermochip.com [Último acceso: 27 febrero 2014].
- Tiscareño Vizcarra, A. A., 2005. Propuesta de mejora en la operación del sistema de recolección y procesamiento de residuos de la Ciudad de Puebla (Tesis doctoral). Méjico: Universidad de las Américas Puebla.
- U.S. Energy Information Administration, 2011. [En línea] [Último acceso: 4 noviembre 2013].
- U.S. Energy Information Administration, 2012. EIA. [En línea] Disponible en: <http://www.eia.gov/cfapps/ipdbproject/IEDIndex3.cfm?tid=44&pid=44&aid=2> [Último acceso: 31 octubre 2013].
- U.S. Energy Information Administration, 2013. EIA. [En línea] Disponible en: <http://www.eia.gov/forecasts/ieo/world.cfm>
- UNED, 2014. El tratamiento de los residuos. [En línea] Disponible en: <http://www.uned.es/biblioteca/rsu/pagina1.htm> [Último acceso: 12 febrero 2014].
- USGS, 2014. Gypsum statistics and information. [En línea] Disponible en: <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/gypsum/myb1-2014-gypsu.pdf> [Último acceso: 20 mayo 2017].
- UTE, Planta de Navalcarnero, 2014. [En línea] [Último acceso: Mayo 2014].
- Villanueva Domínguez, L. d., 1975. Documentación técnica de las propiedades del yeso en la construcción. Madrid: Ministerio de la Vivienda.
- Villanueva Domínguez, L. d. & García Santos, A., 2001. Manual del Yeso. Madrid: CIE Inversiones Editoriales.
- Villoria Sáez, P., 2014. Sistema de gestión de residuos de construcción y demolición (RCD) en obras de edificación residencial. Buenas prácticas en la ejecución de obra (tesis doctoral). Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- Villoria Sáez, P., Del Río Merino, M. & Porras-Amores, C., 2012. Estimation of construction and demolition waste volume generation in new residential buildings in Spain. *Waste Management & Research*, 30(2), pp. 137-146.
- Villoria Sáez, P., Del Río Merino, M., San-Antonio-González, A. & Porras-Amores, C., 2013. Best practice measures assessment for construction and demolition waste. *Resources, Conservation and Recycling*, Volumen 75, p. 52– 62.
- Wang, J., Yuan, H., Kang, X. & Lu, W., 2010. Critical success factors for on-site sorting of construction waste: A China study. *Resources, Conservations and Recycling*, 54(11), pp. 931-936.
- Winterling, H. & Sonntag, N., 2011. Rigid Polystyrene Foam (EPS, XPS). *Kunststoffe International*, 101(10), pp. 18-21.

- World Energy Council, 2013. World Energy Perspective. [En línea] Disponible en: http://www.worldenergy.org/publications/energy_efficiency_policies_around_the_world_review_and_evaluation/1_introduction/1175.asp [Último acceso: 23 octubre 2013].
- Yedesa, 2014. Yeso de proyección aligerado. [En línea] Disponible en: www.yedesa.com [Último acceso: 2014 11 3].
- Yesamsa, 2014. Yeso de proyectar aligerado. [En línea] Disponible en: www.yesamsa.es [Último acceso: 26 enero 2017].

CAPÍTULO 2. ESTADO DE LA CUESTIÓN

- 2.1 Estudios sobre la incorporación de aditivos en compuestos de yeso**
- 2.2 Estudios sobre la incorporación de residuos en compuestos de yeso**
- 2.3 Estudios sobre el uso de poliestireno extruido en compuestos de yeso**
- 2.4 Conclusiones parciales**
- 2.5 Trabajos citados**

CAPÍTULO 2. ESTADO DE LA CUESTIÓN

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

- Estudios sobre la incorporación de aditivos en compuestos de yeso
- Estudios sobre la incorporación de residuos en compuestos de yeso
- Estudios sobre el uso de poliestireno extruido en materiales de construcción

2.1 ESTUDIOS SOBRE LA INCORPORACIÓN DE ADITIVOS EN COMPUESTOS DE YESO

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

Sin embargo, la mayoría de los estudios encontrados sobre la incorporación de aditivos en compuestos de yeso se centran en:

El aumento de la resistencia: los principales aditivos utilizados como refuerzo son esencialmente materiales fibrosos naturales, minerales o sintéticos. Entre los estudios encontrados destacan los llevados a cabo por:

- Del Río Merino y Comino (2001) que analizaron la influencia del grado de dispersabilidad de las fibras de vidrio en el comportamiento mecánico del compuesto y en su trabajabilidad.
- Dalmay et al. (2010) que investigaron el efecto producido en un compuesto de yeso al incorporar fibra de cáñamo y fibras de lino.
- Zhang et al. (2011) que analizaron el refuerzo de compuestos de yeso con fibras de algodón.
- Mohandesi et al. (2011) que estudiaron la resistencia de compuestos de yeso reforzados con fibras de polipropileno y poliparafenileno tereftalamida (kevlar) distribuidas aleatoriamente en una matriz de yeso.
- Iucolano et al. (2015) que investigaron la resistencia mecánica de los compuestos de yeso reforzados con fibra de abacá.
- Lima and Faria (2016) que analizaron el refuerzo de los compuestos de yeso con fibras de avena y lana.
- Leiva et al. (2016) que estudiaron el comportamiento de los compuestos de yeso con ceniza de cáscara de arroz observando resultados positivos en cuanto al refuerzo de la resistencia a compresión y la dureza superficial.

La modificación del tiempo de fraguado, esta propiedad es, junto con la resistencia, la propiedad más estudiada por los investigadores y de entre todos los estudios encontrados destacan los llevados a cabo por:

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

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

- Pichniarczyk et al. (2005) que estudiaron las propiedades de un compuesto de yeso sobresaturado con una solución en ácido sulfúrico y resinas de silicona como posible material alternativo para aislamiento térmico, de características similares a las lanas minerales.
- Demir y Baspinar (2008) que analizaron el efecto que tienen las adiciones de humo de sílice y perlita en el comportamiento térmico de compuestos de yeso.
- Borreguero et al. (2010) que estudiaron la mejora del comportamiento térmico de bloques de yeso al aditivoslos con materiales de cambio de fase.
- Xi et al. (2011) que analizaron la mejora de las propiedades térmicas de una placa de yeso aditivada con vermiculita.
- Baspinar y Kahraman (2011) que incorporaron gránulos de sílice expandida como agregado aligerante consiguiendo además propiedades térmicas mejoradas.
- Vimrová et al. (2011) que estudiaron el comportamiento térmico de los compuestos de yeso aligerados bien con sulfato de aluminio y carbonato cálcico, con los que obtuvieron una reducción de densidad del 70%, acompañada de pérdidas de resistencia mecánica del 93% a flexión y del 97% a compresión, o con sulfato de aluminio y ácido cítrico, con los que obtuvieron una reducción de densidad del 30%, acompañada de una pérdida de resistencia mecánica del 66% a flexión y del 77% a compresión.
- Oliver (2012) que diseñó una placa de yeso con propiedades térmica mejoradas incorporándole materiales de cambio de fase.
- Cherki et al. (2014) que utilizaron partículas de corcho para mejorar el aislamiento térmico de placas de yeso para falso techo.
- Gencel et al. (2016) que analizaron el efecto de la diatomita en el comportamiento térmico de los compuestos de yeso.

La reducción de densidad, este es un factor que ha sido estudiado en profundidad tanto para este material como para otros materiales compuestos y está relacionado también con el comportamiento térmico, habiéndose encontrado tres métodos diferentes para conseguirlo:

- La introducción de huecos o alveolos en la geometría del material
- La oclusión de aire en la matriz del yeso
- La adición de agregados ligeros

Introducción de huecos o alveolos en la geometría del material

Una de las principales aplicaciones de los compuestos de yeso es la de los productos prefabricados y aunque este método no requiere de la adición de aditivos o agregados, es de los sistemas más utilizados en elementos prefabricados, principalmente cerámicos y de hormigón, para obtener ladrillos, bovedillas, bloques, etc. Y de hecho ya se comercializan muchas placas para tabiques que disponen de huecos o alveolos en su matriz para aligerarlos, como el panel TC7 para tabiques comercializado por panelsystem (véase figura 2-1).

Figura 2-1 Panel TC7 (Panelsystem, 2014)

La oclusión de aire en la matriz del yeso

El procedimiento más básico de introducción de aire en la matriz de los compuestos de yeso es el aumento de la cantidad de agua de amasado. En el fraguado se añade normalmente mayor contenido de agua del necesario con objeto de poder realizar un mejor amasado y tener un producto más plástico que se pueda moldear. Una vez fraguado el yeso, el agua sobrante se evapora a través de la masa de yeso dejando una microporosidad en la matriz del compuesto. Esta porosidad es tanto mayor cuanto mayor cantidad de agua se añada por encima de la necesaria.

Existen diversos estudios en los que para aumentar esta microporosidad en la matriz del yeso se recurre a aditivos, entre estos estudios cabe destacar los desarrollados por:

- Baoshan (1999) que diseñó un bloque de yeso de elevada resistencia aligerado con un agente inclusor de aire.

- Arikan y Sobolev (2002) que incorporaron diferentes aditivos al yeso para modificar sus propiedades, entre ellos sulfonato de olefina, que es un agente espumante utilizado en cosmética y con el que consiguió reducir la densidad un 36% con una disminución de resistencia mecánica del 42%.
- Del Río Merino y Hernández Olivares (2004) que analizaron el efecto que tienen en una matriz de yeso los aditivos inclusores de aire y los aditivos espumantes comercializados para morteros y hormigones y observaron que a pesar de la formación de microburbujas, el uso de estos aditivos aireantes no permite reducir la densidad y con el uso de espumantes sólo se consigue reducir la densidad en un 7%, pero esta reducción conlleva una gran pérdida de resistencia mecánica del 17% a flexión y del 52% a compresión.
- Vimrová et al. (2011) que estudiaron el comportamiento térmico de los compuestos de yeso aligerados bien con sulfato de aluminio y carbonato cálcico, con los que obtuvieron una reducción de densidad del 70%, acompañada de pérdidas de resistencia mecánica del 93% a flexión y del 97% a compresión, o con sulfato de aluminio y ácido cítrico, con los que obtuvieron una reducción de densidad del 30%, acompañada de una pérdida de resistencia mecánica del 66% a flexión y del 77% a compresión.
- Huang et al. (2013) que utilizaron dióxido de manganeso para catalizar peróxido de hidrógeno utilizándolo como agente espumante en compuestos de yeso.
- Xinteng et al. (2013) que analizaron el efecto de los aditivos espumantes en la densidad del yeso.
- Isern y Messing (2016) que añadieron un agente tensioactivo no iónico para conseguir incorporar aire a un compuesto de yeso.
- Vimrová et al. (2016) que utilizaron polvo de aluminio como agente espumante para producir yeso aligerado.

La adición de agregados ligeros

Los agregados ligeros, también denominados cargas ligeras o áridos ligeros se han utilizado para aligerar materiales desde la antigüedad, en concreto la bóveda del Panteón en Roma se construyó en el siglo II d.C. con una mezcla de argamasa aligerada con toba volcánica y piedra pómez (Cowan, 1977). Los agregados ligeros que se utilizan actualmente pueden ser materia prima o residuos y a su vez se pueden clasificar en:

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

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

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

expandida, con la que consiguieron reducir la densidad en un 20%, acompañada de una pérdida de resistencia mecánica del 45%.

- Gmouh et al. (2001) que analizaron el comportamiento mecánico de un compuesto de yeso aligerado con perlita.
- Yong et al. (2010) que investigaron las propiedades de un tablero de yeso aligerado con vermiculita.
- Vimmrová et al. (2011) que estudiaron el comportamiento térmico de los compuestos de yeso aligerados con perlita y observaron que el uso de este agregado permite reducir la densidad un 42%, disminuyendo también la resistencia mecánica un 64% a flexión y un 83% a compresión.

Además existen productos comercializados de yeso en polvo con perlita expandida para su aplicación manual, como *Perla* (Algiss Uralita, 2014) o para su aplicación proyectada para la ejecución de guarnecidos en techos y paredes, entre los que se encuentran *Perlinor*, *Proyal XXI* y *Prolite* (Placo, 2014), *Yesodur Plus X* y *Aislayola* (Yedesa, 2014), *Yeso de proyectar aligerado* (Yetosa, 2014), *Aliproyes* (La Maruxina, 2014), *Yeso de proyectar aligerado* (Papresa, 2014), *Rubí*, *Algistar* y *Ópalo* (Algiss Uralita, 2014), *Vermiplaster* (Knauf, 2014), *Promill perlita* y *millenium* (Yesos Millán, 2014) y *yeso de proyectar aligerado* (Yesamsa, 2014).

- Naturales orgánicos, como el corcho, las cáscaras de cereal o las virutas de madera, que en general son residuos agroalimentarios o vegetales. Existen varios estudios sobre la incorporación de estos áridos ligeros en compuestos de yeso, entre los que cabe destacar los llevado a cabo por:
 - Hernández Olivares et al. (1999) que diseñaron una placa de escayola con granulado de desechos de corcho aligerada hasta en un 43%, acompañado de una pérdida de resistencia del 57% a flexión y del 76% a compresión.
 - Zhou et al. (2013) que estudiaron los compuestos aligerados con serrín y reforzados con látex.
 - Leiva Aguilera y Del Río Merino (2014) que analizaron las propiedades de los compuestos de yeso con diferentes porcentajes de cáscara de arroz consiguiendo reducir la densidad entorno a un 4%, acompañado de una pérdida de resistencia del 37% a flexión y del 60% a compresión.

Artificiales: que son aquellos que están constituidos por subproductos industriales, como son las escorias de la industria siderúrgica y las cenizas volantes procedentes de la combustión del carbón pulverizado en las centrales térmicas, subproductos elaborados, como la escoria expandida, o materiales orgánicos elaborados, como algunos polímeros sintéticos. En este último grupo existen numerosos estudios principalmente sobre la incorporación de materiales orgánicos elaborados, entre los que cabe destacar los llevados a cabo por:

- González Madariaga (2005) que diseñó una placa laminada de yeso aligerada con residuo de poliestireno expandido (EPS) consiguiendo reducir su densidad en un 56%, acompañado de una pérdida de resistencia mecánica del 94% a flexión y del 83% a compresión.

- Karaman et al. (2006) que analizaron las propiedades físicas y mecánicas de compuestos de yeso con residuos de botellas hechas con plástico PET (politereftalato de etileno) y su posible aplicación en construcciones agrícolas y observaron que con este agregado se podía reducir la densidad y mejorar el comportamiento térmico, pero se reducía la resistencia mecánica.
- García Santos (2009) que estudió los compuestos de yeso aligerados con perlas de EPS, consiguiendo reducir su densidad en un 39%, acompañado de una disminución de la resistencia mecánica del 45% a flexión y del 76% a compresión.
- Gutiérrez González et al. (2012) que estudiaron la compatibilidad entre yeso y residuo de polvo de poliamida para obtener un material ligero con propiedades térmicas mejoradas, consiguiendo reducir la densidad en un 13%, acompañado de una pérdida de resistencia mecánica del 59% a flexión y del 61% a compresión.
- Gutiérrez González et al. (2012) que incorporaron residuo de poliuretano a compuestos de yeso, consiguiendo aligerarlo un 46%, perdiendo a su vez un 81% de resistencia mecánica a flexión y un 77% de resistencia mecánica a compresión.
- Khalil et al. (2013) que estudiaron las propiedades de los compuestos de yeso con humo de sílice y gel de sílice y observaron que con estos aditivos se puede conseguir aligerar estos compuestos.
- Herrero et al. (2013) que analizaron la influencia de la proporción y el tamaño de partícula de las adiciones de residuo de neumático en compuestos de yeso, consiguiendo reducir su densidad en un 37%, acompañado de una pérdida de resistencia mecánica del 86% a flexión y del 96% a compresión.
- Jiménez Rivero et al. (2014) que analizaron las propiedades de los compuestos de yeso con residuo de caucho procedente de coquillas de aislamiento de tuberías, consiguiendo reducir la densidad en un 24%, acompañado de una pérdida de resistencia mecánica del 54% a flexión y del 67% a compresión.

2.2 ESTUDIOS SOBRE LA INCORPORACIÓN DE RESIDUOS EN COMPUESTOS DE YESO

Existe mucha información sobre la incorporación de residuos en materiales de construcción en general. De hecho, ya en 1979 Gutt y Nixon publicaron un documento en el que aparecían diferentes soluciones de reciclaje de residuos industriales y urbanos como el fosfoyeso, las cenizas volantes o las escorias de horno alto, en materiales de construcción (Gutt & Nixon, 1979). Por otra parte, en los últimos años ha aumentado la importancia que tiene la gestión de los residuos de construcción y demolición y además de estudios de investigación específicos como el estudio sobre la reutilización de las escorias procedentes del sector siderúrgico (Geiseler, 1996), existen guías y catálogos que recogen soluciones para la reutilización de los RCD y principalmente de los áridos, como las que se muestran en la tabla 2-1. De hecho, uno de estos catálogos, el "Catálogo de residuos utilizables en la construcción", ha sido elaborado en España por el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, Cedex (CEDEX, 2012). En este catálogo se expone la posible reutilización de residuos de construcción y demolición procedentes del hormigón y restos cerámicos para producir áridos reciclados para diferentes aplicaciones. Sin embargo, es importante destacar que ni el "Catálogo de residuos utilizables en la construcción" del CEDEX ni en ninguno de los documentos encontrados, se incluyen estrategias de reutilización de residuos en compuestos de yeso, ni se habla del poliestireno como posible residuo de construcción y demolición.

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

Tabla 2-1 Selección de guías y manuales que plantean estrategias para el tratamiento de los RCD

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

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

- Del Río Merino et al. (2005) que diseñaron un elemento prefabricado aligerado con residuos de corcho para su aplicación en tabiques.
- Agulló et al. (2006) que estudiaron la incorporación de residuos procedentes de la fabricación de papel en compuestos de yeso.
- Guleria y Dutta (2011) que analizaron el comportamiento mecánico de un compuesto de yeso, cal y cenizas volantes reforzado con virutas de neumático tratadas.
- Zheng et al. (2012) que estudiaron el comportamiento del residuo de polimetilmetacrilato con superplastificantes incorporados en compuestos de yeso.
- Lakrafi et al. (2012) que analizaron el efecto que tienen diversos residuos de la industria del cuero en el comportamiento térmico de los compuestos de yeso.
- Rodríguez et al. (2013) que diseñaron un compuesto de yeso fabricado con escorias de horno alto.
- **Residuos del sector productivo terciario:** que proceden de la actividad doméstica y comercial, sobre los que destacan los estudios de:
 - Scholer y Patt (1987) que estudiaron la posible utilización de residuos procedentes del papel para producir tableros de yeso reforzados con fibras.
 - Coutts (1991) que analizó el refuerzo de los compuestos de yeso con residuos procedentes del papel.
 - Follner y Follner (2004) que investigaron la posible recristalización del residuo de yeso para crear nuevos prefabricados de yeso.
 - Klöck y Aicher (2005) que estudiaron el refuerzo de los tableros de yeso con fibras procedentes de residuos de papel.
 - Fujita et al. (2006) que analizaron las propiedades de paneles de yeso fabricados con residuos procedentes de otros tableros laminados de yeso.
 - Karaman et al. (2006) que analizaron las propiedades físicas y mecánicas de compuestos de yeso con residuos de botellas hechas con plástico PET (politereftalato de etileno) y su posible aplicación en construcciones agrícolas.
 - González Madariaga y Lloveras Macia (2008) que diseñaron un tablero laminado de yeso aligerado con residuo de poliestireno expandido.
 - Parres et al. (2009) que investigaron las propiedades de un compuesto de yeso reforzado con microfibras obtenidas de residuos de neumáticos.
 - Gutiérrez-González (2012) que diseñaron un compuesto de yeso aligerado con residuo de espuma de poliuretano.
 - Serna et al. (2012) que estudiaron el comportamiento de compuestos de yeso con residuos de neumáticos en distintos porcentajes y tamaños de partícula.
 - Gutiérrez-González et al. (2013) que estudiaron la compatibilidad entre el yeso y los residuos de poliamida de la industria del automóvil para producir compuestos de yeso aligerados con propiedades térmicas mejoradas.
 - Herrero et al. (2013) que analizaron las propiedades de un compuesto de yeso con residuos de neumático.

Y en especial los residuos que proceden del sector de la construcción, sobre los que se han encontrado los siguientes estudios:

- Carvalho et al. (2008) que analizaron las propiedades de un compuesto de yeso reforzado con pulpa de residuo de celulosa procedente de bolsas de cemento.
- Jiménez Rivero et al. (2014) que estudiaron el efecto que tiene el residuo de caucho, procedente de coquillas para el aislamiento de tuberías, incorporado en un compuesto de yeso.
- Romaniega Piñeiro, del Río Merino y Pérez García (2015) que estudiaron el refuerzo de los compuestos de yeso con fibras de lana de roca procedentes de residuos de construcción y demolición.
- Morales Conde et al. (2016) que estudiaron la posibilidad de incorporar residuos de madera en compuestos de yeso.

2.3 ESTUDIOS SOBRE EL USO DE POLIESTIRENO EXTRUIDO EN COMPUESTOS DE YESO

Actualmente, el poliestireno se utiliza en el sector de la construcción, principalmente como material aislante térmico, aunque es un polímero sobre el que se han realizado extensas investigaciones combinándolo con otros materiales, sobre todo en el caso del poliestireno expandido, destacando los siguientes estudios:

- Yeso aligerado con perlas de poliestireno expandido y reforzado con fibras (Del Río Merino, 1999) y (García Santos, 2009) o con residuo de poliestireno expandido (González Madariaga, 2005).
- Ladrillos aligerados con poliestireno expandido (Veisesh & Yousefi, AA, 2003).
- Paneles contrachapados de poliestireno y fibra de palmera (El-Bashir, 2007).
- Mortero reforzado con microfibras de carbono y con microesferas de poliestireno para prevenir las microfisuras (Zhengxian, et al., 2010).
- Hormigón celular fabricado con poliestireno expandido (Wu, et al., 2013), (Madandoust, et al., 2011), (Yi & Linhua, 2011) y (Tang, et al., 2008) o con residuos de poliestireno expandido (Demirboga & Kan, 2012) y (Bosco Hernandez-Zaragoza, et al., 2013).
- Tierras de relleno con poliestireno expandido (Xiaolong, et al., 2011) y estabilizadas con cemento (Onishi, et al., 2010) y (Linchang, et al., 2013).
- Compuesto polimérico de residuo de poliestireno expandido con residuo de cemento en polvo (Asaad & Tawfik, 2011).
- Cemento con poliestireno de alto impacto como sustituto de la arena (Ru & Meyer, 2012).
- Cemento con propiedades aislantes que incorpora poliestireno expandido y aditivos para mejorar la adherencia (Lipeng, 2012).
- Bloques de hormigón celular fabricados con poliestireno expandido y piedra pómez (Demirel, 2013) o con residuo de poliestireno expandido (Yi, et al., 2012).

En cuanto a la situación actual específica del poliestireno extruido y sus aplicaciones en la construcción éstas se centran básicamente en el diseño de paneles prefabricados en formato sándwich para muros cortina, en combinación con otros materiales como la madera o el hormigón (Lihua & Zhibin, 2013) o cerramientos en general (Zhao, 2013), materiales aislantes térmicos en los que se mejore alguna de sus propiedades, como el comportamiento frente al fuego (Guangcai, 2013), la resistencia a compresión (Jin Hee, et al., 2012) o el comportamiento térmico (Yadollah, et al., 2011) y también se ha encontrado una patente sobre un panel que incorpora residuo de polvo de poliestireno extruido (Kim, 2009).

Además, a pesar de que el uso más extendido del poliestireno extruido en la construcción es en forma de placas y paneles, también se han encontrado patentes sobre la ejecución de ladrillos aligerados con poliestireno extruido (Oh, 2009) y (Koeseoglu, 2009). Sin embargo, no se ha encontrado ninguna referencia sobre el uso de poliestireno extruido en compuestos de yeso.

2.4 CONCLUSIONES PARCIALES

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

Respecto a la reutilización de residuos, el "Catálogo de residuos utilizables en la construcción", desarrollado por el CEDEX, es un documento muy útil que aporta gran información. Sin embargo, este catálogo no incluye estrategias de reutilización de residuos en compuestos de yeso, ni habla del poliestireno como posible residuo de construcción. De hecho, en general en las guías y manuales en los que se presentan soluciones para el reciclaje de residuos de construcción y demolición en materiales de construcción únicamente se exponen soluciones para los áridos reciclados.

Fuera de las guías y manuales de reutilización de residuos en materiales de construcción sí se han encontrado muchos estudios de investigación en los que sí se empieza a analizar el reciclaje de residuos en compuestos de yeso. De estos estudios destaca el uso de residuos agrícolas como los tallos vegetales, residuos industriales como las cenizas volantes y residuos del sector terciario como el papel. Además, también se ha encontrado alguna referencia sobre la reutilización de residuos de construcción y demolición en compuestos de yeso, pero en ningún caso se ha encontrado documentación que hable sobre la incorporación de residuo de poliestireno extruido.

En general, con respecto al poliestireno extruido, se ha encontrado escasa información sobre su incorporación en materiales compuestos. Únicamente se ha encontrado una patente sobre el uso de residuo de polvo de poliestireno extruido para fabricar nuevos paneles aislantes y otra sobre la incorporación de residuo de poliestireno extruido para fabricar ladrillos aligerados.

Sin embargo, se ha encontrado mucha información sobre el uso de poliestireno expandido como agregado ligero en varios materiales compuestos como el hormigón, el mortero o el yeso. Es más, algunos de estos productos ya se han comercializado y lo que se está estudiando actualmente es el residuo de poliestireno expandido.

2.5 TRABAJOS CITADOS

- Agulló, L., Aguado, A. & García, T., 2006. Study of the use of paper manufacturing waste in plaster composite mixtures. *Building and environment*, 41(6), pp. 821-827.
- Algiss Uralita, 2014. Perla - Yeso manual con perlita. [En línea] Disponible en: www.algiss.es [Último acceso: 3 noviembre 2014].
- Algiss Uralita, 2014. Yeso de proyección aligerado. [En línea] Disponible en: www.algiss.es [Último acceso: 24 octubre 2014].
- Arikan, M. & Sobolev, K., 2002. The optimization of a gypsum-based composite material. *Cement and concrete research*, 32(11), pp. 1725-1728.
- Asaad, J. & Tawfik, S., 2011. Polymeric composites based on polystyrene and cement dust wastes. *Materials & Design*, 32(10), pp. 5113-5119.
- Australian Government, 2012. Construction and demolition waste guide recycling and re-use across the supply chain. Australia: s.n.
- Baoshan, J., 1999. Air-entraining high strength gypsum block. s.l. Patente nº CN2345618 (Y).
- Baspinar, M. S. & Kahraman, E., 2011. Modifications in the properties of gypsum construction element via addition of expanded macroporous silica granules. *Construction and Building Materials*, 25(8), pp. 3327-3333.
- Bolden, J., Abu-Lebdeh, T. & Fini, E., 2013. Utilization of recycled and waste materials in various construction applications. *American Journal of Environmental Sciences*, 9(1), pp. 14-24.
- Borreguero, A. M. et al., 2010. Improvement of the thermal behaviour of gypsum blocks by the incorporation of microcapsules containing PCMS obtained by suspension polymerization with and optimal core/coating mass ratio. *Applied Thermal Engineering*, 30(10), pp. 1164-1169.
- Bosco Hernandez-Zaragoza, J. y otros, 2013. Cellular Concrete Bricks with Recycled Expanded Polystyrene Aggregate. *Advances in Materials Science & Engineering*, p. 160162 (5 pp.).
- Carvalho, M. A. et al., 2008. Microstructure and Mechanical Properties of Gypsum Composites Reinforced with Recycled Cellulose Pulp. *Materials Research*, 11(4), pp. 391-397.
- CEDEX, 2012. Catálogo de Residuos utilizables en la construcción. [En línea] Disponible en: <http://www.cedexmateriales.vsf.es/view/catalogo.aspx> [Último acceso: 10 marzo 2014].
- Cherki, A. A.-b. y otros, 2014. Experimental thermal properties characterization of insulating cork-gypsum composite. *Construction and Building Materials*, Volumen 54, pp. 202-209.
- Coutts, R., 1991. Wastepaper fibers in plaster products. *Materials Science Letters*, 10(2), pp. 77-78.
- Cowan, H., 1977. History of masonry and concrete domes in building construction. *Building and Environment*, Volumen 12, pp. 1-24.
- Dalmay, P. et al., 2010. Properties of cellulosic fibre reinforced plaster: influence of hemp or flax fibres on the properties of set gypsum. *J Mater Sci*, Volume 45, pp. 793-803.
- Del Río Merino, M., 1999. Elaboración y aplicaciones constructivas de paneles prefabricados de escayola aligerada y reforzada con fibras de vidrio E y otros aditivos (tesis doctoral). Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- Del Río Merino, M. & Comino, P., 2001. Influencia del grado de dispersabilidad de la fibra de vidrio E en el comportamiento mecánico y la trabajabilidad de la escayola. *Materiales de construcción*, 51(261), pp. 33-44.
- Del Río Merino, M., Domínguez, J. D. & Hernández Olivares, F., 1998. Escayola aligerada con sólidos celulares. *Informes de la construcción*, 50(458), pp. nov-dic.
- Del Río Merino, M. & Hernández Olivares, F., 2004. Lightened plaster: alternative solutions to cellular solids addition. *Materiales de Construcción*, 54(275).

- Del Río Merino, M., Santa Cruz Astorqui, J. & Hernández Olivares, F., 2005. New prefabricated elements of lightened plaster used for partitions and extrados. *Construction and Building Materials*, 19(6), pp. 487-492.
- Demirboga, R. & Kan, A., 2012. Thermal conductivity and shrinkage properties of modified waste polystyrene aggregate concretes. *Construction and Building Materials*, Volumen 35, pp. 730-734.
- Demirel, B., 2013. Optimization of the composite brick composed of expanded polystyrene and pumice blocks. *Construction and Building Materials*, Volumen 40, pp. 306-313.
- Demir, I. & Baspinar, M. S., 2008. Effect of silica fume and expanded perlite addition on the technical properties of the fly ash-lime-gypsum mixture. *Construction and Building Materials*, 22(6), p. 1299–1304.
- El-Bashir, S., 2007. Thermal and mechanical properties of plywood sheets based on polystyrene/silica nanocomposites and palm tree fibers. *Polymer Bulletin*, 70(7), pp. 2035-2045.
- Eve, S. y otros, 2006. Investigation of the setting of polyamide fibre/latex-filled plaster composites. *Journal of the European Ceramic Society*, 26(13), pp. 2541-2546.
- Follner, S. & Follner, H., 2004. A potential process for production of gypsum board via recrystallization of dihydrate gypsum. *ZKG International*, 57(6), pp. 78-83.
- Fujita, T., Komatsu, N. & Kawai, S., 2006. Manufacture and properties of gypsum-bonded particleboard IV. Properties of gypsum-bonded particleboard made with raw material from waste gypsum boards. *Mokuzai Gakkaishi*, 52(6), pp. 368-375.
- García Santos, A., 2009. Escayola reforzada con fibras de polipropileno y aligerada con perlas de poliestireno expandido. *Materiales de Construcción*, 59(293), pp. 105-124.
- García Santos, A., 2009. PPF-reinforced, ESP-lightened gypsum plaster. *Materiales de Construcción*, 59(293), pp. 105-124.
- Geiseler, J., 1996. Use of steelworks slag in Europe. *Waste Management*, 16(1-3), p. 59–63.
- Gencel, O. y otros, 2016. A novel lightweight gypsum composite with diatomite and polypropylene fibers. *Construction and Building Materials*, Volumen 113, pp. 732-740.
- Gmouh, A., Samdi, A., Moussa, R. & Gomina, M., 2001. Lightened plaster-based composite materials: Elaboration and mechanical properties. *Silicates industriels*, Volumen 5-6, pp. 61-66.
- Gonçalves Rapazote, J., Laginhas, C. & Teixeira-Pinto, A., 2010. Development of Building Materials through Alkaline Activation of Construction and Demolition Waste (CDW) - Resistance to Acid Attack. *Advances in Science and Technology*, Volume 69, pp. 156-163.
- González Madariaga, F. J., 2005. Caracterización de mezclas de residuos de poliestireno expandido (EPS) conglomerados con yeso o escayola, su uso en la construcción (tesis doctoral). Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya.
- González Madariaga, F. J. & Lloveras Macia, J., 2008. EPS (expanded poliestyrene) recycled bends mixed with plaster or stucco, some applications in building industry. *Informes de la Construcción*, 60(509), pp. 35-43.
- Guangcai, X., 2013. Extruded polystyrene compound insulation fireproof plate. s.l. Patente nº E04B1/80; E04B1/94.
- Guleria, S. & Dutta, R., 2011. Unconfined Compressive Strength of Fly Ash-Lime-Gypsum Composite Mixed with Treated Tire Chips. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23(8), pp. 1255-1263.
- Gutierrez-Gonzalez, S. et al., 2013. Rheological behaviour of gypsum plaster pastes with polyamide powder wastes. *Construction and Building Materials*, Volume 38, pp. 407-412.

- Gutiérrez-González, S. y otros, 2012. Compatibility between gypsum and polyamide powder waste to produce lightweight plaster with enhanced thermal properties. *Construction and Building Materials*, Volumen 34, pp. 179-185.
- Gutiérrez-González, S. y otros, 2012. Lightweight plaster materials with enhanced thermal properties made with polyurethane foam wastes. *Construction and Building Materials*, 28(1), pp. 653-658.
- Gutt, W. & Nixon, P., 1979. Use of waste materials in the construction industry. *Materials and structures*, 12(4), pp. 255-306.
- Hernández-Olivares, F., Bollati, M., Del Río Merino, M. & Parga-Landa, B., 1999. Development of cork-gypsum composites for building applications. *Construction and Building Materials*, 13(4), pp. 179-186.
- Herrero, S., Mayor, P. & Hernández Olivares, F., 2013. Influence of proportion and particle size gradation of rubber from end-of-life tires on mechanical, thermal and acoustic properties of plaster-rubber mortars. *Materials & Design*, Volumen 47, pp. 633-642.
- Huang, B., Xhang, Y. & Li, D. X., 2013. Study on the Influences of Foaming Gypsum's Performance. *Materials Science Forum*, Volumen 743, pp. 222-227.
- Huang, K., Liang, H. & Hung, M., 2010. Improvement in fire prevention performance of cork-gypsum decorative materials by applying porous waste. *International Journal of Physical Sciences*, Volume 5, pp. 2038-2044.
- Hummel, H. et al., 2007. Examination of the exposure- and odour-reducing characteristics of gypsum-based building materials containing zeolite. *Bauphysik*, 29(6), pp. 430-435.
- Isern, E. R. & Messing, G. L., 2016. Direct foaming and seeding of highly porous, lightweight gypsum. *Journal of materials research*, 31(15), pp. 2244-2251.
- Iucolano, F., Caputo, D., Leboffe, F. & Liguori, B., 2015. Mechanical behavior of plaster reinforced with abaca fibers. *Construction and Building Materials*, Volumen 99, pp. 184-191.
- Jiang, H. & Luan, C., 2011. Preparation and Absorption/Desorption Performance of Gypsum-based Humidity Controlling Materials. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater*, 26(4).
- Jiménez Rivero, A., de Guzmán Báez, A. & García Navarro, J., 2014. New composite gypsum plaster – ground waste rubber coming from pipe foam insulation. *Construction and Building Materials*, Volumen 55, pp. 146-152.
- Jin Hee, L., Hare Ri, L. & Bang, H. B., 2012. Simple manufacturing method of the extruded polystyrene foam containing graphites. s.l. Patente nº KR20110100631 20111004.
- Karaman, S., Sahin, S., Gunal, H. & Orung, I., 2006. Stabilization of waste pet bottles with Gypsum. *Journal of Applied Sciences*, Volumen 6, pp. 1119-1122.
- Khalil, A., Tawfik, A., Hegazy, A. & El-Shahat, M., 2013. Effect of different forms of silica on the physical and mechanical properties of gypsum plastercomposites. *Materiales de construcción*, 63(312), pp. 529-537.
- Kim, C., 2009. Heat insulating panel for building, has bottom panel, which is manufactured according to sheet configuration using waste styrofoam and regeneration polystyrene resin, and top panel manufactured in same form as that of bottom panel. s.l. Patente nº KR2009049678-A.
- Kim, S., 2009. Incombustibility, physico-mechanical properties and TVOC emission behavior of the gypsum–rice husk boards for wall and ceiling materials for construction. *Industrial crops and products*, 29(2), pp. 381-387.
- Klöck, W. & Aicher, S., 2005. Size effect in paper fiber-reinforced gypsum panels under in-plane bending. *Wood and fiber science*, 37(3), pp. 403-412.
- Knauf, 2014. Mortero proyectado para protección pasiva al fuego Vermiplaster. [En línea] Disponible en: www.knauf.es [Último acceso: 3 noviembre 2014].

- Kocemba, A. & Mucha, M., 2016. Water retention and setting in gypsum/polymers composites. *Przemysl Chemiczny*, 95(5), pp. 1003-1005.
- Koeseoglu, C., 2009. Lightweight brick type construction element producing-composition comprises clay, expanded perlite, shavings or styrofoam powder, and electron sourcing materials having tincal, ulexite and/or albite. s.l. Patente nº WO2009040147-A2.
- Kumar, S., 2002. A perspective study on fly ash-lime-gypsum bricks and hollow blocks for low cost housing development. *Construction and Building Materials*, 16(8), pp. 519-525.
- La Maruxina, 2014. Aliproyes. [En línea] Disponible en: www.lamaruxina.com [Último acceso: 3 noviembre 2014].
- Lakraflı, H., Tahiri, S., Albizane, A. & El Otmani, M., 2012. Effect of wet blue chrome shaving and buffing dust of leather industry on the thermal conductivity of cement and plaster based materials. *Construction and Building Materials*, Volumen 30, pp. 590-596.
- Lanzón, M. & García-Ruiz, P., 2012. Effect of citric acid on setting inhibition and mechanical properties of gypsum building plasters. *Construction and Building Materials*, 28(1), pp. 506-511.
- Leiva Aguilera, M. & Del Río Merino, M., 2014. Escayola aditivada con residuos agrícolas: cáscara de arroz y cáscara triturada. En: e. a. C. Llinares-Millán, ed. *Construction and Building Research*. Switzerland: Springer, pp. 463-470.
- Leiva Aguilera, M. J., Del Río Merino, M. & Villoria Sáez, P., 2016. Feasability of plaster composites with rice husk waste. *ZKG drymix special 2016*, pp. 30-40.
- Li, G. y otros, 2003. Properties study of cotton stalk fiber/gypsum composite. *Cement and Concrete Research*, 33(1), pp. 43-46.
- Lihua, Z. & Zhibin, G., 2013. Curtain wall integrating XPS (extruded polystyrene) heat insulation material and stone. s.l. Patente nº B32B27/12; B32B27/30; E04B2/88; E04B2/92.
- Lima, J. & Faria, P., 2016. Eco-Efficient Earthen Plasters: The Influence of the Addition of Natural Fibers. *Natural fibres: advances in science and technology towards industrial applications: from science to market*, Volumen 12, pp. 315-327.
- Linchang, M. y otros, 2013. Properties and Applications of Cement-Treated Sand-Expanded Polystyrene Bead Lightweight Fill. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25(1), pp. 86-93.
- Lipeng, C., 2012. Experimental research on producing thermal insulating bonding mortar by spent polystyrene foam. *Applied Mechanics and Materials*, Volumen 174-177, pp. 1253-6.
- Madandoust, R., Ranjbar, M. M. & Mousavi, S. Y., 2011. An investigation on the fresh properties of self-compacted lightweight concrete containing expanded polystyrene. *Construction and Building Materials*, 25(9), pp. 3721-3731.
- Magallanes-Rivera, R., Escalante-García, J. & Gorokhovskiy, A., 2009. Hydration reactions and microstructural characteristics of hemihydrate with citric and malic acid. *Construction and Building Materials*, 23(3), pp. 1298-1305.
- Mohandesi, J. A., Sangghaleh, A., Nazari, A. & Pourjavad, N., 2011. Analytical modeling of strength in randomly oriented PP and PPTA short fiber reinforced gypsum composites. *Computational Materials Science*, Volumen 50, pp. 1619-1624.
- Morales Conde, M. J., Rodríguez Liñán, C. & Pedreño Rojas, M. A., 2016. Physical and mechanical properties of wood-gypsum composites from demolition material in rehabilitation works. *Construction and Building Materials*, Volumen 114, pp. 6-14.
- Nazerian, M. & Kamyab, M., 2013. Gypsum-bonded particleboard manufactured from agricultural based material. *Forest Science and Practice*, 15(4), pp. 325-331.

- Oh, J., 2009. Lightweight brick manufacturing method involves pulverizing styrofoam or waste building materials into predetermined size, where bricks are molded into specific size, and moisture contained inside molded bricks are dried. s.l. Patente nº KR2009120634-A.
- Oliver, A., 2012. Thermal characterization of gypsum boards with PCM included: Thermal energy storage in buildings through latent heat. *Energy and Buildings*, Volumen 48, pp. 1-7.
- Onishi, K., Tsukamoto, Y., Saito, R. & Chiyoda, T., 2010. Strength and small-strain modulus of lightweight geomaterials: cement-stabilised sand mixed with compressible expanded polystyrene beads. *Geosynthetics International*, 16(10), pp. 380-388.
- Panelsystem, 2014. Catálogo técnico TC7. [En línea] Disponible en: www.panelsystem.com [Último acceso: octubre 2014].
- Papresa, 2014. Yeso de proyectar aligerado. [En línea] Disponible en: www.papresa.net [Último acceso: 3 noviembre 2014].
- Parres, F., Crespo-Amoros, J. & Nadal-Gisbert, A., 2009. Mechanical properties analysis of plaster reinforced with fiber and microfiber obtained from shredded tires. *Construction and Building Materials*, 23(10), p. 3182–3188.
- Pichniarczyk, P., Malata, G. & Szelag, H., 2005. The polymer impregnated gypsum mineral wool as a new, alternative material for thermal insulation. *Cement Wapno Beton*.
- Placo, 2014. Yesos de proyectar aligerados. [En línea] Disponible en: www.placo.es [Último acceso: 24 octubre 2014].
- Ramezani, H., Shandab, S. & Nouri, A., 2012. Study on effects of wood fiber content on physical, mechanical and acoustical properties of wood-fiber-filled gypsum composites. *Materials Research*, Volume 15, pp. 236-241.
- Rodríguez, A., Gutiérrez-González, S., Horgnies, M. & Calderón, V., 2013. Design and properties of plaster mortars manufactured with ladle furnace slag. *Materials & Design*, Volumen 52, pp. 987-994.
- Romaniega Piñeiro, S., Del Río Merino, M. & Pérez García, C., 2015. New Plaster Composite with Mineral Wool Fibres from CDW Recycling. *Advances in Materials Science and Engineering*, Volumen 2015.
- Ru, W. & Meyer, C., 2012. Performance of cement mortar made with recycled high impact polystyrene. *Cement and Concrete Composites*, 34(9), pp. 975-81.
- Schneider, J., Freyer, D. & Voigt, W., 2007. The effect of retarders on the setting process in industrially relevant hemihydrate gypsum plasters. *ZKG International*, 60(12), pp. 68-76.
- Scholer, M. & Patt, R., 1987. Production of gypsum-bonded high-strength fiberboards using recycled paper. *Holz als Roh-und Werkstoff*, 45(9), pp. 390-390.
- Serna, Á., del Río Merino, M., Palomo, J. G. & González Cortina, M., 2012. Improvement of gypsum plaster strain capacity by the addition of rubber particles from recycled tyres. *Construction and Building Materials*, Volumen 35, p. 633–641.
- Tang, W., Lo, Y. & Nadeem, A., 2008. Mechanical and drying shrinkage properties of structural-graded polystyrene aggregate concrete. *Cement and Concrete Composites*, 30(5), pp. 403-409.
- Thole, V., 1992. Bending strength of gypsum-bonded particleboards using flax waste as an additive. *Holz als Roh-und Werkstoff*, 50(7-8), pp. 327-327.
- Thole, V. & Weiss, D., 1992. Suitability of annual plants as additives for gypsum-bonded particleboards. *Holz als Roh-und Werkstoff*, 50(6), pp. 241-252.
- Van Dijk, K., Boedianto, P., te Dorsthorst, B. J. & Kowalczyk, T., 2001. Strategy for reuse of construction and demolition waste role of authorities. *Heron*, 46(2), pp. 0046-7316.

- Veisheh, S. & Yousefi, AA, A., 2003. The use of polystyrene in lightweight brick production. *Iranian Polymer Journal*, 12(4), pp. 323-329.
- Vimmrová, A., Nazmunnahar, M. & Cerny, R., 2016. Lightweight gypsum-based materials prepared with aluminum powder as foaming agent. *Cement Wapno Beton*, 19(5), pp. 299-307.
- Vimmrová, A., Keppert, M., Svoboda, L. & Černý, R., 2011. Lightweight gypsum composites: Design strategies for multi-functionality. *Cement and Concrete Composites*, 33(1), pp. 84-89.
- Wang, Y. Y. & Li, G. Z., 2011. Surface Modification of Cornstalk Fiber and Properties of Cornstalk Fiber/Gypsum Composites. *Advanced Materials Research*, Volumen 306, pp. 766-769.
- WRAP, 2009. Construction products, materials and waste. [Online] Disponible en: <http://www.wrap.org.uk/> [Último acceso: marzo 2014].
- Wu, Z., Chen, B. & Liu, N., 2013. Fabrication and compressive properties of expanded polystyrene foamed concrete: Experimental research and modeling. *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)*, 18(1), pp. 61-9.
- Xiaolong, S., Mingsheng, H. & Xiaojian, F., 2011. Linear analysis and strength prediction of experiment on lightweight heterogeneous soil mixed with expanded polystyrene. *Advanced Materials Research*, Volumen 250-253, pp. 622-5.
- Xinfeng, T., Ying, W., Yan, Y. & Zengzhi, Z., 2013. Study on the Influences of Foaming Gypsum's Performance. *Materials Science Forum*, Volumen 743 - 744, pp. 222-227.
- Xi, Y. G., Peng, T., Liu, H. & Chen, J., 2011. Preparation and Properties of Expanded Vermiculite/Gypsum Thermal Insulation Boards. *Advanced Materials Research*, Volumen 178, pp. 220-225.
- Yadollah, D., Mitchell, W. & Breindel, R. M., 2011. Extruded polystyrene foam containing propylene carbonate, ethylene carbonate or butylene carbonate as a process aids. s.l. Patente nº MX20100013201 20101202.
- Yedesa, 2014. Yeso de proyección aligerado. [En línea] Disponible en: www.yedesa.com [Último acceso: noviembre 2014].
- Yesamsa, 2014. Yeso de proyectar aligerado. [En línea] Disponible en: www.yesamsa.es [Último acceso: 26 enero 2017].
- Yesos Millán, 2014. Yesos aligerados de proyectar. [En línea] Disponible en: www.yesosmillan.es [Último acceso: noviembre 2014].
- Yetosa, 2014. Yeso de proyectar aligerado. [En línea] Disponible en: www.yetosa-yemasa.com [Último acceso: noviembre 2014].
- Yi, X. & Linhua, J., 2011. Investigating mix proportions of lightweight expanded polystyrene concrete. *Applied Mechanics and Materials*, pp. 950-3.
- Yi, X., Linhua, J., Jinxia, X. & Yang, L., 2012. Mechanical properties of expanded polystyrene lightweight aggregate concrete and brick. *Construction & Building Materials*, 27(1), pp. 32-8.
- Yong, G. X., Tong, J. P., Hai, F. L. & Ji, M., 2010. Preparation and Properties of Expanded Vermiculite/Gypsum Thermal Insulation Boards. *Advanced Materials Research*, Volumen 178, pp. 220-225.
- Zhang, W. H., Li, G. Z. & Liu, M. R., 2011. Properties research of cotton fiber reinforced gypsum based composites. *Advanced Materials Research*, Volumen 194, pp. 1759-1762.
- Zhao, J., 2013. Cement XPS (Extruded Polystyrene)-sandwiched composite insulation board. s.l. Patente nº B32B13/12; B32B13/14; B32B27/06; B32B27/30; B32B3/30; E04B1/80; E04B1/94.
- Zheng, G., Wang, R., Zhao, G. & Yu, X., 2012. Adsorption and dispersion characteristics of superplasticizer with waste plexiglas (WPS) on the surface of gypsum particles. *Applied Mechanics and Materials*, Volumen 127, pp. 272-276.

- Zhengxian, Y., Hollar, J. & Xianming, S., 2010. Surface-sulfonated polystyrene microspheres improve crack resistance of carbon microfiber-reinforced Portland cement mortar. *Journal of Materials Science*, 45(13), pp. 3497-505.
- Zhou, S. y otros, 2013. The preparation and performance of gypsum-based composites. *Applied Mechanics and Materials*, Volumen 310, pp. 46-50.

CAPÍTULO 3. JUSTIFICACIÓN DE LA TESIS

3.1 Necesidad de diseñar materiales con mejor comportamiento térmico

3.2 Necesidad de buscar estrategias para reutilizar el residuo de poliestireno extruido

3.3 Necesidad de optimizar el yeso como material de construcción actual

CAPÍTULO 3. JUSTIFICACIÓN DE LA TESIS

Considerando el marco contextual sobre el impacto ambiental del sector residencial y la situación del yeso como material de construcción, expuesto en el capítulo 1, y a la vista de los antecedentes desarrollados en el capítulo 2, se extraen las siguientes consideraciones que justifican el desarrollo de esta Tesis Doctoral:

- Necesidad de diseñar materiales con mejor comportamiento térmico
- Necesidad de buscar estrategias para reutilizar el residuo de poliestireno extruido
- Necesidad de optimizar el yeso como material de construcción actual

3.1 NECESIDAD DE DISEÑAR MATERIALES CON MEJOR COMPORTAMIENTO TÉRMICO

España se encuentra entre los cinco primeros países de la Unión Europea que más energía consumen y de los que más dependencia energética tienen con otros países. Además, más de un 45% de la energía que se consume en España procede del petróleo, que es un combustible fósil, no renovable y que de su uso se emiten gases de efecto invernadero, que son aquellos gases que actúan aumentando la temperatura del aire próximo al suelo y que a altos niveles producen el llamado calentamiento global.

El impacto ambiental de los combustibles fósiles y la amenaza sobre la estabilidad del suministro de fuentes de energía como el petróleo, prueban la necesidad de que el ahorro y la eficiencia energética formen parte indispensable de nuestra vida diaria. De hecho, en España, los beneficios derivados de los menores consumos de energía y las menores emisiones de CO₂, se estiman en 133,4 millones de toneladas equivalentes de petróleo, lo que supondría un ahorro de 70.357 millones de euros.

Uno de los sectores que más energía consume en España es el residencial, especialmente con la demanda de calefacción y refrigeración de los edificios.

Desde el punto de vista técnico, para la reducción del consumo de calefacción y refrigeración, una de las alternativas más destacables es la mejora del comportamiento térmico de la envolvente. De hecho, tanto la normativa Europea como la nacional son cada vez más exigentes en este aspecto, lo que en general se está traduciendo en un incremento en la cantidad de material aislante térmico que se añade en la envolvente de los edificios.

3.2 NECESIDAD DE BUSCAR ESTRATEGIAS PARA REUTILIZAR EL RESIDUO DE XPS

La explotación insostenible de los recursos naturales es un problema que cada vez preocupa más a la sociedad, no sólo porque se empiezan a observar los primeros síntomas claros de agotamiento en los ecosistemas y las consecuencias de todo tipo que de ello se derivarán para la humanidad. Si no porque viene acompañada de un aumento importante en la generación de residuos.

España se encuentra entre los países de la Unión Europea que más residuos generan, especialmente en el sector de la construcción. Por ello, es uno de los sectores de mayor interés para la aplicación de buenas prácticas de gestión de residuos. De hecho, la Directiva 98/2008/CE establece como objetivo para el año 2020, la reutilización, el reciclado y la recuperación de al menos

un 70% en peso de los residuos de construcción y demolición, y actualmente esa tasa está por debajo del 40%.

En este sentido, los polímeros sintéticos requieren de un especial interés, no sólo porque España se encuentra entre los cinco países que más residuos de polímeros sintéticos generan, sino porque a diferencia de la madera y los metales, su proceso de recuperación es demasiado costoso para que sea actualmente rentable y por ello acaban incinerándose o llevándose directamente a vertedero.

Además, dentro del sector de la construcción cada vez se utiliza más cantidad de material aislante térmico para dar solución a los exigentes requerimientos de la normativa en cuanto a demanda energética. Entre estos materiales aislantes térmicos destaca el uso de poliestireno extruido por ser uno de los más empleados. El residuo generado solo del uso de este material se estima en un 5% en peso del total de material suministrado (sin tener en cuenta el desperdicio que se pueda producir durante su fabricación), lo que supone un gran volumen de material, dada su baja densidad. Si a eso se le añade que cada vez se utiliza más cantidad, su correcta gestión comienza a ser imprescindible.

Una de las buenas prácticas de gestión de los residuos de construcción y demolición es su reutilización para fabricar nuevos materiales de construcción. Esta práctica está muy extendida en la obtención de áridos, pero aún no se ha empezado a extender a otros materiales, a pesar de que la generación de residuos no minerales (principalmente madera, metales y polímeros sintéticos) ha aumentado en los últimos años.

Aunque no se ha encontrado ninguna referencia en los antecedentes para la reutilización del residuo de poliestireno extruido en materiales de construcción, sí que se han encontrado referencias sobre el uso de otros residuos de polímeros sintéticos como el residuo de poliuretano, que se ha utilizado como agregado ligero en compuestos de yeso como alternativa al uso de otros agregados ligeros de alto impacto ambiental, como las perlas de poliestireno, la perlita o la vermiculita.

3.3 NECESIDAD DE OPTIMIZAR EL YESO COMO MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN ACTUAL

El sector de la construcción en España es una de las actividades que menos ha evolucionado en los últimos años. Los materiales más tradicionales siguen siendo los más utilizados y en algunos casos su uso conlleva un gran impacto ambiental que no se tiene en cuenta, pero que tiene una gran repercusión a largo plazo.

El yeso, a pesar de ser un material que se ha utilizado desde la antigüedad sigue siendo un material poco evolucionado. Aunque se hable de la tercera generación del yeso y que se usen aditivos para mejorar sus propiedades, aun no se habla de un yeso de cuarta generación, un yeso adaptado a la sociedad actual en la que la preocupación por el medio ambiente es ya parte de nuestra forma de vida.

El aljez del que se obtiene el yeso se consigue mediante la explotación de canteras a cielo abierto. Las canteras suponen un alto impacto ambiental, porque destruyen ecosistemas y alteran tanto al suelo como al agua superficial o subterránea y al aire de la zona en la que se encuentran por la emisión de polvo, además de afectar a la flora y la fauna, limitar los usos del suelo a su alrededor e incrementar los riesgos geológicos por desprendimientos o deslizamientos.

Asimismo, la fabricación del yeso conlleva un proceso de calcinación que consume energía y emite gases de efecto invernadero. Y también un alto porcentaje del aljéz es transportado varios kilómetros o incluso exportado a otros países de Europa, con lo que su ciclo de vida conlleva también un porcentaje extra de consumo de combustibles fósiles y emisiones de CO₂ derivados de este transporte.

Del análisis realizado tanto en la introducción como en el estado de la cuestión se ha observado que una de las posibles estrategias que existen tanto para reducir el consumo de yeso en el sector de la construcción, como para mejorar su comportamiento térmico, es su sustitución parcial por agregados ligeros, como el residuo de poliestireno extruido.

Estas consideraciones justifican y dan lugar a los objetivos propuestos en esta Tesis Doctoral.

CAPÍTULO 4. OBJETIVOS DE LA TESIS

CAPÍTULO 4. OBJETIVOS DE LA TESIS

El objetivo principal de esta Tesis Doctoral es ayudar a reducir el impacto ambiental del sector residencial mediante el diseño de un nuevo material eco-eficiente a partir de un compuesto de yeso al que se le incorpora residuo de poliestireno extruido proveniente de obras de construcción, con el propósito de obtener un material aligerado con propiedades térmicas mejoradas a la vez que se reutiliza un residuo de construcción que de otra forma sería eliminado en vertedero o incinerado.

Para conseguir este objetivo se seguirán los siguientes objetivos específicos:

Ob1. Caracterizar los residuos de poliestireno extruido.

- Desarrollar un procedimiento de segregación para facilitar su obtención.
- Establecer el formato adecuado para su incorporación a una matriz de yeso.
- Caracterizar el residuo por sus propiedades físicas.

Ob2. Caracterizar los compuestos de yeso aligerados con residuo de poliestireno extruido.

- Establecer el porcentaje adecuado de agregado para su incorporación a una matriz de yeso.
- Caracterizar los compuestos de yeso con residuo de poliestireno extruido por sus propiedades físicas, mecánicas, térmicas, acústicas y su comportamiento frente al agua y comparar los resultados con los requerimientos mínimos establecidos en la normativa vigente.
- Proponer aplicaciones para los compuestos de yeso aligerados con residuo de poliestireno extruido.

Ob3. Comparar los resultados obtenidos al caracterizar los compuestos de yeso aligerados con residuo de poliestireno extruido con los resultados obtenidos al aligerar el yeso con otros agregados ligeros.

- Realizar una búsqueda bibliográfica de materiales compuestos de yeso aligerado y anotar sus principales parámetros.
- Seleccionar el agregado ligero de la búsqueda bibliográfica con el que mayor reducción de densidad se consiga y caracterizar un compuesto de yeso aligerado con este agregado siguiendo la misma metodología utilizada para caracterizar los compuestos de yeso aligerados con residuo de poliestireno extruido.
- Realizar un análisis comparativo de los resultados obtenidos al caracterizar los compuestos de yeso aligerados con residuo de poliestireno extruido con los resultados obtenidos de la búsqueda bibliográfica y con los resultados obtenidos al caracterizar un compuesto de yeso aligerado con el agregado ligero seleccionado.

Ob4. Desarrollar un índice de aligeramiento eco-eficiente para valorar los compuestos de yeso aligerados por sus propiedades físicas y por su eco-eficiencia.

Ob5. Analizar el comportamiento térmico de los compuestos de yeso aligerados con residuo de poliestireno extruido en su aplicación en distintos sistemas constructivos mediante simulación numérica.

CAPÍTULO 5. METODOLOGÍA

5.1 Caracterización de los residuos de XPS

5.2 Caracterización de compuestos de yeso con residuo de XPS

5.3 Análisis comparativo con otros agregados ligeros

5.4 Índice de aligeramiento eco-eficiente

5.5 Análisis del comportamiento térmico mediante simulación numérica

5.6 Trabajos citados

CAPÍTULO 5. METODOLOGÍA

En este capítulo se desarrolla la metodología utilizada para dar respuesta a cada uno de los objetivos específicos fijados en el capítulo 4:

- Ob1. Caracterización de los residuos de XPS
- Ob2. Caracterización de compuestos de yeso con residuo de XPS
- Ob3. Análisis comparativo con otros agregados ligeros
- Ob4. Índice de aligeramiento eco-eficiente
- Ob5. Análisis del comportamiento térmico mediante simulación numérica

5.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS RESIDUOS DE XPS

En este apartado se explica la metodología utilizada para dar respuesta al objetivo específico número 1. Para ello se explica inicialmente la metodología para desarrollar el procedimiento de segregación del residuo. A continuación se establece la metodología para obtener el formato adecuado del residuo y por último se expone el plan experimental para caracterizarlo y se describen todos los ensayos.

5.1.1 Procedimiento de segregación del residuo

Los procedimientos de segregación son una de las herramientas más extendidas en los sistemas de gestión. Como no existe una estructura predefinida para la elaboración de procedimientos para la segregación de residuos de construcción y demolición, se utilizará el sistema propuesto por Villoria Sáez en su Tesis Doctoral, en la que desarrolla un sistema completo de gestión de residuos de construcción y demolición para obras de edificación residencial (Villoria Sáez, 2014).

En este sistema de gestión se establece que los procedimientos deben contar con los siguientes apartados:

- Objeto: debe indicar de forma breve el propósito del procedimiento.
- Alcance: describe a qué es aplicable el procedimiento y quiénes son los que se tienen que someter al procedimiento.
- Referencias: listado de documentos a los que el procedimiento alude en alguno de sus apartados.
- Responsables: indica la persona responsable de la preparación del procedimiento y su puesta en marcha.
- Fases: donde se determinan las acciones precisas y ordenadas para el desarrollo del procedimiento, señalando responsables de cada fase y la temporalización de las acciones.
- Diagrama de flujo/ flujograma: es una representación gráfica de los pasos que se siguen para realizar un proceso; partiendo de una entrada, y después de realizar una serie de acciones, llegamos a una salida.

- Revisión procedimiento: indica la previsión de cuándo se realizará la próxima revisión del procedimiento, quién es el responsable de la misma y a quién hay que informar de los cambios introducidos en el mismo.
- Cambios realizados en el procedimiento: sirve para incluir una breve descripción de los cambios introducidos en el procedimiento.
- Anexo: documentación en detalle del procedimiento. Pueden ser tablas, calendarios, diagramas de flujo. En esta sección se relacionan los anexos que acompañen al procedimiento.

En aquellos casos donde no se considere necesario cumplimentar alguna sección se indica que no procede.

5.1.2 Formato adecuado del agregado

En función del tamaño y formato del agregado obtenido mediante el procedimiento de segregación se evalúa si es necesaria la transformación del residuo mediante algún tratamiento previo como la separación, si viene mezclado con otros materiales, un tamizado si viene en distintas granulometrías, un prensado o un fraccionamiento, etc.

5.1.3 Caracterización del residuo

El residuo se va a caracterizar físicamente tanto por su densidad como por su microestructura, por ello en esta fase se van a realizar los siguientes ensayos:

- Densidad real
- Densidad aparente
- Microscopía electrónica de barrido

5.1.4 Ensayos realizados

Los ensayos se han realizado en la Escuela Técnica Superior de Edificación de la Universidad Politécnica de Madrid y en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad de Burgos.

Las condiciones generales de los ensayos se ajustan a los siguientes requerimientos:

- La temperatura de la sala de ensayo, del equipo y de los materiales (yeso y aditivos o cargas) será de $(23\pm 2)^{\circ}\text{C}$.
- La humedad relativa del laboratorio será de $50\pm 5\%$.
- Todos los recipientes, así como los moldes utilizados para el amasado del yeso y la fabricación de probetas, serán estancos, realizados con materiales impermeables y resistentes al sulfato cálcico.
- Todo el material utilizado para la realización de los ensayos se limpiará previamente a la realización de estos.

5.1.4.1 Densidad real

Para analizar la densidad real del agregado ligero se ha utilizado la norma *UNE-EN 1936:2007 Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la densidad real y aparente y de la*

porosidad abierta y total, que define la densidad real de una probeta como la relación entre la masa de la probeta seca y el volumen de su parte sólida (AENOR, 2007).

Equipo utilizado: molinillo eléctrico, tamiz 0,063 mm, balanza electrónica con precisión de $\pm 0,1$ gramos y picnómetro.

Figura 5-1 Picnómetro

Procedimiento: se muele una cantidad de la muestra hasta que las partículas pasen a través de un tamiz de 0,063 mm de malla. Después se seca la muestra hasta masa constante y se separan 10 gramos aproximadamente (m_e), pesados con una precisión de $\pm 0,01$ g.

Se llena el picnómetro con agua desionizada hasta el enrase, se cierra y se limpia cualquier rebose. Finalmente se pesa el picnómetro con una precisión de $\pm 0,01$ g (m_1).

Se vacía y se limpia el picnómetro, se llena únicamente con agua desionizada y se pesa con una precisión de $\pm 0,01$ g (m_2).

Para cada pesada la temperatura ambiente debe ser de (20 ± 5) °C.

Expresión de los resultados: la densidad real se mide en g/cm^3 y viene dada por la expresión [1]:

$$\rho_r = \frac{m_e}{m_2 + m_e - m_1} \times \rho_{rh} \quad [1]$$

Donde,

ρ_r es la densidad real en g/cm^3 ;

m_e es la muestra de la probeta en g;

m_1 es el peso del picnómetro con la muestra de la probeta y lleno de agua en g;

m_2 es el peso del picnómetro lleno de agua en g;

ρ_{rh} es la densidad del agua, que son 998 kg/m^3 .

5.1.4.2 Densidad aparente

Para analizar la densidad aparente del agregado ligero se ha utilizado la norma *UNE-EN 1097-3 Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 3: Determinación*

de la densidad aparente y la porosidad de áridos, que define la densidad aparente como el cociente obtenido de dividir la masa del árido sin compactar, contenido en un recipiente determinado, por el volumen de dicho recipiente (AENOR, 1999).

Equipo utilizado: recipiente cilíndrico estanco de volumen igual a un litro, balanza electrónica con precisión de $\pm 0,1$ gramos, regla de acero y placa de vidrio.

Procedimiento: se pesa en seco el recipiente limpio y vacío (m_1). Se coloca el recipiente sobre una superficie horizontal y se llena hasta que rebose con la muestra. Se nivela la superficie con la regla de acero y se pesa lleno anotando su masa (m_2) redondeada a la fracción 0,1% más próxima. Se deberá repetir el ensayo con tres muestras.

Expresión de los resultados: la densidad aparente se mide en g/cm^3 y se obtiene de la media de los resultados obtenidos para cada muestra, que vienen dados por la expresión [2]:

$$\rho_b = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad [2]$$

Donde,

ρ_b es la densidad aparente en g/cm^3 ;

m_1 es la masa del recipiente vacío en kg;

m_2 es la masa del recipiente y la muestra en kg;

V es el volumen del recipiente, expresado en litros.

5.1.4.3 Microscopía electrónica de barrido (SEM)

El microscopio electrónico de barrido es aquel que utiliza un haz de electrones en lugar de un haz de luz para formar una imagen. Para lograrlo, el equipo cuenta con un dispositivo que genera un haz de electrones para iluminar la muestra y con diferentes detectores se recogen después los electrones generados de la interacción con la superficie de la misma para crear una imagen de alta resolución que refleja las características superficiales de la misma.

Equipo utilizado: FSEM HITACHI S-4800.

Procedimiento: La muestra debe ser recubierta con una capa de carbono o una capa delgada de un metal como el oro para conferirle carácter conductor. Posteriormente, se barre la superficie con electrones acelerados que viajan a través del cañón. Un detector formado por lentes basadas en electroimanes, mide la cantidad e intensidad de electrones que devuelve la muestra, siendo capaz de mostrar figuras en tres dimensiones mediante imagen digital. Su resolución está entre 4 y 20 nm, dependiendo del microscopio.

5.2 CARACTERIZACIÓN DE COMPUESTOS DE YESO CON RESIDUO DE XPS

En este apartado se explica la metodología utilizada para dar respuesta al objetivo específico número 2. Para ello se ha desarrollado inicialmente el plan experimental que se va a llevar a cabo para caracterizar los compuestos. A continuación se explica el procedimiento de confección de probetas, la metodología utilizada para nombrar los compuestos, todos los ensayos realizados, los materiales utilizados a lo largo de toda la Tesis Doctoral y el análisis estadístico que se ha llevado a cabo.

5.2.1 Plan experimental

Se ha realizado una profunda investigación sobre los trabajos de otros investigadores para conocer tanto los porcentajes de adición de agregados ligeros, como la relación agua/yeso más comunes en estudios de aligeramiento de compuestos de yeso con agregados ligeros. Por otra parte, esta Tesis Doctoral también se basa en este estudio bibliográfico para definir los ensayos a realizar en cada fase.

Los resultados más representativos del estudio de estos trabajos previos de otros investigadores se muestran en la tabla 5-1. De estos resultados se puede observar cómo se utiliza indistintamente el tipo yeso A (Escayola E-30 o E-35) o el tipo B1 (yeso de construcción rápido), llegando en algunos casos a realizar ensayos con ambos tipos de yeso, como es el caso del estudio de González Madariaga (2005). Sin embargo, para esta Tesis Doctoral se ha seleccionado únicamente el yeso tipo B1 por ser el más básico. Para este tipo de yeso la relación agua/yeso recomendada por el fabricante es 1-1,2. Aunque en la práctica esta relación agua/yeso es demasiado líquida para trabajarla en laboratorio. De hecho, como se puede ver en la tabla 5-2, del análisis de diferentes relaciones agua/yeso para un yeso tipo B1, se ha observado que a partir de 0,8 se dejan de cumplir los requerimientos mecánicos mínimos especificados en la norma UNE-EN 13279-1 que establece como resistencia mecánica a flexión mínima 1 N/mm² y a compresión 2 N/mm² (AENOR, 2009). Por ello, la relación agua/yeso que se va a utilizar en la fase de caracterización es la relación 0,8. A pesar de que en la fase de caracterización también se determinará la relación agua/yeso óptima de cada compuesto mediante el ensayo de consistencia de la pasta.

Fuente	Autor	Tipo yeso	Relación agua/yeso	Agregado ligero	Formato agregado	% de adición
Artículo	Gencel et al. (2016)	B1	0.8-1	Diatomita	<149 µm	10, 20%
Artículo	Khalil et al. (2013)	B1	0.6 y 0.8	Arena	<90 µm	0.2-10%
Artículo	Del Río et al. (1998)	A	0.6 y 0.8	Vermiculita	8 mm	20%
Artículo	Khalil et al. (2013)	B1	0.6 y 0.8	Humo de sílice		
Artículo	Khalil et al. (2013)	B1	0.6 y 0.8	Gel de sílice		
Artículo	Del Río et al. (1998)	A	0.8	Arcilla expandida	3-8 mm	20, 40, 50, 60%
Artículo	Del Río et al. (1998)	A	0.8	Perlita	1.5, 3, 5 mm	10, 20%
Artículo	Gutiérrez-González et al. (2012)	B1	0.46- 1.45	Residuo de poliuretano	0.1-1.75 mm	50, 100, 200, 300, 400%
Artículo	García Santos (2009)	A	0,7	EPS	5 mm	0-2%
Artículo	Del Río et al. (1998)	A	0,6	EPS	4-8 mm	3%
Tesis	Del Río et al. (1999)	B1, A	0.6 y 0.8	Residuo corcho		20%
Artículo	Herrero et al. (2013)	A	0.76-0.93	Residuo neumático	0-0.6, 0.5-2.5, 2.5-4.0 mm	30, 40, 50, 60%
Artículo	Gutiérrez-González et al. (2012)	B1	0.43- 0.50	Residuo de poliamida	0.05-0.1 mm	50, 100, 200, 300, 400%
Artículo	Jiménez Rivero et al. (2014)	A	0.70 0.76	Residuo de caucho	1-2, 2-4, 4-6, 20-25 mm	1.25, 2.50, 5, 7.5%
Tesis	González Madariaga (2005)	B1, A	0.8 y 1.25	Residuo de EPS	0.4 y 0.6 mm	1.6, 2, 3%

Tabla 5-1 Principales parámetros de compuestos de yeso aligerados obtenidos de la búsqueda bibliográfica

Fórmula dosificación	Resistencia a flexión (N/mm ²)	Resistencia a compresión (N/mm ²)
100Y+75A	3,72	6,23
100Y+80A	3,16	5,59
100Y+90A	0,94	1,15
100Y+100A	0,72	1,08

Tabla 5-2 Estudio de máxima relación agua/yeso

En cuanto a los porcentajes de adición, en general en los estudios de investigación analizados se han utilizado porcentajes altos, por ejemplo para la perlita y la vermiculita Del Río et al. utilizan porcentajes de 10 y 20% (Del Río Merino, et al., 1998) y para el residuo de neumático Herrero et al. utilizan porcentajes de 30 a 60% (Herrero, et al., 2013). Sin embargo, los investigadores que han estudiado el poliestireno expandido utilizan porcentajes bajos de 1 a 3%, como García Santos (2009) o González Madariaga (2005). Por ello, para esta Tesis Doctoral, dada la baja densidad del poliestireno extruido, se va a optar por analizar la máxima cantidad de residuo de poliestireno extruido que acepta el compuesto de yeso, partiendo de un 1% para en función de eso fijar los porcentajes de adición que se van a utilizar en el plan experimental.

Para determinar los ensayos a realizar en los diferentes apartados de esta Tesis Doctoral para caracterizar los compuestos, se tienen en cuenta tanto la normativa vigente como los estudios realizados por otros investigadores:

En cuanto a ensayos en estado fresco la norma *UNE-EN 13279-2:2014 Yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción. Parte 2: Métodos de ensayo*, considera imprescindibles el ensayo de consistencia de la pasta y de tiempo de fraguado. Por otra parte, esta misma norma reúne también los ensayos mecánicos que deben cumplir los compuestos de yeso, que son el ensayo de resistencia a flexión, resistencia a compresión, dureza superficial Shore C y adherencia superficial (AENOR, 2014).

La mayoría de los investigadores incorporan como análisis físico el estudio de la densidad, ya que la densidad es el factor más importante en los compuestos aligerados, y la porosidad, ya que gran parte de las propiedades de los materiales compuestos dependen del índice de porosidad que tengan. Por ejemplo Khalil et al. estudian la densidad, la porosidad y la resistencia a compresión (Khalil, et al., 2013) y Gencel et al. analizan la densidad, la porosidad, la resistencia a flexión y la resistencia a compresión (Gencel, et al., 2016). Además, algunos de los investigadores consideran imprescindible incorporar un estudio sobre la microestructura de los compuestos, como Gutiérrez-González et al. que analizan la microestructura de los compuestos de yeso con residuo de poliamida con el microscopio electrónico de barrido (Gutiérrez-González, et al., 2012).

Por otra parte, otros investigadores realizan otro tipo de ensayos para estudiar otras propiedades como por ejemplo Jiménez Rivero et al. que analizan el comportamiento frente a la humedad mediante el ensayo de absorción de agua por capilaridad (Jiménez Rivero, et al., 2014), Del Río Merino que en su Tesis Doctoral analiza el comportamiento acústico (Del Río Merino, 1999) o Herrero et al., entre otros, que analizan el comportamiento térmico a partir del estudio de la conductividad térmica (Herrero, et al., 2013).

Por todo ello en esta Tesis Doctoral se caracterizan las materias primas y se caracterizan los compuestos estudiándolos tanto en estado fresco como en estado endurecido, y dentro del estado endurecido se analiza el comportamiento físico, el mecánico, el comportamiento frente al agua, el térmico y el acústico.

El plan experimental desarrollado se ha dividido en las siguientes fases:

- FASE 1: ensayos previos
- FASE 2: caracterización en estado fresco de los compuestos
- FASE 3: caracterización en estado endurecido de los compuestos
- FASE 4: propuesta de aplicaciones

5.2.1.1 Fase 1: Ensayos previos

Los ensayos previos son imprescindibles para las fases posteriores de caracterización, ya que sirven para conocer inicialmente el comportamiento de los compuestos. Esta primera fase se subdivide a su vez en dos apartados: en el primero se confeccionan las probetas de referencia y en el segundo se determina el porcentaje adecuado de agregado ligero a incorporar a la mezcla.

Probetas de referencia

Las probetas de referencia son probetas sin adiciones que sirven como base para comparar los resultados obtenidos de las adiciones incorporadas, por ello sobre ellas se realizan los mismos ensayos de caracterización en estado fresco y endurecido que para el resto de compuestos analizados. Estas probetas de referencia se realizan con la misma relación agua/yeso que el resto de compuestos analizados, de tal manera que permita una comparación real.

Porcentaje adecuado de agregado

En este apartado se determina el porcentaje adecuado de agregado a incorporar al compuesto. Para ello se analizará cual es el mayor porcentaje de residuo que admite el compuesto en función de un criterio medio ambiental para ayudar a mejorar la tasa de reutilización de residuo en el sector de la construcción y para reducir la cantidad de materia prima virgen (en este caso yeso). Posteriormente se analizará la densidad de los compuestos resultantes según lo explicado en el apartado 5.2.4.3 para en su caso descartar aquellos compuestos que tengan una densidad mayor a 1g/cm^3 , no adecuados por tanto para considerarse compuestos de yeso aligerados.

5.2.1.2 Fase 2: caracterización en estado fresco de los compuestos

En esta fase se realizan los siguientes ensayos:

- Determinación de la relación agua/yeso
- Determinación del tiempo de fraguado

La determinación de la relación agua/yeso sirve para conocer la consistencia de la pasta. Con la relación agua/yeso óptima se determina el tiempo de fraguado. Ambos factores son imprescindibles para evaluar la trabajabilidad de la pasta.

La norma *UNE-EN 13279-1:2009 Yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción. Parte 1: Definiciones y especificaciones* fija los valores mínimos de referencia para todos los tipos de yeso de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción, entre ellos los de caracterización en estado fresco de los compuestos (AENOR, 2009)

5.2.1.3 Fase 3: caracterización en estado endurecido de los compuestos

La caracterización en estado endurecido de los compuestos sirve para determinar las propiedades físicas, mecánicas, térmicas, acústicas y el comportamiento frente a la humedad, de los compuestos de yeso. Por tanto, por lo motivos ya explicados en el apartado 5.2.1, los ensayos que se van a realizar en esta fase son:

- *Comportamiento físico*
 - Microscopía electrónica de barrido
 - Densidad
- *Comportamiento mecánico*
 - Dureza superficial Shore C
 - Resistencia mecánica a flexión
 - Resistencia mecánica a compresión
 - Adherencia superficial
- *Comportamiento frente al agua*
 - Absorción de agua por capilaridad
 - Durabilidad
- *Comportamiento térmico*
 - Coeficiente de conductividad térmico
- *Comportamiento acústico*
 - Coeficiente de absorción acústica

La norma *UNE-EN 13279-1:2009 Yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción. Parte 1: Definiciones y especificaciones* fija los valores mínimos de referencia para todos los tipos de yeso de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción, entre ellos los de caracterización en estado endurecido de los compuestos (AENOR, 2009)

5.2.1.4 Fase 4: propuesta de aplicaciones

En función de los resultados obtenidos en la fase de caracterización se realizará una propuesta de aplicaciones a diferentes elementos constructivos.

5.2.2 Confección de probetas

A continuación se describe el procedimiento y el equipo utilizado para la confección de probetas de acuerdo con la norma UNE-EN 13279-2 (AENOR, 2014):

Equipo utilizado: balanza electrónica con precisión de $\pm 0,1$ gramos, cronómetro, desecador de sílice, espátula, estufa modelo IEP CONTROL de 2.000 w, mezcladora amasadora planetaria, moldes, recipientes de amasado y paleta.

Procedimiento: se pesa cada una de las cantidades de los agregados del compuesto en la balanza electrónica, de acuerdo con la dosificación previamente elegida. Posteriormente se mezclan los materiales incorporando primero, en general, los aditivos al agua y después las cargas. A

continuación se añade el yeso, y se amasa durante un minuto a mano y durante otro minuto en mezcladora amasadora, tal como indica la norma.

Después la mezcla se vierte en el molde intentando evitar que se produzcan burbujas de aire (el tipo de molde para cada ensayo se resume en la tabla 5-3). Con tal objeto se coge el molde, una vez lleno de forma lo más homogénea posible, por los extremos y se sacude cinco veces sobre la mesa que lo soporta. En ocasiones es necesario un vibrado de la pasta para repartir mejor el compuesto y que no se formen coqueas. Cuando la pasta haya fraguado debe eliminarse el material sobrante con una regla metálica o rascador, mediante un movimiento de sierra.

Ensayos	Tipo de probeta	Dimensiones probeta (mm)	Tipo de molde
Densidad	Tipo 1	40x40x160	Molde 1 (Figura 5-2)
Dureza superficial Shore C	Tipo 1	40x40x160	Molde 1 (Figura 5-2)
Resistencia mecánica a flexión	Tipo 1	40x40x160	Molde 1 (Figura 5-2)
Resistencia mecánica a compresión	Tipo 1	40x40x160	Molde 1 (Figura 5-2)
Adherencia superficial ⁴	-	-	-
Absorción de agua por capilaridad	Tipo 1	40x40x160	Molde 1 (Figura 5-2)
Durabilidad	Tipo 1	40x40x160	Molde 1 (Figura 5-2)
Conductividad térmica	Tipo 2	300x300x30	Molde 2 (Figura 5-3)
Coefficiente de absorción acústica	Tipo 3	Ø= 30	Molde 3 (Figura 5-4)

Tabla 5-3 Tipos de probetas y tipo de molde para cada ensayo realizado

Figura 5-2 Molde 1 probetas tipo 1: de acero para probetas de dimensiones (40x40x160) mm³

Figura 5-3 Molde probetas tipo 2: de madera para probetas de dimensiones (300x300x30) mm³

⁴ Se ensaya el compuesto aplicado sobre soporte, en este caso un ladrillo hueco sencillo

Figura 5-4 Molde probetas tipo 3: de acero para probetas de dimensiones $\varnothing 30$ mm

Cuando las probetas han adquirido el grado adecuado de resistencia se deben desmoldar y pesar (P_0). Posteriormente se mantendrán en atmósfera de laboratorio durante siete días. Pasado ese tiempo las probetas deben desecarse hasta masa constante a una temperatura de 40 ± 2 °C en estufa. Una vez desecadas se pesan, obteniendo su peso desecado (P_d) y deben enfriarse en desecador de sílice hasta la temperatura del laboratorio de ensayo.

5.2.3 Denominación de los compuestos

A lo largo de esta tesis se manejan una gran cantidad de combinaciones de compuestos. Para su denominación se ha utilizado una nomenclatura que permite identificar en cada mezcla los materiales que la integran y la proporción. Cada compuesto viene designado por los componentes que lo integran separados con un signo (+) y su proporción frente al conglomerante mediante una fórmula de dosificación, en la que el primer término representa la proporción del conglomerante, que puede ser yeso (Y) o escayola (E), el segundo la proporción de agua de amasado en proporción al conglomerante y a continuación los sucesivos aditivos en proporción al conglomerante.

La manera de interpretar las nomenclaturas de los diferentes compuestos se muestra en la tabla 5-5, la cual utiliza las abreviaturas que aparecen en la tabla 5-4.

Abreviatura	Descripción
Y	Yeso
E	Escayola E-35
A	Agua
XPS<2	Residuo de poliestireno extruido de tamaño <2mm
XPS2	Residuo de poliestireno extruido de tamaño aproximado 2mm
XPS4	Residuo de poliestireno extruido de tamaño aproximado 4mm
XPS>4	Residuo de poliestireno extruido de tamaño >4mm
XPSf	Residuo de poliestireno extruido fino (<2mm)
XPSm	Residuo de poliestireno extruido medio (4mm)
XPSg	Residuo de poliestireno extruido grueso (>4mm)

Tabla 5-4 Abreviaturas de los componentes utilizados en los diferentes compuestos

Fórmula dosificación	Explicación de la fórmula
$100C + xA + yA_1 + \dots + zA_n$	Por cada 100 partes de conglomerante se añaden 'x' partes de agua, 'y' partes de aditivo A1 y así sucesivamente con el resto de aditivos que incorpore la mezcla

Tabla 5-5 Método de nomenclatura de los compuestos

5.2.4 Ensayos realizados

Los ensayos se han realizado en la Escuela Técnica Superior de Edificación de la Universidad Politécnica de Madrid y en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad de Burgos.

Las condiciones generales de los ensayos se ajustan a los siguientes requerimientos:

- La temperatura de la sala de ensayo, del equipo y de los materiales (yeso y aditivos o cargas) será de 23 ± 2 °C.
- La humedad relativa del laboratorio será de $50 \pm 5\%$.
- Todos los recipientes, así como los moldes utilizados para el amasado del yeso y la fabricación de probetas, serán estancos, realizados con materiales impermeables y resistentes al sulfato cálcico.
- Todo el material utilizado para la realización de los ensayos se limpiará previamente a la realización de estos.

5.2.4.1 Relación agua/yeso

La relación agua/yeso se debe determinar para cada compuesto para conseguir una consistencia suficiente para garantizar la trabajabilidad del compuesto. Existen tres procedimientos especificados en la norma *UNE-EN 13279-2:2014 Yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción. Parte 2: Métodos de ensayo* (AENOR, 2014) para determinar la relación agua/yeso: método del amasado a saturación, método de medida de la fluidez de la pasta y método de la mesa de sacudidas. En este caso se ha utilizado el método de la mesa de sacudidas, ya que es el que le corresponde a los yesos premezclados.

Equipo utilizado: mezcladora amasadora planetaria, recipientes de amasado y paleta, mesa de sacudidas y molde cónico, placa de vidrio de 150 mm de longitud por 150 mm de anchura aproximadamente, espátula, calibre y cronómetro.

Figura 5-5 Mesa de sacudidas

Procedimiento: Se pesa entre $1,2 \text{ dm}^3$ y $1,5 \text{ dm}^3$ de yeso, con una precisión de 1 g (m_4), la cantidad de agua determinada por ensayos previos (m_3) y la cantidad de aditivos y cargas en el porcentaje

que se haya establecido previamente. A continuación, se vierte en el recipiente de amasado seco el agua y se mezcla con los aditivos y cargas. Posteriormente se añade el yeso al agua y se remueve manualmente con la paleta durante 1 minuto aproximadamente. La pasta formada se mezcla con la mezcladora amasadora durante un minuto a baja velocidad (140 ± 5) min⁻¹ en rotación y (62 ± 5) min⁻¹ en movimiento planetario.

Se coloca el molde cónico en el centro de la placa de cristal de la mesa de sacudidas y sujetándolo firmemente se rellena el molde con la pasta en exceso, eliminándose el exceso con la espátula.

Al cabo de 10-15 s, se levanta el cono verticalmente y se añade la pasta que haya quedado adherida al molde a la pasta que queda en la placa de cristal. A continuación, se aplican 15 golpes verticales a una velocidad constante de 1 revolución por segundo en la mesa de sacudidas.

El diámetro de la galleta resultante se mide con una precisión de 1 mm en dos direcciones perpendiculares y la media de estos dos valores debe ser de (165 ± 5) mm. Cuando no sea así, se repetirá el ensayo desde el principio utilizando cantidades mayores o menores de agua.

Expresión de los resultados: La relación agua/yeso es una medida adimensional y viene dada por la expresión [3]:

$$A/Y = \frac{m_3}{m_4} \quad [3]$$

Donde,

A/Y es la relación agua/yeso, adimensional;

m_3 es la masa del agua de amasado en gramos;

m_4 es la masa del yeso en gramos.

5.2.4.2 *Tiempo de fraguado*

El tiempo de inicio de fraguado (T_{if}) ofrece información sobre la trabajabilidad de un compuesto de yeso. Existen dos procedimientos especificados en la norma *UNE-EN 13279-2:2014 Yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción. Parte 2: Métodos de ensayo* (AENOR, 2014) para determinar el tiempo de fraguado: método del cuchillo y método del cono de Vicat. En este caso se ha utilizado el método del cono de Vicat, que es el que debe utilizarse para yesos premezclados que lleven aditivos y/o retardadores. Este método consiste en determinar la profundidad de la penetración de la aguja o del cono de Vicat dentro de una pasta de yeso a medida que progresa el fraguado.

Equipo utilizado: aparato de Vicat, cono de Vicat, placa de vidrio de 150 mm de longitud por 150 mm de anchura aproximadamente, molde de caucho, espátula, cronómetro, mezcladora amasadora planetaria, recipientes de amasado y paleta.

Procedimiento: Se coloca el molde de caucho con su parte más ancha en contacto con la placa de vidrio. Se amasa el yeso con el agua previamente mezclada con los aditivos y cargas, se anota el momento en que se empieza a echar el yeso al agua (t_0) y se rellena el molde de caucho en exceso con la mezcla. Se elimina el exceso de material con la espátula en posición vertical mediante un movimiento de serrado. Se pone en contacto el cono con la superficie de la pasta soltando el dispositivo de Vicat.

Se debe abrir la barra guía utilizando el mecanismo de disparo. No debería transcurrir más de una vigésima parte del tiempo de principio de fraguado entre penetraciones sucesivas del cono. Se debe limpiar y secar el cono entre cada penetración y debería haber como mínimo distancias de 12 mm entre cada marca de penetración. Se anota el momento en que el cono penetra hasta una profundidad de (22 ± 2) mm sobre la placa de vidrio (t_1).

Figura 5-6 Aparato de Vicat

Expresión de los resultados: el tiempo de inicio de fraguado se mide en minutos y viene dado por la expresión [4]:

$$T_{if} = t_1 - t_0 \quad [4]$$

Donde,

T_{if} es el tiempo de inicio de fraguado, en minutos;

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

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

5.2.4.3 Densidad

La densidad de una probeta (D) es una propiedad relativa intrínseca al material y puede definirse como la masa por unidad de volumen. Para determinar la densidad de las probetas se ha utilizado el método que aparece en la norma *UNE-EN 102042:2014 Yesos y escayolas de construcción. Otros métodos de ensayo* (2014),

Equipo utilizado: balanza electrónica con precisión de $\pm 0,1$ gramos.

Procedimiento: se pesan las tres probetas tipo 1 (40 mm x 40 mm x 160mm) y se obtiene el valor medio de las 3 pesadas (P_d).

Expresión de los resultados: la densidad se mide en g/cm³ y viene dada por la expresión [5]:

$$D = \frac{p_d}{256} \quad [5]$$

Donde,

D es la densidad en g/cm³ y se obtiene de la media de los tres resultados individuales obtenidos para cada una de las tres probetas ensayadas;

p_d es el peso desecado de la probeta en g;

256 es el volumen de la probeta en cm³

5.2.4.4 Dureza superficial Shore C

De acuerdo con la norma *UNE-EN 102042:2014 Yesos y escayolas de construcción. Otros métodos de ensayo* (AENOR, 2014), la dureza Shore C del material se determina al imprimir una fuerza dada a una barra que termina en un penetrómetro de forma troncocónica.

Equipo utilizado: durómetro Shore C.

Figura 5-7 Durómetro Shore C

Procedimiento: se colocan las tres probetas tipo 1 (40 mm x 40 mm x 160mm), sobre una superficie estable y se toman medidas con el durómetro sobre las dos caras longitudinales correspondientes a los lados del molde, a razón de cinco medidas por cada cara.

Las medidas se reparten sobre el eje longitudinal con intervalos de 20 mm como mínimo entre los diferentes puntos y los extremos de los prismas.

Se repiten aquellas mediciones que hayan dado valores manifiestamente erróneos, debidos a la presencia de burbujas de aire ocluido. No se deben considerar en el cálculo de la media los valores que superen 2,5 veces la desviación estándar. Se debe anotar el número de resultados utilizados para la elaboración del valor medio.

Expresión de los resultados: la dureza superficial Shore C se mide en unidades Shore C y es el resultado de la media de las medidas obtenidas al aplicar el durómetro sobre las caras de las probetas.

5.2.4.5 Resistencia mecánica a flexión

De acuerdo con la norma *UNE-EN 13279-2:2014 Yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción. Parte 2: Métodos de ensayo* (AENOR, 2014), la resistencia a flexión (R_f) se determina al calcular la carga necesaria para romper una probeta tipo 1 (40 mm x 40 mm x 160mm) apoyada sobre rodillos cuyos centros estén separados 100 mm.

Equipo utilizado: Prensa monitorizada con dispositivos de flexión Mod. AUTOTEST 200-10SW.

Figura 5-8 Prensa monitorizada con dispositivos de flexión Mod. AUTOTEST 200-10SW

Procedimiento: se coloca cada una de las tres probetas tipo 1 sobre los rodillos del dispositivo de flexión y, mediante un rodillo central, debe aplicarse una carga hasta que se rompa cada probeta. Se anota la carga máxima (P_f), en newton, que soporta cada una de ellas.

Expresión de los resultados: la resistencia a flexión se mide en N/mm^2 y viene dada por la expresión [6]:

$$R_f = 0,00234 \times P_f \quad [6]$$

Donde,

R_f es la resistencia a flexión en N/mm^2 y se obtiene de la media de los tres resultados individuales obtenidos para cada una de las tres probetas ensayadas;

P_f es la carga media de rotura en N.

5.2.4.6 Resistencia mecánica a compresión

De acuerdo con la norma *UNE-EN 13279-2:2014 Yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción. Parte 2: Métodos de ensayo* (AENOR, 2014), la resistencia a compresión (R_c) se determina al comprimir una probeta tipo 1 (40 mm x 40 mm x 160mm) hasta su rotura.

Equipo utilizado: Prensa monitorizada con dispositivos de compresión Mod. AUTOTEST 200-10SW.

Procedimiento: se coloca cada una de las seis mitades de probeta tipo 1, obtenidas después de realizar el ensayo de resistencia a flexión en la prensa, con sus caras laterales hacia arriba y hacia abajo entre los dos platos de acero de la prensa de compresión, de forma que los lados de la probeta que estuvieron en contacto con las caras del molde estén en contacto con los platos de la prensa en una sección de 40 mm x 40 mm.

Se permite inclinar el plato superior para establecer un contacto perfecto entre las caras de las probetas y los platos de la prensa. El eje de rotación del plato superior debe estar centrado sobre la superficie de la probeta sometida a compresión. A continuación debe aplicarse una carga hasta que se rompa la probeta. Se anota la carga máxima (P_c), en newton, que soporta cada una de las probetas.

Figura 5-9 Prensa monitorizada con dispositivos de compresión Mod. AUTOTEST 200-10SW

Expresión de los resultados: la resistencia a flexión se mide en N/mm^2 y viene dada por la expresión [7]:

$$R_c = \frac{P_c}{1600} \quad [7]$$

Donde,

R_c es la resistencia a compresión en N/mm^2 y se obtiene de la media de los seis resultados individuales obtenidos para cada una de las seis mitades de las probetas ensayadas;

P_c es la máxima carga en la rotura en N;

1600 es el área de la probeta en mm^2 .

5.2.4.7 Adherencia superficial

La adherencia de un yeso a un determinado soporte se determina de acuerdo con la norma *UNE-EN 13279-2:2014 Yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción. Parte 2: Métodos de ensayo*, al establecer la máxima carga que soporta un disco de metal pegado al yeso al ser arrancado de forma perpendicular a su superficie (AENOR, 2014).

Equipo utilizado: balanza electrónica con precisión de $\pm 0,1$ gramos, cronómetro, espátula, mezcladora amasadora planetaria, moldes, recipientes de amasado, paleta, discos de metal de 50 mm de diámetro y con un espesor no menor de 10 mm, con un dispositivo central para realizar tracciones, adhesivo a base de resina, broca para cortar probetas de $50 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$ de diámetro del yeso endurecido, aparato de tracción que permita aplicar una carga de tracción sobre los discos de metal, sin que el conjunto se vea sometido a una carga de flexión. El manómetro de lectura del ensayo a tracción debe tener una precisión en la medición del 5% de la carga máxima registrada.

Figura 5-10 Dispositivo central para realizar tracciones

Procedimiento: se limpia la superficie del soporte que se va a utilizar (en este caso un ladrillo hueco sencillo). Se amasa el yeso y se aplica al soporte. Una vez fraguado, se mantiene durante 7 días en atmósfera de laboratorio de ensayo. Pasado este tiempo y mediante la broca se separan las áreas circulares a ensayar del conjunto de la masa. El corte debe hacerse a una profundidad de 5 mm aproximadamente. Sobre estas probetas de área cilíndrica (A), mediante el adhesivo, se pega el disco de metal centrado sobre la probeta asegurándose de que el adhesivo no ocupe el hueco existente entre las probetas aisladas y el resto de la masa conectándolas. Se aplica la carga de forma perpendicular a la superficie de ensayo mediante el aparato correspondiente. La carga debe aplicarse a una velocidad constante comprendida entre $0,003 \text{ N/mm}^2$ y $0,1 \text{ N/mm}^2$ por segundo. Debe anotarse la carga de rotura (P_a).

Expresión de los resultados: la resistencia a la adherencia (R_a) se mide en N/mm^2 y viene dada por la expresión [8]:

$$R_a = \frac{P_a}{A} \quad [8]$$

Donde,

R_a es la fuerza de adherencia en N/mm^2 ;

P_a es la carga de rotura en N;

A es el área de ensayo en la probeta cilíndrica en mm^2 .

La adherencia se calcula como el valor medio de todos los valores individuales y se expresa con una precisión de $0,01 \text{ N/mm}^2$.

5.2.4.8 Absorción de agua por capilaridad

No existe ensayo específico normalizado para la determinación de la absorción de agua por capilaridad en los yesos, por ello la metodología del ensayo se basa en las recomendaciones

RILEM⁵ (RILEM, 1980). Este ensayo determina el nivel de ascensión de agua que experimenta una probeta colocada verticalmente sobre un recipiente lleno de agua hasta una profundidad de 10 mm durante 10 minutos.

Equipo utilizado: recipiente con base plana, rejilla para colocar las probetas, regla y cronómetro.

Figura 5-11 Recipiente con rejilla para ensayo de absorción de agua por capilaridad

Procedimiento: Se coloca la rejilla en el fondo del recipiente, se llena el recipiente de agua hasta 10 mm. desde la rejilla. Se coloca sobre la rejilla en el recipiente con el agua. Pasados diez minutos medimos la altura media a la que ha llegado el agua en la probeta (véase figura 5-12).

Figura 5-12 Ensayo de absorción sobre probetas de referencia

Expresión de los resultados: la absorción de agua por capilaridad se representa por la altura en mm. que alcanza el agua en la probeta.

5.2.4.9 Durabilidad

El yeso presenta una gran estabilidad ante el paso del tiempo en ambientes interiores. Sin embargo, no soporta bien el efecto del agua (ATEDY, 2014). La resistencia del yeso se reduce a la mitad cuando el contenido de humedad alcanza el 1%, por lo que no es conveniente la exposición al agua.

⁵ Unión internacional de laboratorios y expertos en materiales de construcción, sistemas y estructuras

Además, una penetración prolongada de humedad en el revestimiento puede producir recristalizaciones con alteraciones del aspecto de su superficie.

Sin embargo, con el secado generalmente se recuperan las propiedades iniciales, por lo que una exposición ocasional al agua de corta duración, aunque sea repetida, no es perjudicial, siempre que el yeso pueda recuperar su humedad inicial de equilibrio. Esta propiedad se denomina “efecto Marin” en memoria de D. Manuel Marin, prestigioso empresario y Presidente de Eurogypsum.

Por tanto, teniendo en cuenta esta teoría se ha diseñado este ensayo para probar experimentalmente el efecto del agua en la durabilidad de los compuestos mediante un ciclo de desecado-saturado.

Equipo utilizado: balanza electrónica con precisión de $\pm 0,1$ gramos, estufa modelo IEP CONTROL de 2.000 w, desecador de sílice, recipiente con base plana y paño de algodón.

Procedimiento: se elaboran tres probetas tipo 1 (40 mm x 40 mm x 160mm) y después de desecarlas se pesan, obteniendo el valor medio de las 3 pesadas (P_d) que inicia el ciclo desecado-saturado.

A continuación se sumergen en agua en el recipiente con base plana y pasados 10 minutos se sacan, se seca ligeramente su superficie con un paño de algodón y se pesan. Se vuelven a sumergir durante 2 minutos más y se repite el proceso. Cuando la diferencia de pesada con la anterior sea de ± 1 gramo, se anota la pesada como peso sumergido (P_s).

El ciclo se repite hasta que se observe cualquier defecto en las probetas.

5.2.4.10 Coeficiente de conductividad térmico “Heat insulation house”

Las propiedades térmicas de los compuestos se han determinado mediante la obtención del coeficiente de conductividad. Para obtener el coeficiente de conductividad se ha utilizado una “Heat insulation house” de *Phywe* (véase

figura 5-13), cuya ficha técnica se puede consultar en el Anexo 1. Esta caja térmica es un cubo que tiene una cara fija, que es la base, cuatro caras con ventanas reemplazables y una cara completamente reemplazable que es la tapa.

Dentro de la caja térmica hay una fuente de calor (una bombilla incandescente de 120W) y un ventilador que reparte el calor por todo el volumen de la caja.

Figura 5-13 "Heat insulation house"

Para hallar el coeficiente de conductividad se coloca la placa de ensayo (300x300x30) mm junto con una placa muestra de características conocidas en una de las ventanas, las demás caras se dejan cerradas con poliestireno expandido y se colocan termopares en los diferentes puntos de cambio de temperatura (véase figura 5-15):

- En el interior de caja térmica al aire (T1).
- Pegada a la cara interior de la primera placa (placa de muestra) (T2).
- Entre las dos placas (T3).
- Pegada a la cara exterior de la segunda placa (placa de ensayo) (T4).
- En el exterior al aire (T5).

Figura 5-14 Software "Heat insulation house"

Figura 5-15 Esquema posición termopares en caja térmica

A continuación se enciende la fuente de calor y se enchufan los termopares a medidores de temperatura que van conectados a un ordenador donde se vuelcan los datos de temperatura cada minuto. Cuando la temperatura sea constante se toma nota de los valores de temperatura para obtener el coeficiente de conductividad a partir de la siguiente fórmula⁶:

$$\lambda' = \frac{\lambda e'}{e} \frac{(T_2 - T_3)}{(T_3 - T_4)} \quad [9]$$

Que se deduce de la siguiente fórmula del flujo de calor:

$$\emptyset = \frac{\lambda}{e} s(T_2 - T_3) = \frac{\lambda'}{e'} s'(T_3 - T_4) \quad [10]$$

Donde,

λ' es la conductividad térmica de la placa de ensayo en W/mK;

λ es la conductividad térmica de la placa de muestra en W/mK;

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

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

T_2 es la temperatura en la cara interior de la placa de muestra, expresado en grados kelvin;

T_3 es la temperatura entre las dos placas, expresado en grados kelvin;

T_4 es la temperatura en la cara exterior de la placa de ensayo, expresado en grados kelvin;

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

s' es el área de la cara de la placa de ensayo, expresado en m²;

s es el área de la cara de la placa de muestra, expresado en m².

⁶ Se considera que la radiación es despreciable y no se considera la convección.

5.2.4.11 Coeficiente de conductividad térmico *C-Therm TCi*

Esta tesis se ha desarrollado entorno a un proyecto del Programa Estatal de I+D+i Orientado a los Retos de la Sociedad, que ha sido financiado por el Ministerio de Economía, Industria y Competitividad. Uno de los hitos de este proyecto era la adquisición de un equipo específico para la obtención del coeficiente de conductividad térmico y el calor específico, el equipo *C-Therm TCi*. Aunque cuando se ha adquirido este equipo ya se había terminado la fase de ensayos, se ha decidido añadir este como ensayo adicional para los compuestos óptimos, ya que aporta nuevos parámetros térmicos de gran utilidad para el objetivo de simulación numérica.

El equipo *C-Therm TCi* consta de un sensor muy sensible sobre el cual se coloca la muestra a ensayar. Para asegurar un contacto correcto se utiliza un agente de contacto y si es necesario también un peso (véase figura 5-16). El equipo debe ser previamente calibrado para el tipo de agente de contacto utilizado, que en este caso será una grasa térmica de la marca *Wakefield*.

Mediante este ensayo se consigue directamente el coeficiente de conductividad térmico en W/mK y la efusividad térmica en W√s/m²K y adicionalmente se consigue el calor específico mediante la siguiente fórmula:

$$Cp = \frac{e^2}{k \cdot \rho} \quad [11]$$

Donde,

Cp es el calor específico en J/kgK;

e^2 es la efusividad térmica en W√s/m²K;

k es conductividad térmica en W/mK;

ρ es la densidad en g/cm³;

Figura 5-16 Sensor, agente de contacto y peso para ensayo con *C-Therm TCi*

5.2.4.12 Coeficiente de absorción acústica

Las propiedades acústicas de los compuestos se han determinado mediante la obtención del coeficiente de absorción acústica. Para obtener este coeficiente se ha utilizado un tubo de kundt *Acupro* de *Spectronics* (véase figura 5-17). El sistema ACUPRO sirve para implementar las normas

ISO 10534-2 y ASTM E-1050, que describen el método de obtención de la impedancia y la absorción acústica de los materiales, empleando un tubo de impedancia y dos micrófonos.

Figura 5-17 Tubo de Kundt Acupro de Spectronics

5.2.5 Materiales utilizados

En este apartado se describen las materias primas utilizadas a lo largo de todos los ensayos llevados a cabo.

5.2.5.1 Yeso

El conglomerante utilizado para todos los ensayos ha sido el yeso *Iberplast YG* de la marca *Placo*, constituido por sulfato cálcico semihidratado de elevada pureza y que es, conforme a la norma UNE-EN 13279-1 (AENOR, 2009), un yeso de construcción tipo B1, también denominado tradicionalmente yeso grueso o rápido.

Figura 5-18 Yeso Iberplast YG de la marca Placo

Este yeso se caracteriza por ser de granulometría gruesa y fraguado rápido. Otras características más específicas se pueden ver en la tabla 5-6.

Propiedad	Valor
Índice de pureza (%)	>75
Granulometría (mm)	0-2
Tipo de soporte recomendado	Soporte tradicional; ladrillo cerámico, hormigón y bloque picón
PH	>6
Factor resistencia a la difusión al vapor de agua μ	6
Resistencia mecánica a flexión/compresión (N/mm ²)	≥ 2
Dureza superficial (unidades Shore C)	≥ 45

Tabla 5-6 Características técnicas medias obtenidas en laboratorio para un yeso elaborado con Iberplast YG de Placo y agua

5.2.5.2 Agua

El agua utilizada en todos los ensayos realizados en la Escuela Técnica Superior de Edificación de la Universidad Politécnica de Madrid, es el agua potable suministrada por el Canal de Isabel II de la Comunidad de Madrid. Esta agua es destinada al consumo y por tanto está libre de cualquier impureza, no incorpora productos alcalinos o sales que pudieran interferir en los ensayos que se han realizado.

5.2.5.3 Residuos de poliestireno extruido

De entre los materiales que participan en este trabajo de investigación, la información sobre las características de los residuos de poliestireno extruido es la que resultó más escasa, ya que ningún centro de tratamiento de residuos nos ha facilitado información sobre la recuperación mecánica de estos residuos.

Los residuos utilizados en esta Tesis Doctoral se han obtenido directamente de una obra de construcción, en este caso de la obra 'Residencial Puerta del Retiro' sita en calle Carlos y Guillermo Fernández Shaw, 1 en Madrid de la empresa constructora-promotora Vía Célere. El residuo proviene de paneles de poliestireno extruido de la marca *Topox*⁷, cuyas características se pueden ver en la tabla 5-7. Estos residuos muestran tamaños y formas que por su heterogeneidad no son aptos para su integración en elementos constructivos conglomerados (véase figura 5-19), por lo que deben ser previamente transformados.

Propiedad	Valor
Resistencia a la compresión mínima (10% deformación)	300 KPa
Estabilidad dimensional bajo condiciones específicas de temperatura y humedad (48h, 70°C, 90% HR)	<5 %
Deformación bajo condiciones específicas de carga a compresión y de temperatura (40KPa, 70°C, 168)	<5 %
Fluencia de compresión 2% a 50 años	125 KPa
Tracción mínima perpendicular a las caras	100 KPa
Densidad nominal	35 (+/- 15%) kg/m ³
Conductividad térmica a 10°C	0,029 (30-60mm) 0,036 (>60mm)
Absorción de agua inmersión total	$\leq 0,7$ % volumen

⁷ En el ANEXO 2 puede verse la ficha técnica de los paneles de poliestireno extruido de la marca Topox.

Propiedad	Valor
Absorción de agua por difusión	1,5 % volumen
Resistencia hielo-deshielo	≤ 1
Reacción al fuego	E
Temperatura límite de aplicación	-50/+75 °C

Tabla 5-7 Especificaciones técnicas del poliestireno extruido TOPOX

Figura 5-19 Residuo de XPS

5.2.5.4 Perlas de poliestireno expandido

Las perlas de poliestireno expandido utilizadas en los ensayos son perlas de diámetro 0,45-0,63 mm. Sus características básicas se muestran en la siguiente tabla:

Propiedad	Valor
Densidad	25-40 g/l
Coeficiente conductividad térmica	0,034 W/mK
Absorción de agua	0,5/1,5 %
Permeabilidad al vapor de agua	35 g/m ² d

Tabla 5-8 Especificaciones técnicas de las perlas de poliestireno expandido

Figura 5-20 Perlas de poliestireno expandido

5.2.5.5 Aditivos de refuerzo

Como materiales de refuerzo (analizado en el anexo 3) se han utilizado fibra y dispersiones (aditivos plastificantes), en concreto:

Fibra de polipropileno (SikaFiber M-12 de Sika), que es una fibra monofilamento de polipropileno, diseñada para ser mezclada con hormigones y morteros con el fin de aumentar su durabilidad y evitar la fisuración. Sus principales características técnicas se pueden ver en la tabla 5-9.

Propiedad	Valor
Densidad	0,91 kg/l
Diámetro	~ 31 μ m
Longitud	12 mm
Absorción de agua	Nula
Tenacidad	~ 280-310 N/mm ² / 30-34 cn/tex
Alargamiento de rotura	80-140%

Tabla 5-9 Especificaciones técnicas de las fibras de polipropileno SikaFiber M-12 de Sika

Además, esta fibra es resistente a los rayos ultravioletas, a los álcalis del cemento, a los ácidos en general, al agua de mar, a los residuos alimentarios y ganaderos y a los aceites vegetales. Además es imputrescible y resistente a los hongos y a las bacterias.

Figura 5-21 Fibra de polipropileno SikaFiber M-12 de Sika

Aditivo plastificante o dispersión sintética (Masterset R111 de Basf), que es un aditivo retardante que permite regular el tiempo de inicio y fin de fraguado del hormigón ajustando su dosificación. Sus principales características técnicas se pueden ver en la Tabla 5-10.

Propiedad	Valor
Función principal	Retardador de fraguado
Efecto secundario	Retraso excesivo de fraguado por sobredosificación
Aspecto físico	Líquido transparente
Densidad 20°C	1,122 ± 0,03 g/cm ³
pH	7,85 ± 1
Viscosidad 20° C Brookfield Sp00/100rpm	< 10 cps.
Contenidos de cloruros	< 0,1%

Tabla 5-10 Especificaciones técnicas del aditivo Masterset R111

5.2.6 Análisis estadístico

Los resultados que se obtengan en la fase 4 de caracterización se analizarán estadísticamente mediante un análisis de la varianza con el software *Statgraphics Centurion*. El análisis de la varianza se utiliza para comparar los resultados obtenidos para una muestra concreta y sirve para definir si existe diferencia significativa entre los resultados o por el contrario no se puede considerar que exista diferencia y por tanto las fluctuaciones de los datos se deben únicamente al azar. Como factores que definen la muestra se encuentran al menos la granulometría y el porcentaje de residuo incorporado y como variables la densidad, la dureza superficial, la resistencia mecánica, la adherencia superficial, la absorción de agua por capilaridad y el coeficiente de conductividad térmico. Así mismo, con este modelo se puede comprobar si existe relación entre los distintos factores para los resultados de cada variable.

Para que se pueda aplicar el análisis de la varianza es preciso que se cumplan estas tres hipótesis:

- Los datos han de ser independientes. Para asegurar esto, las muestras cuyos resultados se desee comparar han de extraerse de manera aleatoria.
- Las poblaciones base de donde proceden las muestras han de ser normales
- Las poblaciones base de donde proceden las muestras han de tener la misma varianza

Estas hipótesis implican que las perturbaciones se distribuyan según una $N(0, \sigma^2)$. Tanto los resultados como la comprobación de estas hipótesis se desarrollarán en el anexo 5.

5.3 ANÁLISIS COMPARATIVO CON OTROS AGREGADOS LIGEROS

En este apartado se explica la metodología utilizada para dar respuesta al objetivo específico número 2. Para ello se desarrolla inicialmente una búsqueda bibliográfica sobre compuestos de yeso aligerados, se selecciona un agregado ligero, se fija la metodología para caracterizarlo y a continuación se hace un análisis comparativo entre los resultados obtenidos con este agregado ligero y los obtenidos en la búsqueda bibliográfica frente a los resultados obtenidos con el residuo de poliestireno extruido.

5.3.1 Búsqueda bibliográfica

El objetivo de este apartado es realizar una búsqueda bibliográfica basada en el estado de la cuestión desarrollado en el capítulo 2 para localizar aquellos estudios de investigación que analicen compuestos de yeso aligerados. La información encontrada acerca de los parámetros principales de estos compuestos (densidad, dureza superficial Shore C, resistencia mecánica a flexión, resistencia mecánica a compresión y coeficiente de conductividad térmico) se unificará en una tabla con valores porcentuales relativos al valor de referencia utilizado en cada estudio. Los valores así expuestos podrán ser comparados entre sí y con los resultados obtenidos en esta Tesis Doctoral.

5.3.2 Caracterización de compuestos de yeso con otro agregado ligero

En este apartado se seleccionará el agregado ligero con el que mayor reducción de densidad se consiga de todos los compuestos encontrados en la búsqueda bibliográfica. A continuación se seguirá el mismo plan experimental utilizado para caracterizar los compuestos de yeso aligerados con residuo de poliestireno extruido, explicado en el apartado 5.2.1.

5.3.3 Análisis comparativo de los resultados obtenidos

Por último, el objetivo de este apartado es realizar un análisis comparativo entre los resultados obtenidos con los compuestos de yeso aligerados con residuo de poliestireno extruido y los resultados obtenidos con el otro agregado ligero. Además, también se compararán los resultados obtenidos con todos los datos recogidos en la búsqueda bibliográfica para tener una idea de cómo se comporta el residuo de poliestireno extruido frente a otros agregados ligeros.

5.4 ÍNDICE DE ALIGERAMIENTO ECO-EFICIENTE

Para poder analizar los resultados obtenidos con el material de yeso aligerado con residuo de poliestireno extruido, se plantea en el objetivo específico número 3 el desarrollar un índice de aligeramiento eco-eficiente que sirva para valorar los compuestos de yeso aligerados con diferentes agregados ligeros. Para el diseño de este índice se ha tomado como referencia el coeficiente de aligeramiento adecuado desarrollado por Del Río Merino en su Tesis Doctoral. Este coeficiente de aligeramiento adecuado sirve para evaluar los compuestos de yeso aligerados en función de su densidad y su resistencia a flexión o a compresión. Para ello los distintos compuestos a valorar se comparan con un compuesto de referencia ideal que tiene la resistencia de un compuesto sin aditivos y la mitad de su densidad, de forma que la resistencia se considera a la mitad para que el factor determinante sea la densidad (Del Río Merino, 1999). El coeficiente de aligeramiento adecuado viene dado por las expresiones [12] y [13], siendo el compuesto ideal el que menor coeficiente de aligeramiento adecuado tiene.

$$K_a \sigma_f = \frac{D_{comp} \times \sigma_{f ref}}{\frac{\sigma_{f com}}{2} \times (D_{agua} - (D_{comp} - D_{ref}))} \quad [12]$$

$$K_a \sigma_c = \frac{D_{comp} \times \sigma_{c ref}}{\frac{\sigma_{c com}}{2} \times (D_{agua} - (D_{comp} - D_{ref}))} \quad [13]$$

Donde,

$K_{\alpha\sigma_f}$ es el coeficiente de aligeramiento adecuado a la resistencia a flexión (adimensional);

$K_{\alpha\sigma_c}$ es el coeficiente de aligeramiento adecuado a la resistencia a compresión (adimensional);

D_{comp} es la densidad del compuesto (g/cm^3);

D_{agua} es la densidad del agua (g/cm^3);

D_{ref} es la densidad del compuesto de referencia (g/cm^3);

σ_{fref} es la resistencia a flexión del compuesto de referencia (N/mm^2);

σ_{cref} es la resistencia a compresión del compuesto de referencia (N/mm^2);

σ_{fcomp} es la resistencia a flexión del compuesto (N/mm^2);

σ_{ccomp} es la resistencia a compresión del compuesto (N/mm^2).

Además de los parámetros utilizados para obtener el coeficiente de aligeramiento adecuado se van a incluir en el algoritmo de cálculo del índice de aligeramiento eco-eficiente la variable dureza superficial y otras dos variables que permitan valorar el factor eco-eficiente del compuesto, que serán la conductividad térmica y la presencia o no de residuos en el compuesto. El proceso para obtener el algoritmo se dividirá en tres fases:

- Calcular el valor de mejora de las variables
- Estandarizar los valores de mejora de las variables
- Ponderar los valores de mejora estandarizados de las variables

5.4.1 Cálculo del valor de mejora de las variables

El primer paso para calcular el índice de aligeramiento eco-eficiente será calcular el valor de mejora de las variables densidad, dureza superficial, resistencia a flexión, resistencia a compresión y conductividad térmica, con respecto al valor de la variable para un compuesto de referencia sin aditivos.

5.4.2 Estandarización de los valores de mejora de las variables

El valor de mejora de cada variable se estandarizará restandole la media y dividiéndolo por la desviación típica para convertir todo a la misma escala.

5.4.3 Ponderación de los valores de mejora estandarizados de las variables

Los valores de mejora estandarizados se ponderarán y la suma de todas las variables ponderadas será el resultado del índice de aligeramiento eco-eficiente.

Para ponderar la variable conductividad térmica ésta se multiplicará por dos para darle mayor importancia y se añadirá un bonificador por la presencia de residuos en el compuesto, tal como aparece en la siguiente tabla:

1% residuo ligero	+0,25
2% residuo ligero	+0,50
3% residuo ligero	+0,75
4% residuo ligero	+1

Tabla 5-11 Bonificador variable “incorporación de residuo”

Por último, para ponderar las variables densidad, dureza superficial, resistencia a flexión y resistencia a compresión se realizará una breve encuesta a un grupo de expertos en materiales de construcción que determinarán la importancia de cada una de ellas en tres aplicaciones de los compuestos de yeso:

- Revestimiento de yeso sobre soporte rígido
- Tabique de placas de yeso machihembradas de (600x600) mm con un espesor entre 50-150 mm
- Falso techo de paneles de yeso de (600x600) con un espesor medio de 15 mm sobre subestructura metálica

La metodología utilizada para elaborar la encuesta seguirá las siguientes fases:

5.4.3.1 Diseño de la encuesta

Se le prestará especial atención al diseño de la encuesta buscando plasmar los objetivos de este apartado en un conjunto de preguntas relevantes y de tipo cerrado, para facilitar el análisis de las respuestas. Por ello el cuestionario se dividirá en tres preguntas, una para cada aplicación de los compuestos de yeso. En cada una de estas tres preguntas el encuestado tendrá que valorar las cuatro variables por su importancia dentro de cada aplicación.

Con respecto al planteamiento de las preguntas se han seguido las siguientes recomendaciones:

- Hacer preguntas concretas
- Usar un lenguaje convencional
- Utilizar preguntas breves
- Evitar palabras y frases sesgadas
- Evitar preguntas con dos respuestas
- Evitar preguntas negativas

5.4.3.2 Difusión de la encuesta

Una vez diseñada la encuesta se ha considerado como modalidad más adecuada la encuesta online enviada por correo electrónico. Para la difusión se buscarán distintos medios como la universidad, asociaciones o departamentos técnicos de empresas productoras o suministradoras de materiales de construcción relacionados con el yeso.

5.4.3.3 *Análisis de los datos recogidos*

Las valoraciones de los encuestados sobre cada una de las preguntas se analizarán estadísticamente utilizando el software estadístico Statgraphics Centurion. El análisis estadístico de datos incluirá el estudio de la muestra y las características de la misma y el cálculo de valores estadísticos como la media, que servirá para ponderar las variables.

5.5 ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO POR SIMULACIÓN NUMÉRICA

En este apartado se analizará el comportamiento térmico, mediante simulación numérica, de la aplicación de los compuestos de yeso aligerados con residuo de poliestireno extruido, para dar respuesta al objetivo específico número 4 de esta Tesis Doctoral. Para esta simulación se utilizará un programa de Dinámica de Fluidos Computacional, concretamente el código STAR_CCM+.

Con esta simulación se va a evaluar la transferencia de calor en tres sistemas constructivos (cerramiento envolvente vertical, cerramiento envolvente horizontal y partición interior), para ello se definirá un modelo de referencia para cada sistema constructivo y sobre cada modelo de referencia se plantearán modelos escenario en los que se intercambie uno o varios de sus elementos constructivos por las aplicaciones del compuesto de yeso aligerado con residuo de poliestireno extruido.

5.5.1 Modelo de referencia

Para diseñar el modelo de referencia para la simulación se han tenido en cuenta varios estudios, como el llevado a cabo por Lousef et al., en el que se recomienda realizar un modelo cúbico (Lousef, et al., 2017) y el de Porras Amores et al, en el que se trabaja como base sobre un modelo obtenido a partir del Código Técnico de la Edificación (Porras Amores, et al., 2014).

Por todo ello, en el caso del estudio que se va a desarrollar en esta Tesis Doctoral se va a realizar un modelo de 1x1 m² de superficie con el espesor correspondiente a los elementos que compongan cada sistema constructivo.

Para el cerramiento de envolvente vertical se ha establecido una fachada de fábrica vista, no ventilada y con aislamiento por el interior (véase figura 5-22), para el cerramiento de envolvente horizontal se ha establecido una cubierta plana no transitable, no ventilada y autoprotegida (véase figura 5-23) y para la partición interior se ha establecido un tabique de ladrillo hueco doble con revestimiento a ambas caras (véase figura 5-24). Los parámetros de los diferentes materiales que componen los modelos de referencia se muestran en la tabla 5-12.

Figura 5-22 Modelo de referencia para envoltorio vertical

Figura 5-23 Modelo de referencia para envoltorio horizontal

Figura 5-24 Modelo de referencia para partición interior de LHD con revestimiento a dos caras

Material	Coefficiente conductividad térmica (W/m ² K)	Densidad (g/cm ³)	Calor específico (J/KgK)
Ladrillo cara vista	0,780	0,350	1.000
Enfoscado	1,300	2,000	1.000
Cámara de aire	0,270	-	-
Aislamiento térmico	0,040	0,112	1.000
Ladrillo hueco doble	0,320	0,770	1.000
Revestimiento	0,430	0,900	1.000
Lámina impermeable autoprottegida	0,230	1,100	1.000
Geotextil	0,050	0,120	1.000
Barrera de vapor	0,230	1,100	1.000
Formación de pendiente	1,150	1,800	1.000
Forjado	0,938	1,240	1.000
Cartón-yeso	0,250	0,900	1.000

Tabla 5-12 Datos elementos constructivos (Instituto Eduardo Torroja & Instituto de la Construcción de Castilla y León, 2007)

5.5.2 Modelos escenario

Los modelos escenario se establecerán en función de las aplicaciones y compuestos óptimos obtenidos mediante el índice de aligeramiento eco-eficiente.

Los parámetros de los compuestos óptimos serán los obtenidos en la fase de caracterización y para el coeficiente de conductividad térmica y el calor específico se tendrán en cuenta los valores obtenidos mediante con el equipo *C-Therm TCI*.

5.5.3 Análisis energético

Sobre cada modelo se analizará el diferencial de temperatura en la cara interior y la disminución de energía en W/m².

5.6 TRABAJOS CITADOS

- AENOR, 1999. UNE-EN 1097-3 Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 3: Determinación de la densidad aparente y la porosidad. Madrid: AENOR.
- AENOR, 2007. UNE-EN 1936:2007 Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la densidad real y aparente y de la porosidad abierta y total.. Madrid: AENOR.
- AENOR, 2009. UNE-EN 13279-1:2009 Yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción. Parte 1: Definiciones y especificaciones. Madrid: s.n.
- AENOR, 2014. UNE-EN 102042:2014 Yesos y escayolas de construcción. Otros métodos de ensayo. Madrid: AENOR.
- AENOR, 2014. UNE-EN 13279-2:2014 Yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción. Parte 2: Métodos de ensayo. Madrid: AENOR.
- ATEDY, 2014. Manual de ejecución de revestimientos de yeso. Madrid: Atedy.

- Del Río Merino, M., 1999. Elaboración y aplicaciones constructivas de paneles prefabricados de escayola aligerada y reforzada con fibras de vidrio E y otros aditivos (tesis doctoral). Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- Del Río Merino, M., Domínguez, J. D. & Hernández Olivares, F., 1998. Escayola aligerada con sólidos celulares. *Informes de la construcción*, 50(458), pp. nov-dic.
- García Santos, A., 2009. Escayola reforzada con fibras de polipropileno y aligerada con perlas de poliestireno expandido. *Materiales de Construcción*, 59(293), pp. 105-124.
- Gencel, O. y otros, 2016. A novel lightweight gypsum composite with diatomite and polypropylene fibers. *Construction and Building Materials*, Volumen 113, pp. 732-740.
- González Madariaga, F. J., 2005. Caracterización de mezclas de residuos de poliestireno expandido (EPS) conglomerados con yeso o escayola, su uso en la construcción (tesis doctoral). Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya.
- Gutiérrez-González, S. y otros, 2012. Compatibility between gypsum and polyamide powder waste to produce lightweight plaster with enhanced thermal properties. *Construction and Building Materials*, Volumen 34, pp. 179-185.
- Gutiérrez-González, S. y otros, 2012. Lightweight plaster materials with enhanced thermal properties made with polyurethane foam wastes. *Construction and Building Materials*, 28(1), pp. 653-658.
- Herrero, S., Mayor, P. & Hernández Olivares, F., 2013. Influence of proportion and particle size gradation of rubber from end-of-life tires on mechanical, thermal and acoustic properties of plaster-rubber mortars. *Materials & Design*, Volumen 47, pp. 633-642.
- Instituto Eduardo Torroja & Instituto de la Construcción de Castilla y León, 2007. CTE web. [En línea] Disponible en: <http://cte-web.iccl.es/materiales.php?a=22> [Último acceso: septiembre 2016].
- Jiménez Rivero, A., de Guzmán Báez, A. & García Navarro, J., 2014. New composite gypsum plaster – ground waste rubber coming from pipe foam insulation. *Construction and Building Materials*, Volumen 55, pp. 146-152.
- Khalil, A., Tawfik, A., Hegazy, A. & El-Shahat, M., 2013. Effect of different forms of silica on the physical and mechanical properties of gypsum plastercomposites. *Materiales de construcción*, 63(312), pp. 529-537.
- Lousef, S., Montazeri, H., Blocken, B. & Van Wesemael, P., 2017. On the use of non-conformal grids for economic LES of wind flow and convective heat transfer for a wall-mounted cube. *Building and Environment*, Volumen 119, pp. 44-61.
- Porras Amores, C., Viñas Arrebola, C., Rodríguez Sánchez, A. & Villoria Sáez, P., 2014. Assessing the potential use of strategies independent from the architectural design to achieve efficient ventilation: A Spanish case study. *Building Services Engineering Research and Technology*, 35(5), pp. 529-542.
- RILEM, 1980. TC 25-PEM. Protection et erosion des monuments: Recommandés pour mesurer l'artération des pierres et évaluer l'efficacité des méthodes de traitement. *Matériaux et Constructions*, 13, N. 75. s.l.: RILEM.
- Villoria Sáez, P., 2014. Sistema de gestión de residuos de construcción y demolición (RCD) en obras de edificación residencial. Buenas prácticas en la ejecución de obra (tesis doctoral). Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.

CAPÍTULO 6. CARACTERIZACIÓN DE LOS RESIDUOS DE XPS

- 6.1 Procedimiento de segregación**
- 6.2 Formato adecuado del agregado**
- 6.3 Caracterización del residuo**
- 6.4 Conclusiones parciales**
- 6.5 Trabajos citados**

CAPÍTULO 6. CARACTERIZACIÓN DE LOS RESIDUOS DE XPS

En este capítulo se analizan los resultados obtenidos de la caracterización del residuo de poliestireno extruido para dar respuesta al objetivo específico 1. Para ello inicialmente se ha desarrollado el procedimiento de segregación del residuo. A continuación se ha analizado el formato adecuado para incorporarlo a compuestos de yeso y por último se ha estudiado su densidad y su estructura superficial mediante análisis al microscopio.

6.1 PROCEDIMIENTO DE OBTENCIÓN DEL RESIDUO DE POLIESTIRENO EXTRUIDO EN OBRA

A continuación se desarrolla el procedimiento planteado para la segregación de residuos de poliestireno extruido de obras de construcción, que sigue la misma estructura planteada por Villoria Sáez en su Tesis Doctoral (Villoria Sáez, 2014).

En la primera hoja aparecerá primero la fecha de edición, que en este caso es 23 de febrero de 2015 y la fecha y número de revisión, si ha sido revisado. Por otra parte, también aparecerá el nombre y firma del responsable de elaboración, del responsable de revisión y del responsable de aprobación (véase figura 6-1).

PROCEDIMIENTO SEGREGACIÓN DE RESIDUO DE POLIESTIRENO EXTRUIDO			
FECHA DE EDICIÓN 23/02/2015	FECHA DE REVISIÓN -	NUMERO DE REVISION --	
	RESPONSABLE DE ELABORACIÓN	RESPONSABLE DE REVISIÓN	RESPONSABLE DE APROBACIÓN
NOMBRE Y APELLIDOS			
PUESTO	Coordinador de RCD/Coordinador de Calidad	Responsable de Medio Ambiente	Promotor
FIRMA			

Figura 6-1 Primera hoja del procedimiento de segregación de poliestireno extruido

En las siguientes páginas se expondrán los distintos apartados que componen el procedimiento:

a) Objeto

El objeto de este procedimiento es definir los criterios para la segregación en origen de los residuos de poliestireno extruido (XPS) que se generen durante la ejecución de la obra, cumpliendo todas las prescripciones y medidas establecidas en el Plan de Gestión de Residuos de la Obra y generando un registro documental de todo el proceso.

b) Alcance

Este procedimiento es de aplicación a toda la empresa, desde la fecha de emisión del mismo. Se aplica a todo residuo de XPS que se genere durante la ejecución de la obra.

c) Referencias

- Ley 22/2011
- RD 105/2008
- Norma ISO 14001
- Norma ISO 9001

d) Responsables

El Coordinador de la gestión de RCD en la obra será el responsable de realizar el seguimiento y control del proceso descrito en este procedimiento. Será responsabilidad del personal administrativo archivar la documentación que se genere.

e) Fases

Las fases que deben seguirse para realizar una correcta separación selectiva en origen son las siguientes:

1º Obtención de autorización por parte del órgano competente en materia medio ambiental de la Comunidad Autónoma en que se encuentre la obra para las actividades de valorización y eliminación de residuos de construcción y demolición. Esta autorización, que sólo se concederá previa comprobación de las instalaciones en las que vaya a desarrollarse la actividad, se concederá por un tiempo determinado, pasado el cual podrá ser renovada por períodos sucesivos.

2º Selección de contenedores para el residuo de XPS: Una vez conocida la cantidad aproximada de residuo de XPS que se vaya a generar se deberán elegir los contenedores adecuados para su segregación en obra. Estos contenedores deberán ser etiquetados de forma clara, legible e indeleble, al menos en castellano, empleándose para ello etiquetas que estén firmemente fijadas sobre el contenedor. Se deberán eliminar, en su caso, otras etiquetas que ya contuviera éste y que pudieran inducir a error del contenido. Estos contenedores se situarán en la zona general de acopio de residuos y los residuos se almacenarán en dichos contenedores de forma que:

- Se evite su contaminación con los residuos peligrosos
- Se eviten mezclas con otros residuos
- Se eviten pérdidas del contenido

3º Acopio de los residuos de XPS: previo a su acopio en los contenedores específicos para residuo de XPS, este residuo será recogido en contenedores temporales fácilmente distinguibles cerca de cada tajo en el que se vaya a generar este residuo. Estos contenedores temporales permanecerán

cerrados o cubiertos, sobre todo fuera del horario de trabajo, para evitar el depósito de otros residuos. Quedará terminantemente prohibido depositar otro tipo de residuos en estos contenedores. Para ello, se inspeccionará periódicamente la zona y cada vez que estos contenedores temporales se llenen deberán ser vertidos a los contenedores de específicos de residuo de XPS, situados en la zona de acopio de residuos.

4º Transporte de residuos

5º Registro de la trazabilidad del residuo: el personal correspondiente ejercerá un exhaustivo control sobre la trazabilidad del residuo de XPS, para ello desde el suministro de material de XPS hasta el transporte fuera de la obra del residuo de XPS producido se deberán recoger los siguientes datos⁸:

- Obra de procedencia del residuo de XPS (dirección, tipo de obra)
- Naturaleza del residuo de XPS:
 - Fabricante;
 - Modelo;
 - Uso del material;
 - Volumen de material suministrado;
 - Fecha de suministro
 - Vehículo de transporte (modelo, matrícula)
- Fecha de inicio de almacenamiento del residuo
- Volumen o peso de residuo generado
- Transporte del residuo:
 - Vehículo de transporte (modelo, matrícula)
 - Destino (instalación, nombre de la empresa, dirección y distancia en kilómetros)⁹
 - Fecha de retirada
 - Método de valorización

Además, de forma general se deberán cumplir las siguientes pautas:

- Se deberán conocer, además de la Legislación Estatal, las legislaciones específicas en materia de segregación de residuos propias de cada Comunidad Autónoma. Así, por ejemplo, la Orden 2726/2009 de la Comunidad de Madrid.
- Se deberá conocer la cantidad prevista aproximada de residuo de XPS generado.
- El poseedor de residuos (contratista) o un agente externo se encargará de la recogida y transporte del residuo.

f) Diagrama de flujo/ flujograma

No procede

g) Revisión del procedimiento

⁸ La documentación referida a cada año natural deberá mantenerse durante los cinco años siguientes.

⁹ Cuando se trate de un gestor que lleve a cabo una operación exclusivamente de recogida, almacenamiento, transferencia o transporte, deberá además de añadirse información con referencia al gestor de valorización.

Una vez al año el Coordinador de la gestión de RCD y el Coordinador de Calidad, revisarán el procedimiento, atendiendo a las sugerencias de los agentes implicados a los que les afecte y realizarán los cambios que estimen pertinentes para adecuar el proceso.

1. El Responsable de Medio Ambiente validará los cambios que se introduzcan en el procedimiento.
2. Realizadas dichas mejoras, se describirán los cambios realizados en el apartado 8 “Cambios realizados en las revisiones” del procedimiento. El Coordinador de la Gestión de los RCD, registrará el procedimiento con los cambios y lo incorporará en el sistema de gestión de la calidad de la empresa.
3. El Coordinador de la Gestión de los RCD, enviará el nuevo procedimiento a todos los afectados para su aplicación y archivará el procedimiento antiguo.

h) Cambios realizados en las revisiones

En este apartado se describirán todos los cambios realizados en las revisiones del procedimiento.

6.2 TRATAMIENTO DEL RESIDUO DE POLIESTIRENO EXTRUIDO PARA SU REUTILIZACIÓN

Los residuos de poliestireno extruido obtenidos mediante el procedimiento de segregación, desarrollado en el anterior apartado, tienen forma heterogénea y unas dimensiones entre 15 y 40 centímetros. Por ello, para reutilizarlos como agregados ligeros en compuestos de yeso es necesario realizar un tratamiento previo.

Como no se ha obtenido información sobre la transformación de este tipo de residuos en los gestores de residuos, se ha optado por seguir la metodología utilizada para el tratamiento de los residuos de poliestireno expandido, material de similares características. El tratamiento del residuo de poliestireno expandido es llevado a cabo en centros especializados específicamente en su recogida, gestión y reciclado, en los que se transforma este residuo hasta obtener partículas de dos granulometrías: FINA (<4mm) y GRUESA (4-6mm) (González Madariaga, 2005).

En función de esta metodología se ha optado por triturar los residuos de poliestireno extruido mediante dos métodos: (1) trituración del residuo en trituradora eléctrica no industrial y (2) trituración del residuo con rayador manual (véase figura 6-2).

Figura 6-2 Trituradora eléctrica no industrial (izquierda) y rayador manual (derecha)

La primera opción de trituración se ha descartado debido a que por la baja densidad del residuo éste flota por encima de la hélice de la trituradora al estar ésta en funcionamiento, imposibilitando la trituración del residuo. En cambio, con la segunda opción se han conseguido resultados muy positivos, a pesar de ser un método manual y de que el rendimiento es bajo. Por tanto, todo el residuo ha sido triturado utilizando este segundo método (véase figura 6-3).

Figura 6-3 Proceso de rayado del residuo de XPS

El residuo de poliestireno extruido triturado se ha tamizado en seco de acuerdo con la norma UNE-EN 933-1 (AENOR, 2012), para clasificarlo en las dos granulometrías en las que se transforma el residuo de poliestireno expandido: FINA (<4mm) y GRUESA (4-6mm). Asimismo, también se han utilizado tamices menores para caracterizar los residuos finos menores de 4 mm. En total se ha utilizado una columna de cuatro tamices normalizados de: 1; 2; 4 y 6 mm y se han obtenido cinco granulometrías diferentes (véase figura 6-4):

- Lo que retiene el tamiz de 6 mm: residuo descartado por tener un tamaño demasiado grande para su incorporación a compuestos de yeso.
- Lo que retiene el tamiz de 4 mm: residuo de tamaño >4 mm y menor de 6 mm.
- Lo que retiene el tamiz de 2 mm: residuo de tamaño >2 mm y menor de 4 mm.
- Lo que retiene el tamiz de 1 mm: residuo de tamaño >1 mm y menor de 2 mm.
- Lo que queda en el fondo: residuo de tamaño <1 mm.

El porcentaje de residuo retenido en cada uno de los tamices para 500 gramos de residuo de poliestireno extruido triturado se puede ver en la tabla 6-1.

Tamaño del tamiz (mm)	Residuo retenido (%)*	Nomenclatura (González Madariaga, 2005)
<1 mm	4%	-
1-2 mm	20%	-
2-4 mm	28%	FINO
4-6 mm	46%	GRUESO
>6 mm	2%	-

*Para 500 g de residuo triturado

Tabla 6-1 Tamaño de tamiz y porcentaje de residuo retenido para 500 gramos de residuo de XPS triturado

Figura 6-4 Residuos de XPS en los diferentes porcentajes obtenidos

De las granulometrías obtenidas se descarta el residuo mayor de 6 mm, que además de representar únicamente un 2% del total de residuo transformado, tiene un tamaño excesivo para su uso en compuestos de yeso. Y el residuo menor de 2 mm, ya que la cantidad obtenida de esta granulometría tampoco es representativa.

Como simplificación, el residuo de granulometría 1-2 mm se denominará residuo fino (XPSf), el residuo de 2-4 mm pasará a denominarse residuo medio (XPSm) y el residuo de 4-6 mm será el residuo grueso (XPSg).

6.3 CARACTERIZACIÓN DEL RESIDUO

La muestra de residuo de poliestireno extruido analizado es una muestra del residuo obtenido de obra triturado y posteriormente tamizado. Este residuo presenta el aspecto de la figura 6-5. Su forma es heterogénea y fibrosa y su tamaño se encuentra principalmente entre 1 y 2 mm.

Figura 6-5 Residuo de poliestireno extruido triturado (izquierda) y tamizado (derecha)

Se ha caracterizado esta muestra de residuo de poliestireno extruido por su densidad real, su densidad aparente y su estructura microscópica de acuerdo con la metodología planteada en el apartado 5.1.3.

6.3.1 Densidad real

El residuo de poliestireno extruido tiene una densidad muy baja y su tamaño no es lo suficientemente pequeño, por ello la realización de este ensayo ha sido muy compleja. Por un lado la flotabilidad de la muestra dificulta el proceso de llenado del picnómetro (véase figura 6-6) y por otro el tamaño de las partículas y su forma favorecen la creación de burbujas de aire que son muy difíciles de extraer. Por todo ello se han descartado los resultados obtenidos en este ensayo.

Figura 6-6 Picnómetro

6.3.2 Densidad aparente

Se ha utilizado un recipiente de ensayo de volumen 1 litro y se ha llenado con la muestra de residuo de poliestireno extruido. El recipiente se ha pesado antes y después de llenarlo y se ha repetido el ensayo tres veces obteniéndose una densidad aparente media de 34,23 g/l o lo que es lo mismo 0,034 g/cm³. Este resultado concuerda con los datos recogidos en el apartado 5.2.5.3, donde se

estima la densidad de este material entre 35 (+/- 15%) kg/m³. Los resultados se muestran en la tabla 6-2.

	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Media
m1	255 g	255 g	255 g	255 g
m2	289,70 g	287,00 g	291,00 g	289,23 g
v	1 litro	1 litro	1 litro	1 litro
ρ_b	34,70 g/l	32,00 g/l	36,00 g/l	34,23 g/l

Tabla 6-2 Resultados densidad aparente residuo XPS

6.3.3 Microscopía electrónica de barrido (SEM)

Tal y como se muestra en la figura 6-7 el residuo de poliestireno extruido presenta una estructura celular de celda cerrada. Además, estas celdas parecen estar homogéneamente distribuidas en cuanto a tamaño y forma.

Figura 6-7 Microscopía de una muestra de residuo de XPS a 200x (izquierda) y 100x (derecha)

6.4 CONCLUSIONES PARCIALES

El residuo de poliestireno extruido obtenido mediante el procedimiento de segregación desarrollado en este capítulo tiene un tamaño excesivo para su incorporación en compuestos de yeso.

Para transformar el residuo en laboratorio se ha utilizado un rallador y el residuo transformado resultante se ha tamizado de acuerdo con la metodología de tratamiento utilizada para tratar poliestireno expandido.

Finalmente se han seleccionado tres granulometrías: gruesa (4-6 mm), media (2-4 mm) y fina (1-2 mm).

El residuo caracterizado presenta una densidad similar a la densidad del producto del que proviene y mediante microscopía electrónica de barrido se ha observado que, como cabía esperar, presenta una estructura celular de celda cerrada.

6.5 TRABAJOS CITADOS

- AENOR, 2012. UNE-EN 933-1:2012 Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Madrid: s.n.
- González Madariaga, F. J., 2005. Caracterización de mezclas de residuos de poliestireno expandido (EPS) conglomerados con yeso o escayola, su uso en la construcción (tesis doctoral). Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya.
- Villoria Sáez, P., 2014. Sistema de gestión de residuos de construcción y demolición (RCD) en obras de edificación residencial. Buenas prácticas en la ejecución de obra (tesis doctoral). Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.

CAPÍTULO 7. CARACTERIZACIÓN DE COMPUESTOS DE YESO ALIGERADOS CON RESIDUO DE XPS

7.1 Fase 1: ensayos previos

7.2 Fase 2: caracterización en estado fresco de los compuestos

7.3 Fase 3: caracterización en estado endurecido de los compuestos

7.4 Fase 4: propuesta de aplicaciones

7.5 Conclusiones parciales

7.6 Trabajos citados

CAPÍTULO 7. CARACTERIZACIÓN DE COMPUESTOS DE YESO CON RESIDUO DE XPS

En este capítulo se analizan los resultados obtenidos de la caracterización de los compuestos de yeso aligerados con residuo de poliestireno extruido para dar respuesta al objetivo específico 2. Para la obtención de los resultados se han seguido las siguientes fases del plan experimental desarrollado en el capítulo de metodología:

1. Ensayos previos
 - a. Probetas de referencia
 - b. Porcentaje adecuado de agregado
2. Caracterización en estado fresco, a través de los siguientes ensayos:
 - a. Determinación de la relación agua/yeso
 - b. Determinación del tiempo de fraguado
3. Caracterización en estado endurecido, a través de los siguientes ensayos:
 - a. Microscopía electrónica de barrido
 - b. Densidad
 - c. Dureza superficial Shore C
 - d. Resistencia mecánica a flexión
 - e. Resistencia mecánica a compresión
 - f. Adherencia superficial
 - g. Absorción de agua por capilaridad
 - h. Durabilidad
 - i. Coeficiente de conductividad térmico
 - j. Coeficiente de absorción acústica
4. Propuesta de aplicaciones

7.1 FASE 1: ENSAYOS PREVIOS

Durante esta primera fase se han realizado numerosos estudios previos de incorporación de residuo de poliestireno extruido en una matriz de yeso. Estos estudios han servido para conocer el material y poder establecer mejor las series de probetas que se analizarán en las fases de caracterización. Además, en esta fase se realizó un estudio complementario de refuerzo de los compuestos, ya que se comprobó que la adición de este residuo, como ocurre en general con todos los agregados ligeros, conlleva una pérdida de resistencia. Este estudio complementario se incluye en el anexo 3, ya que no se ha considerado relevante para ser incluido en el plan experimental, al no quererse incorporar nuevas materias primas que no sean residuos al compuesto.

Por otra parte, esta primera fase tiene como objetivo también el elaborar las probetas de referencia y establecer el porcentaje adecuado de agregado a incorporar en la mezcla.

7.1.1 Probetas de referencia

Se elabora una serie de tres probetas de referencia que no incorporan ningún aditivo para utilizarlas como referencia (figura 7-1). Sobre esta serie de probetas se van a realizar los mismos ensayos que sobre el resto de series que se elaboren para caracterizar los compuestos de yeso con residuo

de poliestireno extruido tanto en estado húmedo como en estado endurecido. Los resultados de las probetas de referencia se mostrarán junto con el resto de series en cada ensayo.

Figura 7-1 Sección de probeta de referencia 100Y+80A

7.1.2 Porcentaje adecuado de agregado

Para determinar el porcentaje de agregado adecuado se han realizado compuestos de yeso con cada una de las granulometrías obtenidas en el capítulo anterior desde un 1% de sustitución hasta la máxima cantidad de residuo que soporta la mezcla en función del criterio medio ambiental de máxima incorporación de residuo. La máxima cantidad es aquella en la que se consigue realizar una mezcla homogénea del yeso, el agua y el residuo en dos minutos de amasado (véase figura 7-2).

Figura 7-2 Mezcla del compuesto de yeso con 4% de residuo de XPSm

A partir de este estudio se observó que para las granulometrías media y gruesa el límite de adición es de 4% y para la granulometría fina es de 5%. Esto se debe a que el volumen de residuo medio y grueso es muy alto debido a su baja densidad y por tanto incluso un bajo porcentaje de residuo

conlleva un elevado volumen que es difícil de mezclar con el yeso y el agua. En el caso del residuo fino, su volumen es mucho menor y por ello se llega a un porcentaje más elevado.

En las siguientes figuras se pueden ver las secciones de las diferentes probetas realizadas para cada granulometría y para los diferentes porcentajes. En general, se puede observar que la distribución del residuo es homogénea cuando se utiliza residuo fino, pero que a medida que el tamaño del residuo aumenta y para los porcentajes más bajos el residuo flota y se sitúa en la parte de arriba de la probeta, esto se puede observar especialmente en las probetas con residuo grueso.

Figura 7-3 Sección compuesto de referencia

Figura 7-4 Transición de incorporación de residuo de XPS de granulometría fina, desde 1 a 5%

Figura 7-5 Transición de incorporación de residuo de XPS de granulometría media, desde 1 a 4%

Figura 7-6 Transición de incorporación de residuo de XPS de granulometría gruesa, desde 1 a 4%

Con los porcentajes obtenidos se han elaborado nuevas series de probetas para cada una de las granulometrías y también para la mezcla de granulometrías al 50% y al 75-25% (véase tabla 7-1) y se ha analizado su densidad de acuerdo con el ensayo que aparece en el apartado 5.2.4.3. Aquellos compuestos con una densidad superior a 1 g/cm^3 se descartan para la fase de caracterización.

100%	75-25%	50%
100%XPSf	75%XPSf+25%XPSm	50%XPSm+50%XPSf
100%XPSm	75%XPSf+25%XPSg	50%XPSg+50%XPSf
100%XPSg	75%XPSm+25%XPSf	
	75%XPSg+25%XPSf	

Tabla 7-1 Series de compuestos

En la figura 7-7 se muestran los resultados de densidad para cada uno de los compuestos analizados y se pueden observar principalmente dos hechos: uno que los compuestos que tienen un mayor porcentaje de residuo fino tienen una densidad superior a 1 g/cm^3 , por lo cual no pueden considerarse yesos aligerados, y dos que con un 1% de residuo tampoco se consigue una densidad menor de 1 g/cm^3 .

Figura 7-7 Densidad de los compuestos de yeso con residuo de XPS

Por todo ello se decide descartar los compuestos 100%XPSf, 75%XPSf+25%XPSm y 75%XPSf+25%XPSg y se trabajará con los porcentajes 2, 3 y 4% en las fases 2 y 3 de caracterización de los compuestos. Las series de compuestos seleccionados se muestran en la siguiente tabla:

Serie	Porcentaje	Compuesto
Serie 1	100%	2%XPSm
		3%XPSm
		4%XPSm
Serie 2	75-25%	1,5%XPSm+0,5%XPSf
		2,25%XPSm+0,75%XPSf
		3%XPSm+1%XPSf
Serie 3	50-50%	1%XPSm+1%XPSf
		1,5%XPSm+1,5%XPSf
		2%XPSm+2%XPSf
Serie 4	100%	2%XPSg
		3%XPSg
		4%XPSg
Serie 5	75-25%	1,5%XPSg+0,5%XPSf
		2,25%XPSg+0,75%XPSf
		3%XPSg+1%XPSf
Serie 6	50-50%	1%XPSg+1%XPSf
		1,5%XPSg+1,5%XPSf
		2%XPSg+2%XPSf

Tabla 7-2 Series de compuestos

7.2 FASE 2: CARACTERIZACIÓN EN ESTADO FRESCO DE LOS COMPUESTOS

Esta fase tiene como objetivo caracterizar los compuestos seleccionados en el apartado 7.1 en su estado fresco. En total se han seleccionado seis series de compuestos más una séptima serie que es la de referencia y que servirá para comparar todos los resultados, tal cual se indica en la tabla 7-3. Para todas las series se van a realizar compuestos para los porcentajes del 2, 3 y 4%, ya que se ha observado en la fase 1 de ensayos previos, que con un 1% no se consigue aligerar los compuestos de yeso de forma representativa y que más de un 4% de residuo satura el compuesto de yeso debido al elevado volumen de material que supone incluso un porcentaje tan bajo.

Serie	TAMAÑO RESIDUO
1	Referencia
2	100%XPSm
3	75%XPSm+25%XPSf
4	50%XPSm+50%XPSf
5	100%XPSg
6	75%XPSg+25%XPSf
7	50%XPSg+50%XPSf

Tabla 7-3 Series de compuestos seleccionados

Sobre estas series de compuestos se van a realizar los ensayos necesarios para determinar la relación agua/yeso y el tiempo de fraguado.

7.2.1 Determinación de la relación agua/yeso

La relación agua/yeso se obtiene mediante el método de la mesa de sacudidas como se muestra en la figura 7-8 y según lo descrito en el apartado 5.2.4.1. Esta relación determina la cantidad de agua necesaria para obtener una buena consistencia de la pasta. Del proceso del ensayo cabe destacar que el material parece absorber muy poca agua y por ello se mezcla bastante bien, aunque durante el amasado se observa que a mayor tamaño de residuo más cuesta obtener una mezcla homogénea.

Figura 7-8 Medida diámetro en mesa de sacudidas compuesto de yeso con serie 5 al 3%

En la figura 7-9 pueden verse las relaciones agua/yeso de cada una de las series de compuestos seleccionados frente al compuesto de referencia (los resultados completos del ensayo pueden verse en el anexo 4). En este gráfico se puede observar que la adición progresiva de mayores porcentajes de residuo de poliestireno extruido, sobre todo a partir del 2%, requiere cantidades de agua superiores para asegurar la misma consistencia.

Figura 7-9 Relación agua/yeso de los compuestos de yeso con residuo de XPS

Así mismo, también parece observarse que los compuestos con residuo de mayor tamaño requieren también de mayor cantidad de agua, aunque la diferencia es apenas representativa.

7.2.2 Determinación del tiempo de fraguado

El tiempo de fraguado se determina mediante el método del cono de Vicat como se muestra en la figura 7-10 y de acuerdo con lo descrito en el apartado 5.2.4.2. Como ocurre con el ensayo de relación agua/yeso, en este caso también se ha observado que cuanto mayor es la cantidad de residuo incorporado más cuesta realizar la mezcla debido al elevado volumen de residuo (véase figura 7-11).

Figura 7-10 Ensayo tiempo de fraguado método del cono de Vicat para el compuesto de referencia

Figura 7-11 Amasado de agua y yeso con un 2% de residuo de XPS (izda.) y 4% (derecha)

En la figura 7-12 puede verse el tiempo de fraguado de cada una de las series de compuestos seleccionados frente al compuesto de referencia (los resultados completos del ensayo pueden verse en el anexo 4). Cabe destacar la diferencia que existe entre el compuesto de referencia y el resto de compuestos que incorporan el residuo, llegando hasta una diferencia de 2 minutos. En cuanto a los compuestos con residuo se observa que aunque disminuye ligeramente el tiempo de fraguado al aumentar la cantidad de residuo incorporado, no llega a los 30 segundos la mayor diferencia, por tanto la diferencia es poco representativa.

De acuerdo con la norma UNE-EN 13279-1:2009 el tiempo de fraguado de un yeso de construcción debe ser superior a 20 minutos en aplicaciones manuales y superior a 50 minutos para aplicaciones

mecánicas (AENOR, 2009). Sin embargo, el yeso utilizado como matriz es un yeso rápido y por ello estos valores no son aplicables, ya que el fabricante especifica que este yeso es para una aplicación excepcionalmente rápida y sencilla.

Figura 7-12 Tiempo de fraguado de los compuestos de yeso con residuo de XPS

7.3 FASE 3: CARACTERIZACIÓN EN ESTADO ENDURECIDO DE LOS COMPUESTOS

Esta fase tiene como objetivo caracterizar las series de compuestos seleccionados en el apartado 7.1 en su estado endurecido. Sobre estas series de compuestos se van a llevar a cabo los ensayos necesarios para analizar su comportamiento físico, mecánico, térmico y acústico a través de los siguientes ensayos:

- Microscopía electrónica de barrido
- Densidad
- Dureza superficial Shore C
- Resistencia mecánica a flexión
- Resistencia mecánica a compresión
- Adherencia superficial
- Absorción de agua por capilaridad
- Durabilidad
- Coeficiente de conductividad térmico
- Coeficiente de absorción acústica

7.3.1 Microscopía electrónica de barrido

El objetivo de este ensayo es analizar la superficie de los compuestos según lo descrito en el apartado 5.1.4.3. para observar el comportamiento del agregado ligero con la matriz de yeso. Para ello se han tomado como muestras secciones de probetas que incorporan un 2% de cada una de las granulometrías analizadas (XPSg, XPSm y XPSf) y se han visionado en el microscopio. El resultado se ha comparado con una muestra del yeso de referencia que no incorpora ningún tipo de aditivo. Para este ensayo, el de densidad, el de dureza superficial, el de resistencia a flexión y el de resistencia a compresión se han elaborado probetas tipo 1 (40 mm x 40 mm x 160mm).

Como puede verse en la figura 7-13, en la muestra de referencia sin agregados se puede observar claramente una estructura en red de agujas de forma cúbica que se repite a lo largo de toda la sección.

Figura 7-13 Microscopía a 500x (izquierda) y 2000x (derecha) del compuesto de yeso de referencia

En el resto de muestras, que pueden observarse en las siguientes figuras, se observa de nuevo la red de agujas de forma cúbica alrededor de un elemento de mayor tamaño, que es el residuo. Esto confirma que la cohesión en la interfase entre el yeso y el residuo, para cada uno de los tamaños del mismo, es adecuada, ya que parte de la matriz de yeso se adhiere a las paredes del residuo confirmando que existe cierto nivel de adherencia entre ambos materiales. Esto puede explicarse por el comportamiento macroscópico expansivo que da lugar a las agujas durante la fase de hidratación del yeso (Gutiérrez González, et al., 2012). Durante esta fase de hidratación el residuo de poliestireno extruido absorbe esta expansividad y acomoda los productos de hidratación proporcionando un producto final cohesionado.

Figura 7-14 Microscopía a 500x de muestra de yeso con residuo XPSg

Figura 7-15 Microscopía a 500x de muestra de yeso con residuo XPSm

Figura 7-16 Microscopía a 500x de muestra de yeso con residuo XPSf

7.3.2 Densidad

Para este ensayo se ha realizado una serie de tres probetas para cada uno de los compuestos según lo descrito en el apartado 5.2.4.3. con el objetivo de obtener la densidad a través del peso y el volumen de cada probeta. Los resultados se muestran en la figura 7-17, donde se puede observar que todos los compuestos tienen una densidad mucho menor que la referencia, por debajo del valor límite a partir del cual se puede considerar que es un yeso aligerado (los resultados completos del ensayo pueden verse en el anexo 4). Por otra parte en la tabla 7-4 se muestran los P-valores obtenidos del análisis estadístico de la muestra para cada uno de los factores analizados y en la figura 7-18 se observa que la muestra cumple con el supuesto de normalidad (los resultados completos del estudio estadístico pueden verse en el anexo 5).

Figura 7-17 Densidad de los compuestos de yeso con residuo de XPS

Fuente	Valor-P
EFECTOS PRINCIPALES	
A:Porcentaje	0,0001
B:Mezcla	0,0095
C:Granulometria	1,0000
INTERACCIONES	
AB	0,1649
AC	0,8920
BC	0,1493

Tabla 7-4 P-valores del análisis estadístico de la muestra para la variable dependiente densidad

Figura 7-18 Gráfico de probabilidad normal para los residuos estadísticos de la variable densidad

Del análisis de los resultados se ha observado que la densidad es menor cuanto mayor es el porcentaje de residuo incorporado, lo que se ha verificado mediante un análisis de la varianza con un P-valor de 0,0001 al 95% de confianza. En cuanto a la mezcla de granulometrías, parece que los compuestos al 50% funcionan peor que el resto de configuraciones a la hora de reducir la densidad. Mientras que el compuesto al 75% parece ser el que mejor resultados obtiene en general tanto para el residuo XPSg como para el residuo XPSm. Del análisis de la varianza de este factor se ha confirmado que existe evidencia de que la mezcla de granulometrías afecta de forma estadísticamente significativa a la densidad con un P-valor de 0,0095 al 95% de confianza. Sin embargo, la diferencia entre el residuo grueso y el medio no parece ser representativa, habiendo únicamente una diferencia del 2% en el mejor de los casos, lo que se ha confirmado mediante análisis de la varianza con un P-valor de 1,0000 al 95% de confianza.

7.3.3 Dureza superficial Shore C

El objetivo de este ensayo es determinar la dureza superficial de los compuestos de yeso con residuo de poliestireno extruido mediante el procedimiento descrito en el apartado 5.2.4.4. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 7-19. Por otra parte en la tabla 7-5 se muestran los P-valores obtenidos del análisis estadístico de la muestra para cada uno de los factores analizados y en la figura 7-20 se observa que la muestra cumple con el supuesto de normalidad (los resultados completos del estudio estadístico pueden verse en el anexo 5).

Figura 7-19 Dureza superficial Shore C de los compuestos de yeso con residuo de XPS

Fuente	Valor-P
EFECTOS PRINCIPALES	
A:Porcentaje	0,0000
B:Mezcla	0,0029
C:Granulometria	0,2647
INTERACCIONES	
AB	0,0160
AC	0,0732
BC	0,0178

Tabla 7-5 P-valores del análisis estadístico de la muestra para la variable dependiente dureza superficial

Se puede observar claramente que a mayor porcentaje de residuo menor es la dureza superficial Shore C, lo que se ha confirmado mediante análisis de la varianza con un P-valor de 0,0000 al 95%. Esto probablemente se debe a la presencia de residuo de forma superficial, que además de fomentar la aparición de coqueras, debilita el recubrimiento superficial al ser más fino donde existen partículas del residuo (véase figura 7-21).

En cuanto a granulometría, parece que se obtienen mejores resultados cuando se usa un 100% de la misma granulometría. De hecho, existe evidencia de que la mezcla de granulometrías afecta de forma estadísticamente significativa a la dureza superficial, ya que su P-valor (0,0029) es menor que 0,05 con una confianza del 95%. Sin embargo, no existe evidencia de que los distintos tamaños

Figura 7-20 Gráfico de probabilidad normal para los residuos estadísticos de la variable dureza sup.

Figura 7-21 Superficie de probeta con residuo de poliestireno extruido

Por otra parte, de acuerdo con el reglamento particular 35.01 de la marca AENOR para yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción, la dureza superficial mínima que deben cumplir los compuestos de yeso es de 65 unidades Shore C (AENOR, 2009), mientras que para yesos de construcción aligerados el reglamento particular 35.03 indica que el mínimo debe ser de 45 unidades Shore C (AENOR, 2009). En este caso ninguno de los compuestos cumpliría el requerimiento mínimo para yesos de construcción, pero sí cumplirían el requerimiento para yesos aligerados los compuestos con hasta un 3% del residuo. Los resultados completos del ensayo pueden verse en el anexo 4.

7.3.4 Resistencia mecánica a flexión

El comportamiento mecánico de los yesos de construcción es una parte fundamental a tener en cuenta en los materiales de construcción. El ensayo de resistencia mecánica a flexión tiene como objetivo determinar la carga necesaria para romper probetas prismáticas apoyadas sobre rodillos separados 100 mm entre sí, tal y como se detalla en mayor detalle en el apartado 5.2.4.5.

En la figura 7-22 se representan los resultados obtenidos de resistencia a flexión para los compuestos analizados. Por otra parte en la tabla 7-6 se muestran los P-valores obtenidos del análisis estadístico de la muestra para cada uno de los factores analizados y en la figura 7-23 se observa que la muestra cumple con el supuesto de normalidad (los resultados completos del estudio estadístico pueden verse en el anexo 5).

Figura 7-22 Resistencia mecánica a flexión de los compuestos de yeso con residuo de XPS

Fuente	Valor-P
EFECTOS PRINCIPALES	
A:Porcentaje	0,0006
B:Mezcla	0,0674
C:Granulometria	0,5074
INTERACCIONES	
AB	0,1896
AC	0,2109
BC	0,9768

Tabla 7-6 P-valores del análisis estadístico de la muestra para la variable dependiente r. flexión

Figura 7-23 Gráfico de probabilidad normal para los residuos estadísticos de la variable r. flexión

Se puede observar cómo, al igual que ocurre con la dureza superficial, cuanto mayor es el porcentaje de residuo incorporado, menor es la resistencia a flexión del compuesto y esta diferencia es mucho mayor al incrementar de 2 a 3 el porcentaje de residuo incorporado. De hecho, esta relación se ha confirmado mediante análisis de la varianza con un P-valor de 0,0006 al 95%. En cuanto a la granulometría del residuo, se observa que el compuesto al 50% de XPSm con XPSf obtiene una resistencia muy elevada en comparación con otros compuestos incluso con menor porcentaje de residuo. Sin embargo, no existe evidencia de que la granulometría o la mezcla de granulometrías afecten de forma estadísticamente significativa a la resistencia a flexión, ya que su P-valor (0,0674 y 0,5074) es mayor que 0,05, con una confianza del 95%. Los resultados completos del ensayo pueden verse en el anexo 4.

Por otra parte, de acuerdo con la norma UNE-EN 13279-1:2009 la resistencia a flexión de un yeso de construcción debe ser superior a 1 N/mm², lo cual se cumple en todos los casos (AENOR, 2009).

Por último, en la figura 7-24 se han representado en un mismo gráfico los resultados para la densidad y para la resistencia a flexión para confirmar la relación que existe en los materiales compuestos entre estos dos parámetros (Laukaitis, et al., 2005). Como se puede ver en este gráfico, los valores de densidad y resistencia para cada compuesto siguen una misma línea de tendencia, a menor densidad menor resistencia a flexión.

Figura 7-24 Relación entre la densidad y la resistencia a flexión de los compuestos seleccionados

7.3.5 Resistencia mecánica a compresión

El ensayo de resistencia a compresión se realiza sobre las mitades procedentes de las probetas ensayadas a flexión, tal como se detalla en el apartado 5.2.4.6.

En la figura 7-25 se representan los resultados obtenidos de resistencia a compresión para los compuestos analizados. Por otra parte en la tabla 7-7 se muestran los P-valores obtenidos del análisis estadístico de la muestra para cada uno de los factores analizados y en la figura 7-26 se observa que la muestra cumple con el supuesto de normalidad (los resultados completos del estudio estadístico pueden verse en el anexo 5).

Figura 7-25 Resistencia mecánica a compresión de los compuestos de yeso con residuo de XPS

Fuente	Valor-P
EFECTOS PRINCIPALES	
A:Porcentaje	0,0003
B:Mezcla	0,5309
C:Granulometria	0,1012
INTERACCIONES	
AB	0,0643
AC	0,8702
BC	0,8140

Tabla 7-7 P-valores del análisis estadístico de la muestra para la variable dependiente r. compresión

Figura 7-26 Gráfico de probabilidad normal para los residuos estadísticos de la variable r. compresión

Se puede observar cómo, al igual que ocurre con la dureza superficial y la resistencia a flexión, cuanto mayor es el porcentaje de residuo incorporado, menor es la resistencia a compresión del compuesto y esta diferencia es mucho mayor al incrementar de 2 a 3 el porcentaje de residuo incorporado. De hecho, esta relación se ha confirmado mediante análisis de la varianza con un P-valor de 0,0003 al 95%. Esto puede ser debido a que cuanto más residuo se incorpora menor es el porcentaje de yeso en la matriz de yeso que da la resistencia al compuesto. En cuanto a la granulometría del residuo, se obtienen mejores resultados para las combinaciones al 75 y al 50% y en general funcionan mejor los compuestos con granulometría media que los de granulometría gruesa. Sin embargo, no existe evidencia de que la granulometría o la mezcla de granulometrías afecten de forma estadísticamente significativa a la resistencia a compresión, ya que su P-valor (0,5309 y 0,1012) es mayor que 0,05 con una confianza del 95%. Los resultados completos del ensayo pueden verse en el anexo 4.

Por otra parte, de acuerdo con la norma UNE-EN 13279-1:2009 la resistencia a compresión de un yeso de construcción debe ser superior a 2 N/mm², lo cual se cumple en todos los casos en los que se incorpora un 2 o un 3% de residuo y solo se cumple en un compuesto que incorpora un 4% de residuo, que es el compuesto con un 100% de XPSm (AENOR, 2009).

Por último, en la figura 7-27 se han representado en un mismo gráfico los resultados para la densidad y para la resistencia a compresión y de nuevo, al igual que ocurre con la resistencia a flexión, se confirma la relación que existe en los materiales compuestos entre los parámetros de densidad y resistencia.

Figura 7-27 Relación entre la densidad y la resistencia a compresión de los compuestos seleccionados

7.3.6 Adherencia superficial

Uno de los parámetros más significativos a tener en cuenta en un compuesto de yeso es la adherencia, ya que una de las aplicaciones del yeso más utilizadas es la de revestimiento, en la que la adherencia es un factor de gran importancia. La adherencia superficial se determina según lo descrito en el apartado 5.2.4.7. al establecer la máxima carga que soporta un disco de metal pegado al yeso al ser arrancado de forma perpendicular a su superficie.

En la figura 7-28 se muestran los resultados de adherencia superficial para los compuestos analizados. Por otra parte en la tabla 7-8 se muestran los P-valores obtenidos del análisis estadístico

de la muestra para cada uno de los factores analizados y en la figura 7-29 se observa que la muestra cumple con el supuesto de normalidad (los resultados completos del estudio estadístico pueden verse en el anexo 5).

Figura 7-28 Adherencia superficial de los compuestos de yeso con residuo de XPS

Fuente	Valor-P
EFECTOS PRINCIPALES	
A:Porcentaje	0,0000
B:Mezcla	0,0238
C:Granulometria	0,0015
INTERACCIONES	
AB	0,3164
AC	0,5378
BC	0,8403

Tabla 7-8 P-valores del análisis estadístico de la muestra para la variable dependiente adherencia superficial

Figura 7-29 Gráfico de probabilidad normal para los residuos estadísticos de la variable adherencia sup.

Se puede ver cómo la adherencia superficial disminuye a mayor cantidad de residuo incorporado, lo que se confirma mediante análisis de la varianza con un P-valor de 0,0000 al 95%. Por otra parte, respecto a la granulometría se observa que se obtienen mejores resultados para el residuo de menor tamaño, lo que se confirma mediante análisis de la varianza con un P-valor de 0,0015 al 95% y con menor porcentaje de finos, lo que se confirma también con un P-valor de 0,0238 al 95% de confianza. Los resultados completos del ensayo pueden verse en el anexo 4.

Por otra parte, de acuerdo con la norma UNE-EN 13279-1:2009 la adherencia superficial de un yeso de construcción debe ser superior a $0,1 \text{ N/mm}^2$, lo cual se cumple en todos los casos (AENOR, 2009).

En las siguientes figuras se observan los diferentes tipos de rotura obtenidos del ensayo de cada una de las granulometrías y de la referencia. En estas figuras se observa que tanto la referencia como los compuestos que incorporan residuo fino o medio tienen una rotura tipo a (rotura por adhesión). Sin embargo, para los compuestos con residuo grueso, se obtiene una rotura tipo b (rotura por cohesión), lo que indica que el valor de resistencia de adherencia es superior al valor obtenido en el ensayo. En ningún caso se han obtenido roturas no válidas.

Figura 7-30 Muestra ensayo adherencia compuesto de referencia

Figura 7-31 Muestra ensayo adherencia compuesto XPSg

Figura 7-32 Muestra ensayo adherencia compuesto XPSm

Figura 7-33 Muestra ensayo adherencia compuesto XPSf

7.3.7 Absorción de agua por capilaridad

La absorción de agua por capilaridad se ha determinado según lo descrito en el apartado 5.2.4.8. Los resultados se muestran en la figura 7-34. Por otra parte en la tabla 7-9 se muestran los P-valores obtenidos del análisis estadístico de la muestra para cada uno de los factores analizados y en la figura 7-35 se observa que la muestra cumple con el supuesto de normalidad (los resultados completos del estudio estadístico pueden verse en el anexo 5).

En función de estos resultados se observa cómo a mayor cantidad de residuo incorporado a la mezcla, menor es la absorción por capilaridad lo que se confirma mediante análisis de la varianza con un P-valor de 0,0000 al 95%. Este efecto se puede deber a que el poliestireno extruido del cual se ha obtenido el residuo que se ha utilizado para hacer los compuestos tiene una elevada resistencia al agua, llegando a reducirse hasta casi un 60% la altura de absorción de agua en el caso en el que se incorpora mayor porcentaje de residuo. Por otra parte, respecto a la granulometría se observa que se obtienen mejores resultados para el residuo de mayor tamaño, lo que se confirma mediante análisis de la varianza con un P-valor de 0,0000 al 95% y con menor porcentaje de finos, lo que se confirma también con un P-valor de 0,0074 al 95% de confianza. Los resultados completos del ensayo pueden verse en el anexo 4.

Figura 7-34 Absorción de agua por capilaridad de los compuestos de yeso con residuo de XPS

Fuente	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES	
A:Porcentaje	0,0000
B:Mezcla	0,0000
C:Granulometria	0,0074
INTERACCIONES	
AB	0,0029
AC	0,0420
BC	0,0228

Tabla 7-9 P-valores del análisis estadístico de la muestra para la variable dependiente absorción de agua por capilaridad

Figura 7-35 Gráfico de probabilidad normal para los residuos estadísticos de la variable absorción de agua por capilaridad

7.3.8 Durabilidad

El ensayo de durabilidad se ha llevado a cabo de acuerdo con lo descrito en el apartado 5.2.4.9 y únicamente para compuestos con residuo grueso en los porcentajes del 2 al 4%, para comprobar cómo le afecta el residuo a la matriz de yeso frente a ciclos de desecado y saturado continuos.

Los resultados de la prueba de durabilidad se muestran en la figura 7-36. En general, se observa que tanto el compuesto de yeso de referencia como los compuestos aligerados no superan más de dos ciclos de desecado-saturado y además parece que la presencia de residuo perjudica al aguante de la probeta ante estos cambios. De hecho, la probeta que más residuo contiene no llega a comenzar el tercer ciclo. Esto se puede explicar porque aunque la solubilidad del yeso en agua no es muy elevada, el agua libre es absorbida por el yeso actuando como lubricante entre su estructura cristalina, deshaciendo la trabazón formada por la red de cristales del yeso deteriorándolo. Además, esta absorción de agua depende de la porosidad del yeso y por tanto de su densidad, por lo que es lógico que los compuestos aligerados tengan un peor comportamiento ante estos ciclos (Villanueva Domínguez, 1975).

Finalmente, tras los dos ciclos de desecado-saturado las muestras presentan oquedades superficiales y se pueden romper fácilmente con la mano (véase figura 7-37). Los resultados completos del ensayo pueden verse en el anexo 4.

Figura 7-36 Resultados durabilidad compuestos con residuo de poliestireno extruido

Figura 7-37 Probeta de referencia sometida a dos ciclos de desecado-saturado

7.3.9 Coeficiente de conductividad térmico “Heat insulation house”

El objetivo de este ensayo es determinar el coeficiente de conductividad térmico de los diferentes compuestos, para ello se va a utilizar como probeta modelo una probeta de poliestireno expandido de dimensiones (300x300x20) mm y coeficiente de conductividad térmico 0,03 W/mK. El coeficiente de conductividad térmico es una propiedad física de los materiales que mide la capacidad de conducción de calor. En este parámetro es interesante el residuo de poliestireno extruido porque proviene de un material aislante, es decir, que tiene un coeficiente de conductividad muy bajo que se encuentra entre 0.029 y 0.036 W/mK. La presencia de un material aislante en la matriz de yeso conduce a pensar en una mejora del comportamiento térmico general del material (Ramazan Demirboga, 2012).

La figura 7-38 muestra los resultados de coeficiente de conductividad térmico para todos los compuestos analizados. Por otra parte en la tabla 7-10 se muestran los P-valores obtenidos del análisis estadístico de la muestra para cada uno de los factores analizados y en la figura 7-39 se observa que la muestra cumple con el supuesto de normalidad (los resultados completos del estudio estadístico pueden verse en el anexo 5).

Figura 7-38 Coeficiente de conductividad térmico de los compuestos de yeso con residuo de XPS

Fuente	Valor-P
EFECTOS PRINCIPALES	
A:Porcentaje	0,0027
B:Mezcla	0,0284
C:Granulometria	0,0213
INTERACCIONES	
AB	0,5000
AC	0,2500
BC	0,3044

Tabla 7-10 P-valores del análisis estadístico de la muestra para la variable dependiente coeficiente de conductividad térmico

Figura 7-39 Gráfico de probabilidad normal para los residuos estadísticos de la variable coef. conductividad térmico

Lo primero que se puede observar en el gráfico de resultados es que se obtiene un coeficiente de conductividad térmico de 0,128 para la referencia, cuando el yeso según diferentes manuales tiene un coeficiente entre 0,3 y 0,4 dependiendo de la densidad del material (véase tabla 1-9 en el capítulo 1). Por ello, únicamente se van a tener en cuenta los valores obtenidos para evaluar las diferencias existentes entre los distintos compuestos.

En este sentido se observa que se reduce el coeficiente con la incorporación progresiva de residuo de poliestireno extruido, lo que se confirma mediante análisis de la varianza con un P-valor de 0,0027 al 95%. Que en el peor de los casos se consigue mejorar el comportamiento térmico del yeso en un 23% y en el mejor en un 31% con respecto a la referencia. En cuanto a las granulometrías, se observa que con un 100% de residuo grueso se obtienen los mejores resultados y de hecho existe evidencia de que tanto la granulometría como las mezclas de las granulometrías afectan de forma estadísticamente significativa al coeficiente de conductividad térmico, ya que sus P-valores (0,0284 y 0,0213, respectivamente) son menores que 0,05. Los resultados completos del ensayo pueden verse en el anexo 4.

7.3.10 Coeficiente de conductividad térmico *C-Therm TCi*

Mediante este ensayo se han determinado los coeficientes de conductividad y el calor específico del compuesto de referencia, el compuesto con un 3% de XPSm y el compuesto con un 4% de XPSm (véase figura 7-40).

Figura 7-40 Ensayo de comportamiento térmico en equipo *C-Therm TCi*

Para la realización del ensayo ha sido necesario repetir algunas medidas, ya que la rugosidad de las caras de las probetas impide un contacto total con el sensor. Esto se puede comprobar, primero porque las medidas de coeficiente de conductividad salen muy bajas, lo que quiere decir que el sensor está tomando la medida en el aire, y segundo porque en la probeta queda la marca del contacto con el sensor y se ve en la forma de la mancha del agente de contacto que el contacto no es total (véase figura 7-41).

En la tabla 7-11 se muestran los resultados y se puede observar que al incorporar un 3% de residuo se reduce el coeficiente de conductividad térmico en un 35% y al incorporar un 4% se reduce en un 43%. Por otra parte, en comparación con el ensayo con el "Heat insulation house", se observa que

los valores obtenidos con el *C-Therm TCi* se asemejan más a la realidad, ya que por ejemplo, el yeso para la densidad que tiene el compuesto de referencia debería tener un coeficiente de conductividad de 0,43 W/mK (véase tabla 1-9). Sin embargo, con el “Heat insulation house” se obtiene un coeficiente de conductividad térmica de 0,128 W/mK, mientras que con el *C-Therm TCi* el coeficiente es de 0,365 W/mK, mucho más próximo al valor teórico. Los resultados completos del ensayo pueden verse en el anexo 4.

Figura 7-41 Contacto entre sensor y probeta

Aplicación	C. conductividad térmica (W/mK)	Efusividad térmica (W√s/m ² K)	Calor específico (J/kgK)
100Y+80A	0,365	725,04	1.209,79
100Y+80A+3XPSm	0,236	584,88	1.058,14
100Y+80A+4XPSm	0,207	552,41	1.238,32

Tabla 7-11 Comportamiento térmico de compuestos óptimos y referencia mediante *C-Therm TCi*

7.3.11 Coeficiente de absorción acústica

En general los materiales con buenas propiedades de aislamiento térmico incorporan en su estructura mucho aire, lo que hace que no puedan impedir el paso de energía acústica a través suya, es decir, no aíslan acústicamente. Sin embargo, si su estructura porosa es de celda abierta (fibras o espumas de celda abierta), si pueden tener buenas propiedades de absorción acústica, que es la capacidad de convertir en calor parte de la energía acústica que incide sobre ellos. En este sentido, el poliestireno extruido es un buen material aislante térmico y su estructura es de célula cerrada, por lo que acústicamente no debería ofrecer ninguna mejora a un compuesto de yeso. Por ello en este ensayo se han analizado únicamente los compuestos de la serie 4, que son los que incorporan residuo grueso de poliestireno extruido en los porcentajes del 2 al 4%.

Para determinar el coeficiente de absorción acústica se han utilizado probetas cilíndricas elaboradas con un molde tipo 3 de acero que permite elaborar tres probetas con un acabado superficial sin rugosidades y con las mínimas coqueras, como puede observarse en la figura 7-42.

Figura 7-42 Elaboración probetas acústicas

Los resultados de coeficiente de absorción acústica de los compuestos ensayos se muestran en la figura 7-43, donde se pueden observar los resultados para cada una de las frecuencias ensayadas de 100 a 5000 Hz en comparación con los resultados teóricos de un material aislante que aparece en el libro de instrucciones del tubo de Kundt. En este gráfico se puede observar que existe gran diferencia entre la absorción acústica que se consigue con el material aislante acústico y los resultados obtenidos con los compuestos seleccionados. No solo es mayor la absorción del material acústico, si no que su comportamiento es mejor cuanto mayor es la frecuencia hasta los 1600 Hz, mientras que en los compuestos seleccionados el valor de la absorción varía poco a lo largo de todas las frecuencias desde los 600 Hz.

Si se analizan únicamente los valores de absorción acústica obtenidos con los compuestos seleccionados, se puede observar que es mayor la absorción con los compuestos con mayor cantidad de residuo incorporado, aunque la diferencia es poco representativa, ya que todos los valores de coeficiente de absorción acústica están recogidos entre 0 y 0,1 (véase figura 7-44).

Figura 7-43 Coef. de absorción de los compuestos con residuo de XPS vs material aislante acústico

Figura 7-44 Coeficientes de absorción acústica de los compuestos con residuo de XPS

7.4 FASE 5: PROPUESTA DE APLICACIONES

Como los resultados no han destacado ninguna de las propiedades de los compuestos de yeso aligerados con residuo de poliestireno extruido y en general se cumplen los requerimientos exigidos por la normativa, se proponen las aplicaciones genéricas para los compuestos de yeso:

- Revestimiento de yeso de aplicación manual sobre soporte rígido.
- Placas de yeso machihembradas para aplicación en trasdosados y particiones de espesor entre 50 y 150 mm.
- Paneles de yeso para falso techo de espesor 15 mm sobre subestructura metálica.

7.5 CONCLUSIONES PARCIALES

En función de un criterio medio ambiental de máxima incorporación de residuo la máxima cantidad de residuo de poliestireno extruido que admite un compuesto de yeso es de 4%.

Para conseguir un compuesto aligerado es necesario utilizar una granulometría de grano medio o grueso en porcentajes desde el 2%, que puede incluir además un bajo porcentaje de finos.

Los compuestos de yeso aligerado con residuo de poliestireno extruido necesitan más agua de amasado para asegurar una consistencia óptima, a pesar de que el residuo parece no absorber agua. Además, tienen un tiempo de fraguado ligeramente menor que la referencia.

La cohesión en la interfase entre el yeso y el residuo de poliestireno extruido es adecuada y se ha confirmado una buena adherencia interna entre ambos, ya que parte de la matriz de yeso se adhiere a las paredes del residuo.

Con la incorporación de residuo se consigue reducir la densidad hasta en un 43%, lo que se puede explicar dada la baja densidad del residuo que se ha estimado mediante ensayos en $0,034 \text{ g/cm}^3$. Por otra parte, se ha confirmado que no parece haber diferencia significativa en los resultados entre la granulometría media o gruesa, pero sí existen diferencias en los resultados para las diferentes combinaciones con el residuo de granulometría fina.

En cuanto al comportamiento mecánico éste se ve claramente influenciado por la reducción de densidad, por lo que tanto la dureza superficial, como la resistencia mecánica a flexión y a compresión disminuyen a medida que se incorpora mayor porcentaje de residuo y se reduce la densidad. Además, para ninguno de estos parámetros existe evidencia de que la granulometría afecte de forma estadísticamente significativa a los resultados, siendo el porcentaje de residuo el factor más importante. Por otra parte, en cuanto los requerimientos mínimos exigidos por la norma, todos los compuestos cumplen el valor mínimo para la resistencia mecánica a flexión. Sin embargo, los compuestos que incorporan un 4% de residuo no cumplen el mínimo exigido para la resistencia mecánica a compresión y la dureza superficial.

La adherencia superficial se ve también claramente influenciada por la reducción de densidad, ya que disminuye a mayor cantidad de residuo incorporado. Por otra parte, además del porcentaje, tanto la granulometría del residuo como la mezcla de granulometrías con residuos finos afectan de forma significativa a los resultados.

La absorción de agua por capilaridad se reduce con la incorporación del residuo, consiguiendo mejorar este parámetro hasta en un 60% con los porcentajes más altos de residuo. Por otra parte, el residuo no parece aportar mayor durabilidad frente al agua al compuesto.

La adición de residuos de poliestireno extruido reduce el coeficiente de conductividad térmico de los compuestos de yeso, mejorando su comportamiento térmico hasta en un 43% con respecto a la referencia.

Por último, el residuo de poliestireno extruido no aporta una mejora en el coeficiente de absorción acústica de un compuesto de yeso.

En general se ha podido establecer que el factor que más influye en los parámetros de los compuestos de yeso con poliestireno extruido es el porcentaje de agregado, y solo en algunas propiedades afecta también la granulometría y la incorporación de finos a la mezcla.

7.6 TRABAJOS CITADOS

- AENOR, 2009. RP 35.01 Yesos para la construcción (B1) YG, YG/L, YPM. Madrid: s.n.
- AENOR, 2009. RP 35.03 Yesos de construcción aligerados (B4) YA, YPM/A. Madrid: s.n.
- AENOR, 2009. UNE-EN 13279-1:2009 Yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción. Parte 1: Definiciones y especificaciones. Madrid: s.n.
- Gutiérrez González, S., Calderón Carpintero, V. & Gadea Sáinz, J., 2012. Yesos aligerados fabricados a partir de residuos de espumas de poliuretano y polvo de poliamida (tesis doctoral). Burgos: Universidad de Burgos.
- Laukaitis, A., Zurauskas, R. & Keriene, J., 2005. The effect of foam polystyrene granules on cement composite properties. *Cement Concrete Comp*, Volume 27, p. 41–47.
- Ramazan Demirboga, A., 2012. Thermal conductivity and shrinkage properties of modified waste polystyrene aggregate concretes. *Construction and Building Materials*, pp. 730-734.

Villanueva Domínguez, L. d., 1975. Documentación técnica de las propiedades del yeso en la construcción. Madrid: Ministerio de la Vivienda.

CAPÍTULO 8. ANÁLISIS COMPARATIVO CON OTROS AGREGADOS LIGEROS

7.1 Búsqueda bibliográfica

7.2 Caracterización de compuestos de yeso con poliestireno expandido

7.3 Análisis comparativo de los resultados obtenidos

7.4 Conclusiones parciales

7.5 Trabajos citados

CAPÍTULO 8. ANÁLISIS COMPARATIVO CON OTROS AGREGADOS LIGEROS

En este capítulo se lleva a cabo un análisis comparativo de los resultados obtenidos al caracterizar los compuestos de yeso con residuo de poliestireno extruido frente a los resultados obtenidos con otro agregado ligero para dar respuesta al objetivo específico 3. Para ello se desarrolla inicialmente una búsqueda bibliográfica sobre compuestos de yeso aligerados, se selecciona un agregado ligero y se analizan los resultados de la caracterización de un compuesto de yeso con ese agregado.

Por último se hace un análisis comparativo entre los resultados obtenidos con este agregado ligero y los resultados obtenidos con el residuo de poliestireno extruido. Adicionalmente, se comparan los resultados también con los datos recogidos en la búsqueda bibliográfica sobre compuestos de yeso aligerados.

8.1 BÚSQUEDA BIBLIOGRÁFICA

Se ha realizado una profunda investigación sobre los trabajos que otros investigadores han realizado con compuestos de yeso aligerados con diferentes agregados ligeros. En la tabla 8-1 se recogen los estudios sobre los que se han encontrado suficientes datos. Como se puede observar se han encontrado 9 referencias de agregados ligeros que no son residuos y 6 referencias para residuos. De todos los resultados el residuo de poliestireno expandido es con el que mayor reducción de densidad se consigue, seguido por el residuo de poliamida y el residuo de caucho.

Se ha seleccionado el poliestireno expandido para compararlo con el residuo de poliestireno extruido porque además de que comercialmente es uno de los materiales más utilizados para aligerar materiales compuestos, su reducción de densidad es la mayor frente al resto de agregados de los que se han encontrado datos en la búsqueda bibliográfica.

Agregado ligero	Resultados	Densidad		Dureza superficial		Resistencia flexión		Resistencia compresión		C. térmica	
		g/cm ³	%Δ	Shore C	%Δ	N/mm ²	%Δ	N/mm ²	%Δ	W/mK	%Δ
Diatomita (Gencel, et al., 2016)	REF	1.00	-8%			0.80	0%	1.10	45%	0.494	-21%
	Aligerado	0.92				0.80		1.60		0.390	
Arena (<90 μm) (Khalil, et al., 2013)	REF	1.16	-13%					12.00	-25%		
	Aligerado	1.01						9.00			
Vermiculita (Del Río Merino, et al., 1998)	REF	0.95	-14%	68	-26%	3.23	-26%	5.68	-35%		
	Aligerado	0.82		50		2.40		3.70			
Humo de sílice (Khalil, et al., 2013)	REF	1.16	-14%					12.00	-42%		
	Aligerado	1.00						7.00			
Gel de sílice (Khalil, et al., 2013)	REF	1.16	-19%					12.00	-33%		
	Aligerado	0.94						8.00			
Arcilla expandida (Del Río Merino, et al., 1998)	REF	0.95	-20%			3.23	-46%				
	Aligerado	0.76				1.75					

Agregado ligero	Resultados	Densidad		Dureza superficial		Resistencia flexión		Resistencia compresión		C. térmica	
		g/cm ³	%Δ	Shore C	%Δ	N/mm ²	%Δ	N/mm ²	%Δ	W/mK	%Δ
Perlita (Del Río Merino, et al., 1998)	REF	0.95	-23%	68	4%	3.23	-38%	5.68	-14%		
	Aligerado	0.73		70		1.99		4.86			
Residuo de poliuretano (Gutiérrez-González, et al., 2012)	REF	1.71	-37%	93	-89%	5.92	-92%	15.49	-93%	0.306	-67%
	Aligerado	1.07		10		0.50		1.10		0.101	
EPS (García Santos, 2009)	REF	1.14	-40%			3.11	-45%	12.37	-77%		
	Aligerado	0.69				1.71		2.87			
Perlita (Vimmrová, et al., 2011)	REF	0.95	-42%			4.00	-64%	12.00	-83%	0.390	-69%
	Aligerado	0.55				1.44		2.00		0.120	
Residuo de corcho (Hernández-Olivares, et al., 1999)	REF	1.13	-43%			5.11	-57%	9.65	-76%		
	Aligerado	0.64				2.19		2.29			
Residuo de neumático (Herrero, et al., 2013)	REF	1.22	-46%	91	-85%	7.50	-90%	23.53	-98%	0.250	-29%
	Aligerado	0.65		14		0.78		0.55		0.178	
Residuo de poliamida (Gutiérrez-González, et al., 2012)	REF	1.48	-49%	93	-30%	5.92	-94%	15.49	-91%	0.306	-47%
	Aligerado	0.75		65		0.33		1.32		0.161	
Residuo de caucho (Jiménez Rivero, et al., 2014)	REF	1.09	-49%	89	-35%	5.97	-76%	13.36	-92%		
	Aligerado	0.56		58		1.42		1.04			
Residuo de EPS (González Madariaga, 2005)	REF	0.95	-57%			1.85	-95%	4.30	-84%		
	Aligerado	0.41				0.10		0.70			

Tabla 8-1 Resultados obtenidos en diferentes estudios de investigación sobre compuestos de yeso aligerados

8.2 CARACTERIZACIÓN DE COMPUESTOS DE YESO CON POLIESTIRENO EXPANDIDO

En este apartado se analizan las propiedades de los compuestos de yeso con poliestireno expandido. Para ello se han seguido las fases ya indicadas tanto en el plan experimental como en el capítulo 7 para los compuestos de yeso con residuo de poliestireno extruido.

1. Ensayos previos
 - a. Probetas de referencia
 - b. Porcentaje adecuado de agregado
2. Caracterización en estado fresco, a través de los siguientes ensayos:
 - a. Determinación de la relación agua/yeso
 - b. Determinación del tiempo de fraguado
3. Caracterización en estado endurecido, a través de los siguientes ensayos:
 - a. Microscopía electrónica de barrido
 - b. Densidad
 - c. Dureza superficial Shore C
 - d. Resistencia mecánica a flexión
 - e. Resistencia mecánica a compresión

- f. Adherencia superficial
 - g. Absorción de agua por capilaridad
 - h. Durabilidad
 - i. Coeficiente de conductividad térmico
 - j. Coeficiente de absorción acústica
4. Propuesta de aplicaciones

8.2.1 Fase 1: ensayos previos

Para esta primera fase no se ha necesitado realizar estudios previos, ya que se contaba con la experiencia de haber participado en una proyecto de investigación de la Escuela Técnica Superior de Edificación de Madrid, financiado por la empresa Farraús y denominado “Procesos para la reducción de la densidad del yeso y la mejora de sus prestaciones térmicas y acústicas con aplicación en la fabricación de prefabricados (P125405011)”.

Por otra parte, se ha elegido el formato de agregado con un diámetro de 4-6 mm (véase figura 8-1) en función de la información obtenida de otros estudios de investigación como el de Del Río Merino, ya que uno de los materiales que analiza en su Tesis doctoral para aligerar los compuestos de escayola son las perlas de poliestireno expandido con dimensiones desde 4 hasta 8 mm (Del Río Merino, 1999), o el de García Santos, que analiza la posibilidad de aligerar la escayola con perlas de poliestireno expandido enteras de diámetro 5 mm (García Santos, 2009). Ninguno de estos investigadores realiza tratamiento alguno sobre las perlas de poliestireno, ya que tienen unas dimensiones adecuadas para su utilización en materiales compuestos, por ello el formato del agregado se va a mantener.

Figura 8-1 Perlas de poliestireno expandido

Por otra parte, esta primera fase también tiene como objetivo el elaborar las probetas de referencia y establecer el porcentaje adecuado de agregado a incorporar en la mezcla.

8.2.1.1 Probetas de referencia

Se van a utilizar como probetas de referencia las analizadas en el capítulo 7 para los compuestos de yeso con residuo de poliestireno extruido. Los resultados obtenidos con estas probetas se utilizarán para comparar los resultados de cada ensayo realizado en las fases de caracterización.

8.2.1.2 Porcentaje adecuado de agregado

El porcentaje adecuado de agregado se ha seleccionado en función de dos factores, el primero basado en los porcentajes utilizados por otros autores en su investigación sobre la reducción de la densidad de los compuestos de yeso con poliestireno expandido. En este sentido, los datos que se han encontrado reflejan el uso de bajos porcentajes de este agregado. Como por ejemplo el estudio realizado por García Santos, que utiliza un porcentaje entre 0 y 2% (García Santos, 2009), el de Del Río Merino que utiliza un porcentaje del 3% (Del Río Merino, 1999) o el de González Madariaga que utiliza los porcentajes 1,6; 2 y 3%, aunque en lugar de perlas utiliza residuo de poliestireno expandido de dimensiones entre 3 y 5 mm (González Madariaga & Lloveras Macia, 2008). El segundo factor para determinar el porcentaje de agregado ligero adecuado ha sido realizar compuestos de yeso con las perlas de poliestireno expandido desde un 1% de sustitución hasta la máxima cantidad de agregado. La máxima cantidad es aquella en la que se consigue realizar una mezcla homogénea del yeso, el agua y el agregado en dos minutos de amasado (véase figura 8-2).

A partir de este estudio se observó que para este tipo de agregado con esta granulometría el porcentaje máximo admitido es 3%. Que el porcentaje sea tan bajo se debe a que el volumen del agregado es muy alto debido a su baja densidad y por tanto incluso un bajo porcentaje de poliestireno expandido conlleva un elevado volumen que es difícil de mezclar con el yeso y el agua.

Figura 8-2 Mezcla del compuesto de yeso con poliestireno expandido

En las siguientes figuras se pueden ver las secciones de las diferentes probetas realizadas para los diferentes porcentajes. En general, se puede observar que la distribución del poliestireno expandido no es homogénea, ya que flota quedándose en la parte superior, a excepción del porcentaje más elevado en el que dado el alto volumen de perlas de poliestireno expandido estas sí se distribuyen de forma homogénea por toda la masa del yeso.

Figura 8-3 Sección compuesto de referencia

Figura 8-4 Transición de incorporación de las perlas de poliestireno expandido al yeso desde 1 a 3%

Con los tres porcentajes obtenidos se ha elaborado una nueva serie de probetas y se ha analizado su densidad de acuerdo con el ensayo que aparece en el apartado 5.2.4.3. Aquellos compuestos con una densidad superior a 1 g/cm^3 se descartan para la fase de caracterización.

En la figura 8-5 se muestran los resultados de densidad para cada uno de los compuestos analizados y se puede observar que con todos los compuestos se consigue reducir la densidad por debajo de 1 g/cm^3 , por lo que no se descarta ninguno de ellos. Por todo ello se van a caracterizar los tres compuestos de la serie, como puede verse en la siguiente tabla:

Serie	Porcentaje	Compuesto
Serie 7	100%	1%EPS
		2%EPS
		3%EPS

Tabla 8-2 Series de compuestos

Figura 8-5 Densidad de los compuestos de yeso con poliestireno expandido

8.2.2 Fase 2: caracterización en estado fresco de los compuestos

Esta fase tiene como objetivo caracterizar los compuestos seleccionados en el apartado 8.2.1.2 en su estado fresco. En total se ha seleccionado únicamente una serie de compuestos que se caracterizará para los porcentajes del 1%, el 2% y el 3%, más una segunda serie que es la de referencia y que servirá para comparar todos los resultados. Sobre estos compuestos se van a realizar los ensayos necesarios para determinar la relación agua/yeso y el tiempo de fraguado.

8.2.2.1 Determinación de la relación agua/yeso

La relación agua/yeso se obtiene mediante el método de la mesa de sacudidas y según lo descrito en el apartado 5.2.4.1. Esta relación determina la cantidad de agua necesaria para obtener una buena consistencia de la pasta. Del proceso del ensayo cabe destacar que cuesta mucho amasar el material, la forma cilíndrica de las perlas parece penalizar su adherencia y su baja densidad y el elevado volumen de material hacen que sea muy complicado conseguir una mezcla homogénea, ya que después de dos minutos de amasado, aunque las perlas quedan recubiertas por el yeso, toda la mezcla de yeso y agua queda depositada abajo en el recipiente de amasado.

En la figura 8-6 pueden verse las relaciones agua/yeso de cada uno de los compuestos analizados frente al compuesto de referencia (los resultados completos del ensayo pueden verse en el anexo 4). En este gráfico se puede observar que la adición progresiva de perlas de poliestireno expandido requiere de cantidades de agua superiores para asegurar la misma consistencia, llegando para un 3% de agregado a un incremento de la relación agua/yeso del 50% frente al valor de la referencia.

Figura 8-6 Relación agua/yeso de los compuestos de yeso con poliestireno expandido

8.2.2.2 Determinación del tiempo de fraguado

El tiempo de fraguado se determina mediante el método del cono de Vicat de acuerdo con lo descrito en el apartado 5.2.4.2. Como ocurre con el ensayo de relación agua/yeso, en este caso también se ha observado que cuanto mayor es la cantidad de agregado incorporado más cuesta realizar la mezcla debido al elevado volumen de agregado.

En la figura 8-7 puede verse el tiempo de fraguado de cada uno de los compuestos analizados frente al compuesto de referencia (los resultados completos del ensayo pueden verse en el anexo 4). En este gráfico se observa que la incorporación progresiva de perlas de poliestireno expandido hacen que se reduzca considerablemente el tiempo de fraguado, llegando a reducirse en el peor de los casos hasta en un 36% frente a la referencia.

De acuerdo con la norma UNE-EN 13279-1:2009 el tiempo de fraguado de un yeso de construcción debe ser superior a 20 minutos en aplicaciones manuales y superior a 50 minutos para aplicaciones mecánicas (AENOR, 2009). De acuerdo con esto, todos los compuestos analizados necesitarían la aportación de un aditivo retardante del fraguado para cumplir con los requerimientos mínimos exigidos en la normativa para garantizar el buen uso del material. Sin embargo, el yeso utilizado

como matriz es un yeso rápido y por ello estos valores no son aplicables, ya que el fabricante especifica que este yeso es para una aplicación excepcionalmente rápida y sencilla.

Figura 8-7 Tiempo de fraguado de los compuestos de yeso con poliestireno expandido

8.2.3 Fase 3: caracterización en estado endurecido de los compuestos

Esta fase tiene como objetivo caracterizar los compuestos seleccionados en el apartado 1 en su estado endurecido. Sobre estos compuestos se van a llevar a cabo los ensayos necesarios para analizar su comportamiento físico, mecánico, térmico y acústico a través de los siguientes ensayos:

- Microscopía electrónica de barrido
- Densidad
- Dureza superficial Shore C
- Resistencia mecánica a flexión
- Resistencia mecánica a compresión
- Adherencia superficial
- Absorción de agua por capilaridad
- Durabilidad
- Coeficiente de conductividad térmico
- Coeficiente de absorción acústica

8.2.3.1 Microscopía electrónica de barrido

El objetivo de este ensayo es analizar la superficie de los compuestos según lo descrito en el apartado 5.1.4.3. para observar el comportamiento del agregado ligero con la matriz de yeso. Para ello se ha analizado una muestra del compuesto de yeso con un 2% de poliestireno expandido y se ha visionado en el microscopio. El resultado se ha comparado con una muestra del yeso de referencia que no incorpora ningún tipo de aditivo. Para este ensayo, el de densidad, el de dureza superficial, el de resistencia a flexión y el de resistencia a compresión se han elaborado probetas tipo 1 (40 mm x 40 mm x 160mm).

Como puede verse en la figura 8-8, en la muestra de referencia sin agregados se puede ver una estructura en red de agujas de forma cúbica del yeso que se repite a lo largo de toda la sección. A su vez, en la muestra con el poliestireno expandido se observa la misma estructura de red de agujas y parece que no existe integración con el poliestireno expandido. Esto confirma lo que Mercedes

del Río exponía en su Tesis Doctoral en la que determinaba que debido a que la superficie de las perlas de poliestireno expandido es totalmente lisa, éstas representan una adherencia nula con los cristales del yeso, lo que explica que en la rotura a flexión de las probetas las perlas no se partan (Del Río Merino, 1999).

Figura 8-8 Microscopía a 180x del compuesto de yeso con EPS (izda.) y del compuesto de referencia (derecha)

8.2.3.2 Densidad

Este ensayo se ha realizado según lo descrito en el apartado 5.2.4.3. y los resultados se muestran en la figura 8-9, donde se puede observar que todos los compuestos tienen una densidad mucho menor que la referencia. La reducción de densidad se incrementa con la incorporación progresiva de mayor cantidad de perlas de poliestireno expandido, llegando hasta una reducción de casi el 70% para el compuesto que más poliestireno expandido tiene (los resultados completos del ensayo pueden verse en el anexo 4).

Figura 8-9 Densidad de los compuestos de yeso con poliestireno expandido

8.2.3.3 Dureza superficial Shore C

Los resultados obtenidos de este ensayo, que se ha realizado según lo descrito en el apartado 5.2.4.4, se muestran en la figura 8-10, donde se puede observar que el incremento progresivo en el porcentaje de poliestireno expandido es proporcional a la reducción de la dureza superficial Shore

C. En este caso, a pesar de que durante el ensayo se descartan las medidas realizadas sobre perlas de poliestireno que se encuentran en la superficie, las medidas tomadas en zonas próximas al poliestireno siguen siendo bajas, porque el espesor de yeso no es suficiente para ofrecer una dureza mayor (véase figura 8-11).

Por otra parte, ninguno de los compuestos cumple el valor mínimo de dureza superficial Shore C para compuestos de yeso de los reglamentos particulares del yeso elaborados por AENOR (AENOR, 2009) y únicamente el compuesto con un 1% cumple con el valor indicado para yesos aligerados (AENOR, 2009). Los resultados completos del ensayo pueden verse en el anexo 4.

Figura 8-10 Dureza superficial de los compuestos de yeso con poliestireno expandido

Figura 8-11 Superficie de probeta con poliestireno expandido

8.2.3.4 Resistencia mecánica a flexión

En la figura 8-12 se representan los resultados de resistencia a flexión para los compuestos analizados, obtenido mediante el ensayo descrito en el apartado 5.2.4.5. En este gráfico se puede observar cómo, al igual que ocurre con la dureza superficial, la incorporación progresiva de poliestireno expandido parece llevar asociada una reducción proporcional de la resistencia mecánica a flexión. Los resultados completos del ensayo pueden verse en el anexo 4.

Por otra parte, de acuerdo con la norma UNE-EN 13279-1:2009 la resistencia a flexión de un yeso de construcción debe ser superior a 1 N/mm², lo cual se cumple en todos los casos, aunque el

resultado obtenido para el compuesto con un 3% de poliestireno expandido se encuentra justo en el límite (AENOR, 2009).

Figura 8-12 Resistencia mecánica a flexión de los compuestos de yeso con poliestireno expandido

En la figura 8-13 se han representado en un mismo gráfico los resultados para la densidad y para la resistencia a flexión para confirmar la relación que existe en los materiales compuestos entre estos dos parámetros (Laukaitis, et al., 2005). Ya que como se puede ver en este gráfico, los valores de densidad y resistencia para cada compuesto siguen una misma línea de tendencia.

Figura 8-13 Relación entre la densidad y la resistencia a flexión de los compuestos con EPS

8.2.3.5 Resistencia mecánica a compresión

En la figura 8-12 se representan los resultados de resistencia a compresión para los compuestos analizados, obtenido mediante el ensayo descrito en el apartado 5.2.4.6. En este gráfico se puede observar cómo la incorporación progresiva de poliestireno expandido conlleva una reducción de la resistencia mecánica a compresión de hasta casi un 90% con respecto a la referencia. Los resultados completos del ensayo pueden verse en el anexo 4.

Por otra parte, de acuerdo con la norma UNE-EN 13279-1:2009 la resistencia a compresión de un yeso de construcción debe ser superior a 2 N/mm², lo cual se cumple en los compuestos que

incorporan un 1 y un 2% de poliestireno expandido. Sin embargo, al incorporar un 3% este valor se deja de cumplir (AENOR, 2009).

Figura 8-14 Resistencia mecánica a compresión de los compuestos de yeso con poliestireno expandido

En la figura 8-15 se han representado en un mismo gráfico los resultados para la densidad y para la resistencia a compresión y de nuevo, al igual que ocurre con la resistencia a flexión, se confirma la relación que existe en los materiales compuestos entre los parámetros de densidad y resistencia.

Figura 8-15 Relación entre la densidad y la resistencia a compresión de los compuestos seleccionados

8.2.3.6 Adherencia superficial

En la figura 8-16 se muestran los resultados de adherencia superficial de los compuestos analizados, determinados según lo descrito en el apartado 5.2.4.7. y se puede observar cómo los valores se reducen a medida que se incrementa el porcentaje de poliestireno expandido en la mezcla. Con respecto a la referencia, estos valores se encuentran casi un 50% por debajo, aunque en todos los casos se cumple el requerimiento mínimo exigido por la norma UNE-EN 13279-1:2009 de 0,1 N/mm² (AENOR, 2009). Por otra parte, la rotura en todos los casos es por cohesión, ya que se produce dentro de la masa del yeso y no en la interfase yeso-soporte. Los resultados completos del ensayo pueden verse en el anexo 4.

Figura 8-16 Adherencia superficial de los compuestos de yeso con poliestireno expandido

8.2.3.7 Absorción de agua por capilaridad

Los resultados de absorción de agua por capilaridad, obtenidos según lo descrito en el apartado 5.2.4.8, se muestran en la figura 8-17. En este gráfico se puede observar como parece que a mayor cantidad de poliestireno expandido incorporado se reduce ligeramente la absorción de agua por capilaridad, llegando a reducirse hasta casi un 20% la altura de absorción de agua en el caso en el que se incorpora mayor porcentaje de poliestireno. Los resultados completos del ensayo pueden verse en el anexo 4.

Figura 8-17 Absorción de agua por capilaridad de los compuestos de yeso con poliestireno expandido

8.2.3.8 Durabilidad

El ensayo de durabilidad se ha llevado a cabo de acuerdo con lo descrito en el apartado 5.2.4.9 y los resultados se muestran en la figura 8-18. Estos resultados muestran el efecto de los distintos ciclos llevados a cabo sobre los tres compuestos y la referencia y se puede observar cómo los compuestos con poliestireno expandido no llegan a terminar el segundo ciclo. Además, cuando más

poliestireno lleva el compuesto peor es la durabilidad de la probeta frente a la acción del agua. Los resultados completos del ensayo pueden verse en el anexo 4.

Figura 8-18 Resultados durabilidad compuestos con poliestireno expandido

8.2.3.9 Coeficiente de conductividad térmica “Heat insulation house”

La figura 8-19 muestra los resultados de coeficiente de conductividad, obtenidos según lo descrito en el apartado 5.2.4.10, para los distintos compuestos de yeso con poliestireno expandido y para la referencia. En este gráfico se puede observar que la incorporación progresiva de poliestireno expandido reduce el coeficiente de conductividad por debajo del de la referencia hasta en un 20%. Esto se puede explicar porque al ser el poliestireno expandido un material aislante térmico que tiene un coeficiente de conductividad térmica de 0,034 permite que el conjunto yeso-poliestireno expandido tenga un mejor comportamiento térmico. Los resultados completos del ensayo pueden verse en el anexo 4.

Figura 8-19 Coeficiente de conductividad térmica de los compuestos de yeso con poliestireno expandido

8.2.3.10 Coeficiente de absorción acústica

En la figura 8-20 se muestran los resultados de coeficiente de absorción acústica obtenidos de acuerdo con la metodología planteada en el apartado 5.2.4.11. En este gráfico se observa que existe gran diferencia entre la absorción acústica que se consigue con el material aislante acústico y los

resultados obtenidos con los compuestos de yeso con poliestireno expandido. No solo es mayor la absorción del material acústico, si no que su comportamiento es mejor cuanto mayor es la frecuencia hasta los 1600 Hz, mientras que en los compuestos seleccionados el valor de la absorción varía poco a lo largo de todas las frecuencias desde los 600 Hz. Esto se puede explicar debido a que como ocurría con el residuo de poliestireno extruido, el poliestireno expandido no es un buen aislante acústico y el yeso de por si no tiene un valor de absorción acústica destacable, ya que como se puede ver en el gráfico, el compuesto de referencia tiene un valor de absorción acústica similar al resto de compuestos analizados. Por tanto no se espera que la combinación de estos dos materiales permita obtener un compuesto con propiedades aislantes acústicas mejoradas.

En cualquier caso, si se analizan únicamente los valores de absorción acústica obtenidos con los compuestos analizados, se puede observar que es ligeramente mayor la absorción con los compuestos con mayor cantidad de poliestireno expandido incorporado, aunque la diferencia es poco representativa, ya que todos los valores de coeficiente de absorción acústica están recogidos entre 0 y 0,1.

Figura 8-20 Coeficientes de absorción acústica de los compuestos con residuo de EPS

8.2.4 Fase 4: propuesta de aplicaciones

Como ocurre con los compuestos con residuo de poliestireno extruido, los resultados no han destacado ninguna de las propiedades y en general se cumplen los requerimiento exigidos por la normativa, por tanto se proponen de nuevo para este material las aplicaciones genéricas para los compuestos de yeso:

- Revestimiento de yeso de aplicación manual sobre soporte rígido.
- Placas de yeso machihembradas para aplicación en trasdosados y particiones de espesor entre 50 y 150 mm.

- Paneles de yeso para falso techo de espesor 15 mm sobre subestructura metálica.

8.3 ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

En este apartado se analiza el comportamiento de los compuestos aligerados con residuo de poliestireno extruido y analizados en el capítulo 7, frente a los compuestos de yeso aligerados con poliestireno expandido analizados en el apartado 8.2. y los compuestos analizados por otros investigadores y recogidos en la búsqueda bibliográfica desarrollada en el apartado 8.1.

8.3.1 Caracterización en estado fresco

En este apartado se analizan y comparan los resultados de relación agua/yeso y tiempo de fraguado.

De la realización de los ensayos se ha observado que la trabajabilidad en el amasado con el residuo de poliestireno extruido es mucho mejor que con el poliestireno expandido. Por ello es más fácil conseguir muestras homogéneas e incorporar un porcentaje mayor con el residuo de poliestireno extruido (véase figura 8-21). De hecho, mientras que se consigue realizar mezclas homogéneas con un 4% del residuo, con el poliestireno expandido solo se llega a incorporar un 3%. Además, al introducir la mezcla en las probetas parte del poliestireno expandido se desperdicia, porque su elevada flotabilidad y falta de adherencia hace que las perlas de poliestireno expandido sean lo primero que sale al enrasar.

Figura 8-21 Amasada con EPS (izquierda) y con residuo de XPS (derecha)

8.3.1.1 Relación agua/yeso

Los resultados observados para la relación agua/yeso de los compuestos con residuo de poliestireno extruido y poliestireno expandido han demostrado en ambos casos que la adición progresiva de mayores porcentajes de agregado ligero requiere de cantidades de agua superiores para asegurar la misma consistencia. Este efecto se ha visto confirmado con otros agregados ligeros como el residuo de poliuretano (Gutiérrez-González, et al., 2012).

En la figura 8-22 se muestran todos los resultados obtenidos y como se observaba durante el amasado, el residuo de poliestireno extruido requiere de menor cantidad de agua de amasado que

el poliestireno expandido. De hecho, cabe destacar que el compuesto que tiene un 3% de poliestireno expandido supera hasta los valores de relación agua/yeso obtenidos con un 4% de residuo de poliestireno extruido. En cuanto a los compuestos con residuo de poliestireno extruido, parece que los compuestos que mejor se comportan son los que no incorporan finos en su mezcla.

En cualquier caso, la relación agua/yeso recomendada por el fabricante para este tipo de material es 1-1,2 (Placo, 2014). Esta relación agua/yeso tan alta haría que las propiedades mecánicas del compuesto se redujeran en proporción. Por esta razón, muchos investigadores, como García Santos (1988), incorporan aditivos fluidificantes a los compuestos, de tal manera que se pueda tener una trabajabilidad adecuada manteniendo las propiedades mecánicas.

Figura 8-22 Relación agua/yeso de los compuestos de yeso con residuo de XPS y con EPS

8.3.1.2 Tiempo de fraguado

En la figura 8-23 se observa que al incorporar los agregados ligeros disminuye el tiempo de fraguado y que esta disminución es mayor cuanto mayor es el porcentaje incorporado. Este efecto se produce con la mayoría de los agregados ligeros, como ocurre con los residuos de neumático (Jiménez Rivero, et al., 2014). Sin embargo, en otras ocasiones el efecto es el contrario, como ocurre con el gel de sílice que aumenta el tiempo de fraguado de la mezcla (Khalil, et al., 2013) o el caucho que inicialmente retiene agua, lo que permite que la hidratación del yeso sea más lenta y por tanto el tiempo de fraguado sea mayor (Herrero, et al., 2013). Por otra parte, los compuestos de yeso con residuo de poliestireno extruido parece que tienen un mayor tiempo de fraguado que los que incorporan poliestireno expandido, pero la diferencia es de menos de un minuto.

Figura 8-23 Tiempo de fraguado de los compuestos de yeso con residuo de XPS y con EPS

8.3.2 Caracterización en estado endurecido

En este apartado se analizan y comparan los resultados de densidad, dureza superficial Shore C, resistencia mecánica a flexión, resistencia mecánica a compresión, adherencia superficial, absorción de agua por capilaridad, durabilidad, coeficiente de conductividad térmico y coeficiente de absorción acústica.

8.3.2.1 Densidad

En general, la adición de un agregado ligero en un compuesto de yeso se traduce en una reducción de densidad. Esto se suele deber a la baja densidad del agregado ligero en sí (Gencel, et al., 2016) y al incremento de la porosidad que proporciona el agregado ligero si su estructura es celular como ocurre con el poliestireno o el poliuretano (Gutiérrez-González, et al., 2012).

En la figura 8-24 se observan los resultados para el residuo de poliestireno extruido y para el poliestireno expandido y en todos los casos la densidad es menor que la referencia. Esta reducción de la densidad es mucho mayor al agregar poliestireno expandido que al agregar el residuo de poliestireno extruido y además el salto de esta reducción al incrementar el porcentaje del agregado también es mucho más representativo para el poliestireno expandido que para el residuo de poliestireno extruido.

Al comparar los mayores valores de reducción de densidad obtenidos con el residuo de poliestireno extruido y el poliestireno expandido con los resultados obtenidos por otros investigadores con otros agregados ligeros (véase figura 8-25), se puede observar cómo los resultados con poliestireno expandido, tanto los obtenidos en esta Tesis Doctoral como los obtenidos por González Madariaga en su Tesis Doctoral, son los que consiguen una mayor reducción de densidad (González Madariaga, 2005). Mientras que la reducción de densidad del compuesto con residuo de poliestireno extruido se encuentra por encima de la media de todos los resultados, que sería un 33%.

Figura 8-24 Densidad de los compuestos de yeso con residuo de XPS y con EPS

Figura 8-25 Reducción de densidad en compuestos de yeso con agregados ligeros (datos obtenidos de la tabla 8-1)

8.3.2.2 Dureza superficial Shore C

En la figura 8-26 se observan los resultados de dureza superficial Shore C frente a los resultados de densidad y se puede comprobar que parece que existe una relación entre la reducción de la densidad y la pérdida de dureza superficial, tal como Laukaitis et al. establece en su estudio sobre el efecto de la espuma de poliestireno en los compuestos cementosos (Laukaitis, et al., 2005). Por otra parte, Jiménez Rivero et al, nombra un efecto muy común en el uso de agregados ligeros en compuestos de yeso, que es que debido a la baja densidad del agregado, durante el amasado este se ubica en la superficie del material (Jiménez Rivero, et al., 2014). Las medidas de dureza

superficial tomadas sobre partículas de agregado ligero se descartan, pero aun así el yeso que recubre al agregado ligero cercano a la superficie es más frágil que el del núcleo del material.

Figura 8-26 Dureza superficial vs densidad de los compuestos de yeso con residuo de XPS y con EPS

En general, de los datos expuestos se puede observar que todos los valores se encuentran por debajo del valor de la referencia y que la mayor pérdida de dureza superficial se produce al incorporar poliestireno expandido, ya que es con el agregado ligero con el que mayor reducción de densidad se consigue. Respecto a las distintas mezclas de granulometrías llevadas a cabo con el residuo de poliestireno extruido no parece que exista mucha diferencia entre unas y otras, lo que se confirmaba en el capítulo 6 mediante un análisis de la varianza. Sin embargo, sí que hay varios compuestos con un 2% de residuo de poliestireno extruido que tienen un comportamiento similar al compuesto con un 1% de poliestireno expandido.

Por otra parte, de acuerdo con el reglamento particular 35.01 de la marca AENOR para yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción, la dureza superficial mínima que deben cumplir los compuestos de yeso es de 65 unidades Shore C (AENOR, 2009), mientras que para yesos de construcción aligerados el reglamento particular 35.03 indica que el mínimo debe ser de 45 unidades Shore C (AENOR, 2009). En este caso ninguno de los compuestos cumpliría el requerimiento mínimo para yesos de construcción, pero sí cumplirían el requerimiento para yesos aligerados los compuestos con un 1% de poliestireno expandido y los compuestos con un 2 y 3% de residuo de poliestireno extruido y uno de los compuestos con un 4% de residuo de poliestireno extruido.

En la figura 8-27 se han representado los porcentajes de reducción de densidad conseguidos al incorporar diferentes agregados ligeros frente a los porcentajes de pérdida de dureza superficial de los compuestos sobre los que se tenía este dato. La mayor pérdida de dureza superficial se produce con los compuestos con residuo de poliuretano y residuo de neumático, seguidos muy de cerca por el compuesto con poliestireno expandido. En el gráfico se ha introducido el dato de la relación entre la dureza y la densidad. De acuerdo con este dato la mejor relación producida entre la reducción de densidad y la pérdida de dureza superficial se produce al incorporar perlita (que tiene un dato dureza/densidad=0,17), después de este agregado ligero los mejores datos se obtienen con el

residuo de poliamida y el residuo de corcho, a continuación se encontraría el poliestireno expandido y un poco más lejos el residuo de poliestireno extruido. Los peores resultados serían los obtenidos con la vermiculita, el residuo de poliuretano y el residuo de neumático.

Figura 8-27 Reducción de densidad frente a pérdida de dureza superficial en compuestos de yeso con agregados ligeros (datos obtenidos de la tabla 8-1)

8.3.2.3 Resistencia mecánica a flexión y a compresión

Al igual que ocurre con la dureza superficial, la resistencia mecánica a flexión y a compresión de los compuestos aligerados está relacionada con la densidad (Laukaitis, et al., 2005). Es decir, cuanto más se reduce la densidad, más se reduce la resistencia. Por otra parte, Gutiérrez González establece que la pérdida de resistencia que se da al incorporar agregados ligeros se puede deber también a la existencia de un mayor porcentaje de poros en la matriz del yeso, pero que en cualquier caso la porosidad del material también afecta a la densidad, por lo tanto esto también confirmaría que ambos conceptos estén relacionados (Gutiérrez González, et al., 2012).

Como se puede ver en la figura 8-28, en general se cumple esta relación, ya que cuanto mayor es el porcentaje de poliestireno expandido o de residuo de poliestireno extruido, mayor es la reducción de densidad y mayor es la pérdida de resistencia. El problema está en que en el caso de los compuestos con poliestireno expandido esta pérdida de resistencia puede ser demasiado grande para su uso en cualquier aplicación del yeso. De acuerdo con la norma UNE-EN 13279-1:2009 la resistencia a flexión de un yeso de construcción debe ser superior a 1 N/mm^2 , lo cual se cumple en todos los casos, salvo para el compuesto de yeso con un 3% de poliestireno expandido. Mientras que la resistencia a compresión debe ser superior a 2 N/mm^2 , lo que se cumple en los compuestos con menos de un 3% de poliestireno expandido y en los compuestos con menos de un 4% de residuo de poliestireno extruido (AENOR, 2009).

Cabe destacar también que aunque los compuestos con poliestireno expandido son los que menor densidad tienen, hay compuestos con residuo de poliestireno extruido que tienen una densidad similar y un comportamiento mecánico mejor, como el compuesto 1,5XPSm+1,5XPSf en comparación con el compuesto con un 1% de poliestireno expandido.

Figura 8-28 Resistencia mecánica de los compuestos de yeso con residuo de XPS y con EPS frente a su densidad

En la figura 8-29 se ha representado la pérdida de resistencia a flexión y la reducción de densidad de los compuestos seleccionados en la búsqueda bibliográfica sobre los que se han encontrado datos relevantes frente a los dos compuestos con residuo de poliestireno extruido y poliestireno expandido con los que mejores resultados de reducción de densidad se han obtenido. En este gráfico se puede observar que parece que existen tres grupos de compuestos (que se han agrupado en círculos de línea de puntos rojos). El círculo de la derecha correspondería a los compuestos con una pérdida de resistencia a flexión menor al 50% y salvo el compuesto con EPS, todos los demás son los que menor reducción de densidad consiguen. El círculo de la izquierda correspondería a los compuestos con una pérdida de resistencia a flexión mayor al 70%, entre los que destaca el compuesto con EPS, con una reducción de densidad de casi el 70%. Por último, el círculo de en medio es el más conservador, con una pérdida de resistencia menor al 70% y una reducción de densidad mayor al 40%. Dentro de este círculo el compuesto que mejores parámetros tiene es el que tiene residuo de poliestireno extruido.

Figura 8-29 Reducción de densidad frente a pérdida de resistencia a flexión en compuestos de yeso con agregados ligeros (datos obtenidos de la tabla 8-1)

Por otra parte, en la figura 8-30 se ha representado la pérdida de resistencia a compresión y la reducción de densidad de los compuestos seleccionados en la búsqueda bibliográfica sobre los que se han encontrado datos relevantes frente a los dos compuestos con residuo de poliestireno extruido y poliestireno expandido con los que mejores resultados de reducción de densidad se han obtenido. En este gráfico se puede observar que existen tres grupos de compuestos (que se han agrupado de nuevo en círculos de línea de puntos rojos). En el círculo de la derecha se encuentra la diatomita, con este agregado ligero no se reduce la resistencia a compresión, si no que se aumenta, aunque este valor no sería comparable ya que la mezcla incorpora también fibra de polipropileno (Gencel, et al., 2016). En el círculo de la izquierda se vuelven a encontrar los compuestos con una pérdida de resistencia mayor al 70%, en este caso el compuestos con residuo de poliestireno extruido sería el que menor pérdida de resistencia tiene de todos los compuestos de este grupo. Por último, en el círculo de en medio se encuentran de nuevo los compuestos más conservadores, con una pérdida de resistencia entre el 10 y el 50%. Dentro de este círculo se encuentran los compuestos con arena, gel de sílice, humo de sílice, perlita y vermiculita. Khalil et al, establecen en su estudio de investigación sobre la adición de arena, gel de sílice y humo de sílice, que los agregados de pequeñas dimensiones afectan menos a la resistencia a compresión porque ocupan los poros intersticiales de la matriz del yeso (Khalil, et al., 2013). Por otra parte, Vimmrová et al. consiguen una pérdida de resistencia muy controlada con la perlita porque incorporan un porcentaje muy bajo de agregado, lo que hace también que la reducción de densidad también sea menor (Vimmrová, et al., 2011).

Figura 8-30 Reducción de densidad frente a pérdida de resistencia a compresión en compuestos de yeso con agregados ligeros (datos obtenidos de la tabla 8-1)

8.3.2.4 Adherencia superficial

En la figura 8-31 se muestran los resultados de adherencia superficial para los compuestos con residuo de poliestireno extruido y para los compuestos con poliestireno expandido. En esta gráfico se puede observar cómo la adherencia superficial baja al incrementarse la cantidad de agregado ligero. Además, los compuestos con poliestireno expandido tienen una menor adherencia superficial en comparación con los compuestos con residuo de poliestireno extruido.

Por otra parte, de acuerdo con la norma UNE-EN 13279-1:2009 la adherencia superficial de un yeso de construcción debe ser superior a $0,1 \text{ N/mm}^2$, lo cual se cumple en todos los casos (AENOR, 2009).

Figura 8-31 Adherencia superficial de los compuestos de yeso con residuo de XPS y con EPS

8.3.2.5 Absorción de agua por capilaridad

En general, los agregados ligeros ayudan a reducir la absorción de agua por capilaridad, debido a que el yeso absorbe más agua que el agregado, por tanto en comparación con un yeso sin agregados la absorción de agua va a ser menor. Aunque hay excepciones como la diatomita, con la que se produce un incremento de la absorción de agua por capilaridad hasta de un 30% debido a su porosidad (Gencel, et al., 2016).

En la figura 8-32 se muestran los resultados de absorción de agua por capilaridad de los compuestos con residuo de poliestireno extruido y de los compuestos con poliestireno expandido.

Figura 8-32 Absorción de agua por capilaridad de los compuestos de yeso con residuo de XPS y con EPS

En este gráfico se puede observar cómo los compuestos con poliestireno expandido absorben más agua por capilaridad que los compuestos con residuo de poliestireno extruido, debido muy posiblemente a que el poliestireno extruido del cual se ha obtenido el residuo que se ha utilizado para hacer los compuestos tiene una elevada resistencia al agua.

8.3.2.6 Durabilidad

Los resultados de la prueba de durabilidad de los compuestos con residuo de poliestireno extruido y de los compuestos con poliestireno expandido se muestran en la figura 8-33. En general, se observa que el peso de los compuestos se va reduciendo conforme se van completando las fases de desecado y saturado hasta que la probeta queda inservible (no es compacta y se desmorona al tocarla). Además, cuanto más poliestireno contiene la probeta peor es el comportamiento. Por otra parte, ningún compuesto llega a completar tres ciclos, pero los compuestos con residuo de poliestireno extruido aguantan una fase más de desecado que los compuestos con poliestireno expandido.

Figura 8-33 Durabilidad de los compuestos de yeso con residuo de XPS y con EPS

8.3.2.7 Coeficiente de conductividad térmico “Heat insulation house”

La figura 8-34 muestra los resultados de coeficiente de conductividad térmico de los compuestos con residuo de poliestireno extruido y de los compuestos con poliestireno expandido. Se puede observar en este gráfico que como se esperaba, la incorporación de poliestireno (expandido o residuo de poliestireno extruido) reduce el coeficiente de conductividad térmico de los compuestos de yeso. De hecho, cuanto más poliestireno se incorpora menor es dicha conductividad. Este comportamiento se esperaba porque el poliestireno en sí tiene un muy buen comportamiento térmico y de hecho su uso más frecuente es como material aislante térmico, por tanto cuanto más poliestireno lleve el compuesto más bajo debería ser el coeficiente. En cuanto a las diferencias entre el poliestireno expandido y el residuo de poliestireno extruido, se observa cómo con el primero se reduce menos el coeficiente de conductividad térmico, a pesar de que la densidad de los compuestos con este material es mucho menor. En cuanto al residuo de poliestireno extruido se puede ver cómo la diferencia de los resultados entre las distintas granulometrías es apenas apreciables.

Figura 8-34 Coeficiente de conductividad térmico de los compuestos de yeso con residuo de XPS y con EPS

8.3.2.8 Coeficiente de conductividad térmico C-Therm TCi

La figura 8-35 muestra los resultados obtenidos con el residuo de poliestireno extruido frente a los resultados obtenidos con otros agregados ligeros obtenidos de la búsqueda bibliográfica y se puede observar cómo el compuesto con residuo de poliestireno extruido se encuentra aproximadamente en la media de todos los resultados, por debajo de los valores obtenidos para la perlita, el residuo de poliuretano y el residuo de poliamida.

Figura 8-35 Reducción de densidad y coeficiente de conductividad térmico en compuestos de yeso con agregados ligeros (datos obtenidos de la tabla 8-1)

Por último, de la comparación de los resultados obtenidos con la conductividad térmica de otros materiales de construcción (véase figura 8-36), se puede observar que el compuesto con residuo de poliestireno extruido se comporta de forma similar al cartón-yeso y funciona mucho mejor que el resto de materiales compuestos como el mortero de cemento o el hormigón en masa.

Figura 8-36 Conductividad térmica media de materiales de construcción (Instituto Eduardo Torroja & Instituto de la Construcción de Castilla y León, 2007) en comparación con los compuestos de yeso con XPS

8.3.2.9 Coeficiente de absorción acústica

El poliestireno expandido y el poliestireno extruido son materiales aislantes de célula cerrada, por lo que acústicamente no sirven como material aislante, lo que se ha confirmado al comparar los valores obtenidos con los de un material aislante acústico.

Si se analizan únicamente los valores de absorción acústica obtenidos con los compuestos de poliestireno expandido y el residuo de poliestireno extruido (véase figura 8-37), se puede observar que es mayor la absorción con los compuestos con mayor cantidad de residuo incorporado y que el poliestireno expandido tiene un comportamiento aislante acústico peor que la referencia.

Figura 8-37 Coeficientes de absorción obtenidos mediante tubo de Kundt de los compuestos de yeso con residuo de XPS y con EPS

8.4 CONCLUSIONES PARCIALES

Se han encontrado nueve referencias de agregados ligeros que no son residuos y seis referencias para residuos con suficientes datos para realizar un análisis comparativo.

Se ha seleccionado el poliestireno expandido para caracterizarlo siguiendo el mismo plan experimental diseñado para caracterizar los compuestos de yeso aligerado con residuo de poliestireno extruido. Para ello se han utilizado perlas de poliestireno de diámetro (4-6) mm, sobre las que no ha sido necesario realizar ningún proceso de transformación.

Al igual que ocurre con el residuo de poliestireno extruido, la adición progresiva de mayores porcentajes de poliestireno expandido requiere de cantidades de agua mayores para asegurar la misma consistencia. Además, cuanto más poliestireno se incorpora menor es el tiempo de fraguado. Se ha observado que este hecho se cumple también con otro tipo de agregados ligeros como los residuos de neumático (Jiménez Rivero, et al., 2014). Sin embargo, en otras ocasiones el efecto es el contrario, como ocurre con el gel de sílice que aumenta el tiempo de fraguado de la mezcla (Khalil, et al., 2013) o el caucho que inicialmente retiene agua, lo que permite que la hidratación del yeso sea más lenta y por tanto el tiempo de fraguado sea mayor (Herrero, et al., 2013).

La mayor reducción de densidad observada de todos los agregados ligeros se consigue al incorporar poliestireno expandido. Sin embargo, en comparación con el resto de agregados ligeros el residuo de poliestireno extruido se encuentra en la media.

Se ha confirmado la relación existente entre la densidad y la resistencia que establecen varios investigadores. Por lo que tanto la dureza superficial, como la resistencia mecánica a flexión y a compresión y la adherencia superficial disminuyen a medida que se incorpora mayor porcentaje de agregados ligeros, obteniéndose peores resultados con el poliestireno expandido que con el residuo de poliestireno extruido. En comparación con otros agregados ligeros, para la resistencia mecánica a flexión se ha observado que los compuestos con residuo de poliestireno extruido se encuentran entre los compuestos con la relación entre pérdida de resistencia y reducción de densidad más adecuada. Mientras que para la resistencia a compresión los compuestos con residuo de poliestireno extruido tienen una pérdida de resistencia importante, existiendo otros agregados ligeros con mejor relación entre pérdida de resistencia y reducción de densidad.

Los agregados ligeros ayudan a reducir la absorción de agua por capilaridad, debido a que el yeso absorbe más agua que el agregado, por tanto en comparación con un yeso sin agregados la absorción de agua es menor, aunque se ha observado que hay excepciones como la diatomita, con la que se produce un incremento de la absorción de agua por capilaridad. En cuanto a la diferencia entre el poliestireno expandido y el residuo de poliestireno extruido, se ha comprobado cómo con el residuo se consigue un compuesto de yeso que absorbe menos agua por capilaridad. Esto se debe muy posiblemente a que el poliestireno extruido del que se ha conseguido el residuo tiene una elevada resistencia al agua porque se utiliza principalmente como material aislante térmico en cubiertas.

Por otra parte, el residuo de poliestireno extruido permite realizar compuestos con una conductividad térmica menor que con el poliestireno expandido. De la comparación de los resultados con los valores obtenidos por otros investigadores para otros agregados ligeros, se ha observado que el residuo de poliestireno extruido tendría una conductividad térmica media.

Por último, en cuanto a la absorción acústica, como se esperaba, ni el residuo de poliestireno extruido ni el poliestireno expandido ayudan a reducir el coeficiente de absorción acústica, dado que su estructura celular es de celda cerrada.

8.5 TRABAJOS CITADOS

- AENOR, 2009. RP 35.01 Yesos para la construcción (B1) YG, YG/L, YPM. Madrid: s.n.
- AENOR, 2009. RP 35.03 Yesos de construcción aligerados (B4) YA, YPM/A. Madrid: s.n.
- AENOR, 2009. UNE-EN 13279-1:2009 Yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción. Parte 1: Definiciones y especificaciones. Madrid: s.n.
- Del Río Merino, M., 1999. Elaboración y aplicaciones constructivas de paneles prefabricados de escayola aligerada y reforzada con fibras de vidrio E y otros aditivos (tesis doctoral). Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- Del Río Merino, M., Domínguez, J. D. & Hernández Olivares, F., 1998. Escayola aligerada con sólidos celulares. *Informes de la construcción*, 50(458), pp. nov-dic.
- García Santos, A., 1988. Comportamiento mecánico de yeso reforzado con polímeros sintéticos (tesis doctoral). Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- García Santos, A., 2009. Escayola reforzada con fibras de polipropileno y aligerada con perlas de poliestireno expandido. *Materiales de Construcción*, 59(293), pp. 105-124.
- Gencel, O. y otros, 2016. A novel lightweight gypsum composite with diatomite and polypropylene fibers. *Construction and Building Materials*, Volumen 113, pp. 732-740.
- González Madariaga, F. J., 2005. Caracterización de mezclas de residuos de poliestireno expandido (EPS) conglomerados con yeso o escayola, su uso en la construcción (tesis doctoral). Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya.
- González Madariaga, F. J. & Lloveras Macia, J., 2008. EPS (expanded polystyrene) recycled bends mixed with plaster or stucco, some applications in building industry. *Informes de la Construcción*, 60(509), pp. 35-43.
- Gutiérrez González, S., Calderón Carpintero, V. & Gadea Sáinz, J., 2012. Yesos aligerados fabricados a partir de residuos de espumas de poliuretano y polvo de poliamida (tesis doctoral). Burgos: Universidad de Burgos.
- Gutiérrez-González, S. y otros, 2012. Compatibility between gypsum and polyamide powder waste to produce lightweight plaster with enhanced thermal properties. *Construction and Building Materials*, Volumen 34, pp. 179-185.
- Gutiérrez-González, S. y otros, 2012. Lightweight plaster materials with enhanced thermal properties made with polyurethane foam wastes. *Construction and Building Materials*, 28(1), pp. 653-658.
- Hernández-Olivares, F., Bollati, M., Del Río Merino, M. & Parga-Landa, B., 1999. Development of cork-gypsum composites for building applications. *Construction and Building Materials*, 13(4), pp. 179-186.
- Herrero, S., Mayor, P. & Hernández Olivares, F., 2013. Influence of proportion and particle size gradation of rubber from end-of-life tires on mechanical, thermal and acoustic properties of plaster-rubber mortars. *Materials & Design*, Volumen 47, pp. 633-642.
- Instituto Eduardo Torroja & Instituto de la Construcción de Castilla y León, 2007. CTE web. [En línea] Disponible en: <http://cte-web.iccl.es/materiales.php?a=22> [Último acceso: septiembre 2016].
- Jiménez Rivero, A., de Guzmán Báez, A. & García Navarro, J., 2014. New composite gypsum plaster – ground waste rubber coming from pipe foam insulation. *Construction and Building Materials*, Volumen 55, pp. 146-152.

- Khalil, A., Tawfik, A., Hegazy, A. & El-Shahat, M., 2013. Effect of different forms of silica on the physical and mechanical properties of gypsum plastercomposites. *Materiales de construcción*, 63(312), pp. 529-537.
- Laukaitis, A., Zurauskas, R. & Keriene, J., 2005. The effect of foam polystyrene granules on cement composite properties. *Cement Concrete Comp*, Volume 27, p. 41–47.
- Placo, 2014. Yeso de fraguado rápido Iberplast. [En línea] Disponible en: <https://www.placo.es/es-es/productos/yesos-escayolas/yesos-manuales-iberplast> [Último acceso: 20 marzo 2017].
- Vimmrová, A., Keppert, M., Svoboda, L. & Černý, R., 2011. Lightweight gypsum composites: Design strategies for multi-functionality. *Cement and Concrete Composites*, 33(1), pp. 84-89.

CAPÍTULO 9. ÍNDICE DE ALIGERAMIENTO ECO-EFICIENTE

- 8.1 Cálculo del valor de mejora de las variables**
- 8.2 Estandarización del valor de mejora de las variables**
- 8.3 Ponderación de los valores de mejora estandarizados de las variables**
- 8.4 Índice de aligeramiento eco-eficiente**
- 8.5 Conclusiones parciales**
- 8.6 Trabajos citados**

CAPÍTULO 9. ÍNDICE DE ALIGERAMIENTO ECO-EFICIENTE

En este capítulo se desarrolla el índice de aligeramiento eco-eficiente para dar respuesta al objetivo específico 4, que servirá para evaluar los resultados de los compuestos analizados en esta Tesis Doctoral frente a los resultados obtenidos para otros compuestos de yeso aligerados con otro tipo de agregados ligeros como el poliestireno expandido. Para el diseño de este índice se ha tomado como referencia el coeficiente de aligeramiento adecuado desarrollado por Del Río Merino en su Tesis Doctoral (Del Río Merino, 1999).

9.1 CÁLCULO DEL VALOR DE MEJORA DE LAS VARIABLES

El primer paso para calcular el índice de aligeramiento eco-eficiente es calcular el valor de mejora de cada variable dependiente con respecto al valor de la variable para un compuesto de referencia sin aditivos. El valor de cada variable se obtiene utilizando la fórmula [16] en variables cuya mejora depende de que se reduzca su valor (densidad y coeficiente de conductividad térmico) y la fórmula [17] en variables cuya mejora depende de que aumente su valor (dureza superficial, resistencia mecánica a flexión y a compresión).

$$Z_{x1_n} = \frac{Vx1_{ref}}{Vx1_n} \quad [14]$$

Donde,

Z_{x1_n} es el valor de mejora de la variable dependiente "x1" para el compuesto "n";

$x1$ es una variable dependiente que mejora según se reduce su valor;

n es un compuesto de yeso aligerado;

$Vx1_{ref}$ es el valor de la variable dependiente "x1" para el compuesto de referencia;

$Vx1_n$ es el valor de la variable dependiente "x1" para el compuesto "n";

$$Z_{x2_n} = \frac{Vx2_n}{Vx2_{ref}} \quad [15]$$

Donde,

Z_{x2_n} es el valor de mejora de la variable dependiente "x2" para el compuesto "n";

$x2$ es una variable dependiente que mejora según aumenta su valor;

n es un compuesto de yeso aligerado;

$Vx2_n$ es el valor de la variable dependiente "x2" para el compuesto "n";

$Vx2_{ref}$ es el valor de la variable dependiente "x2" para el compuesto de referencia;

9.2 ESTANDARIZACIÓN DEL VALOR DE MEJORA DE LAS VARIABLES

El segundo paso para calcular el índice de aligeramiento eco-eficiente es estandarizar los valores de mejora de cada variable dependiente restándoles la media y dividiéndolos por la desviación típica para convertir todo a la misma escala. El valor estandarizado de cada variable se obtiene por tanto utilizando la fórmula [16] en variables cuya mejora depende de que se reduzca su valor (densidad

y coeficiente de conductividad térmico) y la fórmula [17] en variables cuya mejora depende de que aumente su valor (dureza superficial, resistencia mecánica a flexión y a compresión).

$$Z^e_{x1_n} = \frac{Z_{x1_n} - \bar{X}_{x1}}{s_{x1}} \quad [16]$$

Donde,

$Z^e_{x1_n}$ es el valor de mejora estandarizado de la variable dependiente "x1" para el compuesto "n";

Z_{x1_n} es el valor de mejora de la variable dependiente "x1" para el compuesto "n";

$x1$ es una variable dependiente que mejora según se reduce su valor;

n es un compuesto de yeso aligerado;

$\bar{X}_{x1}$, es la media general de todos los resultados de Z_{x1_n} para cada uno de los valores de la variable dependiente "x1";

s_{x1} , es la desviación típica de todos los resultados de Z_{x1_n} para cada uno de los valores de la variable dependiente "x1".

$$Z^e_{x2_n} = \frac{Z_{x2_n} - \bar{X}_{x2}}{s_{x2}} \quad [17]$$

Donde,

$Z^e_{x2_n}$ es el valor de mejora estandarizado de la variable dependiente "x2" para el compuesto "n";

Z_{x2_n} es el valor de mejora de la variable dependiente "x2" para el compuesto "n";

$x2$ es una variable dependiente que mejora según se reduce su valor;

n es un compuesto de yeso aligerado;

$\bar{X}_{x2}$, es la media general de todos los resultados de Z_{x2_n} para cada uno de los valores de la variable dependiente "x2";

s_{x2} , es la desviación típica de todos los resultados de Z_{x2_n} para cada uno de los valores de la variable dependiente "x2".

9.3 PONDERACIÓN DE LOS VALORES DE MEJORA ESTANDARIZADOS DE LAS VARIABLES

A continuación se ponderan los valores de mejora estandarizados. Dada la importancia del factor eco-eficiente, la variable "conductividad térmica" se pondera multiplicándola por dos. Además, se añade el bonificador "incorporación de residuo" (véase tabla 5-11) en el caso de que el agregado ligero sea un residuo.

Por último las variables "densidad", "dureza superficial", "resistencia mecánica a flexión" y "resistencia mecánica a compresión" se ponderan utilizando los valores de las medias obtenidos a partir del análisis estadístico de los datos de la encuesta llevada a cabo para cada una de las aplicaciones. El desarrollo de la encuesta se analiza en los siguientes apartados:

9.3.1 Diseño de la encuesta

Se ha elaborado una encuesta para ponderar las variables básicas de los compuestos de yeso aligerados (densidad, dureza superficial, resistencia mecánica a flexión y resistencia mecánica a

compresión) para cada una de las tres aplicaciones de los compuestos de yeso que se plantean. Para ello se ha creado un cuestionario con una pregunta para cada una de las aplicaciones. En cada pregunta el encuestado ha valorado la importancia de cada una de las cuatro variables. Para ello le ha tenido que dar un valor porcentual de 0 a 100% a cada una de las variables, teniendo en cuenta que la suma del valor de las cuatro variables debe ser 100%. Las preguntas se muestran a continuación:

1. Revestimiento de yeso sobre soporte rígido

Densidad en estado seco	<input type="text"/>	%
Dureza superficial Shore C	<input type="text"/>	%
Resistencia mecánica a flexión	<input type="text"/>	%
Resistencia mecánica a compresión	<input type="text"/>	%
TOTAL	<input type="text"/>	%

2. Tabique de placas de yeso machihembradas de (600x600) mm con un espesor entre 50-150 mm

Densidad en estado seco	<input type="text"/>	%
Dureza superficial Shore C	<input type="text"/>	%
Resistencia mecánica a flexión	<input type="text"/>	%
Resistencia mecánica a compresión	<input type="text"/>	%
TOTAL	<input type="text"/>	%

3. Falso techo de paneles de yeso de (600x600) con un espesor medio de 15 mm sobre subestructura metálica

Densidad en estado seco	<input type="text"/>	%
Dureza superficial Shore C	<input type="text"/>	%
Resistencia mecánica a flexión	<input type="text"/>	%
Resistencia mecánica a compresión	<input type="text"/>	%
TOTAL	<input type="text"/>	%

9.3.2 Difusión de la encuesta

La encuesta se ha difundido a través del Departamento de Construcciones Arquitectónicas y su Control de la Escuela Técnica Superior de Edificación de Madrid y de la Asociación Técnica y Empresarial del Yeso (ATEDY), a través de los cuales se ha conseguido contactar con 14 expertos.

9.3.3 Análisis de los datos recogidos

Los resultados obtenidos de la encuesta, que se pueden consultar en el anexo 6, han sido analizados estadísticamente. Para el análisis estadístico se ha utilizado un análisis de la varianza mediante una anova simple. En la tabla 9-1 se muestran los P-valores para cada aplicación y se puede observar que en los tres casos estos P-valores son menores que 0,05, lo que confirma que

existen diferencias significativas entre las ponderaciones que han hecho los expertos en cada una de las aplicaciones para un nivel de confianza del 95%.

Aplicación	Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Revestimiento	Entre grupos	5487,5	3	1829,17	8,68	0,0001
	Intra grupos	10960,7	52	210,783		
	Total (Corr.)	16448,2	55			
Tabique	Entre grupos	1085,71	3	361,905	3,48	0,0224
	Intra grupos	5414,29	52	104,121		
	Total (Corr.)	6500,0	55			
Falso techo	Entre grupos	5782,14	3	1927,38	7,64	0,0003
	Intra grupos	13117,9	52	252,266		
	Total (Corr.)	18900,0	55			

Tabla 9-1 P-valor obtenido del análisis estadístico de los resultados de la encuesta para las distintas aplicaciones

Por otra parte, respecto a la aplicación de revestimiento, en la tabla 9-2 se han incluido las medias de las cuatro variables obtenidas del análisis estadístico de los datos recogidos de las encuestas y en ella se puede observar que tanto la dureza como la densidad son las variables más valoradas por los expertos para esta aplicación, siendo la resistencia mecánica la que menos importancia tendría.

Variable	Casos	Media	Error est.	Límite Inferior	Límite Superior
Densidad	14	29,2857	3,8802	23,78	34,7914
Dureza	14	38,9286	3,8802	33,4229	44,4342
R.flexión	14	16,0714	3,8802	10,5658	21,5771
R.compresión	14	15,7143	3,8802	28,2733	36,0124

Tabla 9-2 Tabla de medias para el revestimiento con intervalos de confianza del 95%

En el caso de la aplicación para tabique se observan en la tabla 9-3 las medias de las cuatro variables y en este caso los expertos han valorado la resistencia a compresión como la variable más importante, seguida por la densidad. A diferencia del revestimiento en este caso la diferencia entre las medias no es tan grande, aunque como se ha confirmado antes sí que existe diferencia significativa entre ellas.

Variable	Casos	Media	Error est.	Límite Inferior	Límite Superior
Densidad	14	25,0	2,72712	21,1304	28,8696
Dureza	14	20,7143	2,72712	16,8447	24,5838
R.flexión	14	22,1429	2,72712	18,2733	26,0124
R.compresión	14	32,1429	2,72712	28,2733	36,0124

Tabla 9-3 Tabla de medias para el tabique con intervalos de confianza del 95%

Por último, para el falso techo las medias de las cuatro variables se muestran en la tabla 9-4, donde se puede ver cómo la resistencia a flexión es la variable más valorada muy por encima del resto. Al igual que en las otras dos aplicaciones, la densidad es el segundo parámetro más valorado.

Variable	Casos	Media	Error est.	Límite Inferior	Límite Superior
----------	-------	-------	------------	-----------------	-----------------

Densidad	14	27,8571	4,24488	21,834	33,8803
Dureza	14	17,1429	4,24488	11,1197	23,166
R.flexión	14	40,3571	4,24488	34,334	46,3803
R.compresión	14	14,6429	4,24488	8,61972	20,666

Tabla 9-4 Tabla de medias para falsos techos con intervalos de confianza del 95%

9.4 ÍNDICE DE ALIGERAMIENTO ECO-EFICIENTE

El algoritmo final para obtener el índice de aligeramiento eco-eficiente viene dado por las siguientes ecuaciones:

❖ Compuesto aligerado para revestimientos

$$I_{e_e} = 0,29Z_{d_n}^e + 0,397Z_{s_n}^e + 0,16Z_{f_n}^e + 0,16Z_{c_n}^e + 2Z_{t_n}^e + \text{bonificador} \quad [18]$$

❖ Compuesto aligerado para tabiques

$$I_{e_t} = 0,25Z_{d_n}^e + 0,21Z_{s_n}^e + 0,22Z_{f_n}^e + 0,32Z_{c_n}^e + 2Z_{t_n}^e + \text{bonificador} \quad [19]$$

❖ Compuesto aligerado para falsos techos

$$I_{e_{ft}} = 0,28Z_{d_n}^e + 0,17Z_{s_n}^e + 0,40Z_{f_n}^e + 0,15Z_{c_n}^e + 2Z_{t_n}^e + \text{bonificador} \quad [20]$$

Donde,

I_{e_e} es el índice de aligeramiento eco-eficiente para compuestos aligerados de yeso en su aplicación a revestimientos;

I_{e_t} es el índice de aligeramiento eco-eficiente para compuestos aligerados de yeso en su aplicación a tabiques.

$I_{e_{ft}}$ es el índice de aligeramiento eco-eficiente para compuestos aligerados de yeso en su aplicación a falsos techos;

$Z_{d_n}^e$ es el valor de mejora estandarizado de la variable dependiente “densidad” para el compuesto “n”;

$Z_{s_n}^e$ es el valor de mejora estandarizado de la variable dependiente “dureza superficial” para el compuesto “n”;

$Z_{f_n}^e$ es el valor de mejora estandarizado de la variable dependiente “resistencia a flexión” para el compuesto “n”;

$Z_{c_n}^e$ es el valor de mejora estandarizado de la variable dependiente “resistencia a compresión” para el compuesto

$Z_{t_n}^e$ es el valor de mejora estandarizado de la variable dependiente “conductividad térmica” para el compuesto

“n” es un compuesto de yeso aligerado.

La tabla 9-5 muestra los índices de aligeramiento eco-eficiente obtenidos para los resultados de los compuestos de yeso aligerados con residuo de poliestireno extruido y con poliestireno expandido

para cada una de las tres aplicaciones. De acuerdo con estos resultados el compuesto óptimo para la aplicación de revestimientos sería el compuesto 100Y+80A+3XPSm con un índice de 1,79; el compuesto óptimo para la aplicación de tabiques sería el compuesto 100Y+80A+4XPSm con un índice de 1,71 y el compuesto óptimo para la aplicación de falsos techos sería de nuevo el compuesto 100Y+80A+3XPSm con un índice de 1,68.

Serie	Compuesto	I_{er}	I_{et}	I_{eft}
Serie 1	100Y+80A+2XPSm	1,08	0,98	0,88
	100Y+80A+3XPSm	1,79	1,70	1,68
	100Y+80A+4XPSm	1,74	1,71	1,66
Serie 2	100Y+80A+1,5XPSm+0,5XPSf	0,63	0,86	0,71
	100Y+80A+2,25XPSm+0,75XPSf	0,59	0,62	0,60
	100Y+80A+3XPSm+1XPSf	0,62	0,67	0,77
Serie 3	100Y+80A+1XPSm+1XPSf	0,53	0,68	0,62
	100Y+80A+1,5XPSm+1,5XPSf	1,15	1,19	1,23
	100Y+80A+2XPSm+2XPSf	0,57	0,60	0,71
Serie 4	100Y+80A+2XPSg	1,20	1,15	1,13
	100Y+80A+3XPSg	1,56	1,55	1,53
	100Y+80A+4XPSg	1,37	1,21	1,24
Serie 5	100Y+80A+1,5XPSg+0,5XPSf	0,91	1,01	0,92
	100Y+80A+2,25XPSg+0,75XPSf	1,57	1,51	1,51
	100Y+80A+3XPSg+1XPSf	1,13	1,03	1,11
Serie 6	100Y+80A+1XPSg+1XPSf	1,06	1,27	1,29
	100Y+80A+1,5XPSg+1,5XPSf	1,08	1,12	1,13
	100Y+80A+2XPSg+2XPSf	0,73	0,76	0,88
Serie 7	100Y+80A+1EPS	-2,42	-2,39	-2,37
	100Y+80A+2EPS	-1,44	-1,52	-1,60
	100Y+80A+3EPS	-0,44	-0,71	-0,63

Tabla 9-5 Valores de índice de aligeramiento eco-eficiente

9.5 CONCLUSIONES PARCIALES

Los principales parámetros de un yeso aligerado para enlucir son la densidad y la dureza, lo que puede explicarse dada la baja importancia que tienen los parámetros de resistencia en este tipo de aplicación. Respecto a los parámetros de un yeso aligerado para tabiques, los expertos consideran que la resistencia a compresión es el parámetro más importante junto con la densidad. Las piezas para tabique de gran espesor deben aguantar a compresión el peso del resto del tabique, por lo que parece lógico que tanto la densidad como la resistencia a compresión sean los parámetros más valorados para esta aplicación. Por último, para la aplicación en falsos techos, tanto la densidad como la resistencia a flexión son los parámetros más valorados.

Se han obtenido los índices de aligeramiento eco-eficiente para los compuestos de yeso aligerados con residuo de poliestireno extruido y poliestireno expandido y el resultado es que de todos los compuestos analizados, el compuesto óptimo para su aplicación en revestimientos y falsos techos es el compuesto de yeso que incorpora un 3% de residuo de poliestireno extruido medio y para la aplicación en tabiques el compuesto óptimo es el compuesto de yeso con un 4% de residuo de poliestireno extruido medio.

9.6 TRABAJOS CITADOS

Del Río Merino, M., 1999. Elaboración y aplicaciones constructivas de paneles prefabricados de escayola aligerada y reforzada con fibras de vidrio E y otros aditivos (tesis doctoral). Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.

CAPÍTULO 10. ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO POR SIMULACIÓN NUMÉRICA

- 9.1 Cerramiento envolvente vertical**
- 9.2 Cerramiento envolvente horizontal**
- 9.3 Partición interior**
- 9.4 Conclusiones parciales**
- 9.5 Trabajos citados**

CAPÍTULO 10. ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO POR SIMULACIÓN NUMÉRICA

En este capítulo se analizan los resultados obtenidos en el análisis del comportamiento térmico, por simulación numérica, mediante el software STAR_CCM+ con el fin de dar respuesta al objetivo específico número 5.

10.1 CONDICIONES INICIALES DE ENTRADA

El comportamiento térmico se ha estudiado para tres sistemas constructivos:

- Cerramiento envolvente vertical
- Cerramiento envolvente horizontal
- Partición interior

En cada uno de los casos anteriores se ha definido un modelo, llamado de referencia, constituido de acuerdo con la metodología empleada por Porras Amores et al. (Porras Amores, et al., 2014).

Para cada uno de los modelos de referencia se han establecido otros modelos denominados escenarios, en los que se sustituye uno o varios elementos constructivos del modelo de referencia por alguna de las aplicaciones de los compuestos de yeso aligerado con residuo de poliestireno extruido. En la tabla 10-1 se muestran los datos de espesor, densidad, coeficiente de conductividad térmica y calor específico de cada aplicación para su compuesto óptimo (obtenido en el capítulo 9). Los datos de conductividad térmica y calor específico son los que se han obtenido con el equipo C-Therm TCI. Además, a cada aplicación se le ha dado una denominación.

Aplicación	Compuesto óptimo	Densidad (g/cm ³)	C. conductividad térmica (W/mK)	Calor específico (J/kgK)	Denominación
Revestimiento de aplicación manual sobre soporte rígido	100Y+80A+3XPSm	0,840	0,236	1.058,14	Revestimiento y_w
Placas de yeso machihembradas para aplicación en trasdosados/particiones	100Y+80A+4XPSm	0,730	0,207	1.238,32	Placa y_w
Paneles de yeso para falso techo sobre subestructura metálica	100Y+80A+3XPSm	0,730	0,236	1.058,14	Panel y_w

Tabla 10-1 Datos de partida de cada aplicación

10.2 CERRAMIENTO ENVOLVENTE VERTICAL

El cerramiento para envolvente vertical denominado referencia 1 está compuesto por medio pie de ladrillo cara vista, un enfoscado, cámara de aire, aislamiento térmico, un trasdosado de ladrillo hueco doble (LHD) y un revestimiento (véase figura 10-1). Sobre este cerramiento se van a analizar tres escenarios, tal como se muestra en la tabla 10-2. En el primer escenario se sustituye el trasdosado de LHD por la placa y_w , en el segundo escenario se sustituye el revestimiento por un revestimiento y_w y en el tercer escenario se sustituyen el trasdosado de LHD por la placa y_w y el revestimiento por un revestimiento y_w .

Figura 10-1 Sección cerramiento envolvente vertical modelo referencia

Modelo	1ª capa	2ª capa	3ª capa	4ª capa	5ª capa	6ª capa
Referencia 1	Ladrillo CV	Enfoscado	Aislamiento	Cámara de aire	LHD	Revestimiento
Escenario 1.1	Ladrillo CV	Enfoscado	Aislamiento	Cámara de aire	Placa y_w	Revestimiento
Escenario 1.2	Ladrillo CV	Enfoscado	Aislamiento	Cámara de aire	LHD	Revestimiento y_w
Escenario 1.3	Ladrillo CV	Enfoscado	Aislamiento	Cámara de aire	Placa y_w	Revestimiento y_w

Tabla 10-2 Escenarios para cerramiento vertical

Para la simulación se ha realizado previamente la geometría del cerramiento, que se ha representado con una superficie de 1 m^2 y con los espesores correspondientes a cada material. A continuación a cada material sólido se le ha asignado el siguiente modelo:

- Constant density
- Segregated solid energy
- Steady
- Solid
- Gradients
- Three dimensional

Mientras que para la cámara de aire al ser un gas se ha seleccionado el siguiente:

- Segregated fluid temperature
- Constant density
- Laminar
- Segregated flow
- Gas
- Steady
- Gradients

- Three dimensional

Una vez seleccionados los modelos, a cada material sólido se le han introducido sus principales parámetros de densidad, coeficiente de conductividad térmica y calor específico. A continuación se ha realizado un mallado tetraédrico (véase figura 10-2) y se han asignado las siguientes condiciones de temperatura:

- Que la temperatura superficial exterior es de 5°C
- Que a la superficie interior le llega una energía de 7,5 W/m²
- Que el resto de las caras son adiabáticas

Figura 10-2 Mallado tetraédrico

Completada la simulación para la referencia y para cada escenario se presentan en la siguiente tabla los resultados para la temperatura interior y la diferencia térmica con respecto al modelo de referencia. Como puede observarse, térmicamente la mejor opción es claramente la combinación de la modificación del trasdosado y el revestimiento, con la que se consigue una diferencia térmica de casi 1°C.

Escenario	Condiciones de partida		Simulación	Diferencia térmica
	Temperatura exterior	Flujo de calor interior	Temperatura interior	
Referencia 1	5°C	7,5 W/m ²	28,28°C	-
Escenario 1.1			28,80°C	+0,52°C
Escenario 1.2			28,49°C	+0,21°C
Escenario 1.3			29,01°C	+0,73°C

Tabla 10-3 Resultados obtenidos para la simulación del cerramiento en envolvente vertical

En la figura 10-3 se muestra el flujo de calor a través de todas las capas del cerramiento de envolvente vertical para el modelo referencia y los tres escenarios, donde puede observarse especialmente en los escenarios 1.1 y 1.3, cómo al cambiar el ladrillo hueco doble por la placa y_w se produce un cambio de tonalidad que refleja cómo la placa y_w tiene una resistencia al paso de la temperatura más alta que el LHD.

Figura 10-3 Representación de izquierda a derecha del flujo de calor para los modelos referencia y los escenarios 1.1, 1.2 y 1.3 del cerramiento envolvente vertical

Por otra parte, si se analiza la energía necesaria para obtener en el escenario 1.3 la temperatura obtenida en el modelo referencia, es decir 28,28°C. Se observa que en lugar de 7,5 W/m², se necesitan 7,49 W/m² (véase figura 10-4). Por lo que la diferencia energética es prácticamente inapreciable.

Figura 10-4 Representación del flujo de calor en el modelo de referencia con la temperatura interior del escenario 1.3

10.3 CERRAMIENTO ENVOLVENTE HORIZONTAL

Se propone un cerramiento para envolvente horizontal denominado referencia 2 y compuesto por lámina impermeable autoprottegida, geotextil, aislamiento térmico, barrera de vapor, formación de pendiente, forjado, cámara de aire y falso techo de paneles de escayola (véase figura 10-5). Sobre este cerramiento se va a analizar un único escenario tal como se muestra en la tabla 10-4. En este escenario se sustituye el falso techo de escayola por el panel y_w .

Figura 10-5 Sección cerramiento envolvente horizontal modelo referencia

Referencia 2	Forjado	Cámara de aire	Falso techo
Escenario 2.1	Forjado	Cámara de aire	Panel y_w

Tabla 10-4 Escenarios para cerramiento horizontal

Para la simulación se ha realizado previamente la geometría del cerramiento, que se ha representado con una superficie de 1 m^2 y con los espesores correspondientes a cada material. A continuación a cada material sólido se le ha asignado el siguiente modelo:

- Constant density
- Segregated solid energy
- Steady
- Solid
- Gradients
- Three dimensional

Mientras que para la cámara de aire al ser un gas se ha seleccionado el siguiente:

- Segregated fluid temperature
- Constant density
- Laminar
- Segregated flow
- Gas
- Steady
- Gradients
- Three dimensional

Una vez seleccionados los modelos, a cada material sólido se le han introducido sus principales parámetros de densidad, coeficiente de conductividad térmica y calor específico. A continuación se ha realizado un mallado tetraédrico (véase figura 10-6) y se han asignado las siguientes condiciones de temperatura:

- Que la temperatura superficial exterior es de 5°C
- Que a la superficie interior le llega una energía de 3 W/m^2
- Que el resto de las caras son adiabáticas

Figura 10-6 Mallado tetraédrico

Completada la simulación para la referencia y para el escenario se presentan en la siguiente tabla los resultados para la temperatura interior y la diferencia térmica con respecto al modelo de referencia. Como puede observarse, la diferencia térmica no es representativa, por tanto no se ha realizado el análisis energético.

Escenario	Condiciones de partida		Simulación	Diferencia térmica
	Temperatura exterior	Flujo de calor interior	Temperatura interior	
Referencia 2	5°C	3 W/m ²	28,07°C	-
Escenario 2.1			28,08°C	+0,01°C

Tabla 10-5 Resultados obtenidos para la simulación del cerramiento en envolvente horizontal

En la figura 10-7 se muestra el flujo de calor a través de todas las capas del cerramiento de envolvente horizontal para el modelo referencia y el escenario, donde puede observarse cómo no existe prácticamente diferencia entre el comportamiento de ambos modelos.

Figura 10-7 Representación del flujo de calor para los modelos referencia (izda.) y el escenario 2.1 (derecha) del cerramiento envolvente horizontal

10.4 PARTICIÓN INTERIOR

Se propone una partición denominada referencia 3 y compuesta por un revestimiento, ladrillo hueco doble y otro revestimiento (véase figura 10-5). Sobre esta partición se van a analizar tres escenarios tal como se muestra en la tabla 10-6. En el primer escenario se sustituyen los revestimientos por un revestimiento y_w , en el segundo escenario se sustituye el ladrillo hueco doble por una placa y_w y en el tercer escenario se sustituyen tanto los revestimientos como el ladrillo hueco doble.

Figura 10-8 Sección partición interior modelo referencia

Referencia 3	Revestimiento	LHD	Revestimiento
Escenario 3.1	Revestimiento y_w	LHD	Revestimiento y_w
Escenario 3.2	Revestimiento	Placa y_w	Revestimiento
Escenario 3.3	Revestimiento y_w	Placa y_w	Revestimiento y_w

Tabla 10-6 Escenarios para particiones

Para la simulación se ha realizado previamente la geometría de la partición, que se ha representado con una superficie de 1 m^2 y con los espesores correspondientes a cada material. A continuación a cada material se le ha asignado el siguiente modelo:

- Constant density
- Segregated solid energy
- Steady
- Solid
- Gradients
- Three dimensional

Una vez seleccionados los modelos, a cada material sólido se le han introducido sus principales parámetros de densidad, coeficiente de conductividad térmica y calor específico. A continuación se ha realizado un mallado tetraédrico (véase figura 10-9) y se han asignado las siguientes condiciones de temperatura:

- Que la temperatura superficial a la derecha es de 22°C
- Que a la superficie izquierda le llega una energía de $7,5 \text{ W/m}^2$
- Que el resto de las caras son adiabáticas

Figura 10-9 Mallado tetraédrico de la partición

Completada la simulación para la referencia y para cada escenario se presentan en la siguiente tabla los resultados para la temperatura interior y la diferencia térmica con respecto al modelo de referencia. Como puede observarse, térmicamente la mejor opción es claramente la combinación de la modificación del trasdosado y el revestimiento, con la que se consigue una diferencia térmica de casi 2°C.

Escenario	Condiciones de partida		Simulación	Δ temperatura con respecto a referencia
	Flujo de calor	Temperatura	Temperatura izquierda	
Referencia 3	7,5 W/m ²	22°C	25,07°C	-
Escenario 3.1			25,46°C	+0,39°C
Escenario 3.2			26,48°C	+1,41°C
Escenario 3.3			26,88°C	+1,81°C

Tabla 10-7 Resultados obtenidos para la simulación de la partición

En la figura 10-10 se muestra el flujo de calor a través de todas las capas de la partición interior para el modelo referencia y el escenario, donde puede observarse especialmente la diferencia producida en el escenario 3.3, ya que la diferencia térmica es más alta que en los otros modelos. Para el resto de escenarios la diferencia no es observable a simple vista.

Figura 10-10 Representación de izquierda a derecha del flujo de calor para la referencia y los escenarios de la partición interior

Por otra parte, si se analiza la energía necesaria para obtener en el escenario 3.3 la temperatura obtenida en el modelo referencia, es decir 25,07°C. Se observa que en lugar de 7,5 W/m², se necesitan 6,07 W/m² (véase figura 10-11). Por lo que la diferencia energética es de 1,43 W/m².

Figura 10-11 Representación del flujo de calor en el modelo de referencia con la temperatura interior del escenario 1.3

10.5 CONCLUSIONES PARCIALES

El uso de este nuevo material reduce la pérdida de calor producida por el intercambio de temperaturas entre el interior y el exterior.

En el caso del cerramiento vertical el diferencial térmico es de casi 1°C, lo que no supone una diferencia energética destacable. Sin embargo, para la partición interior el diferencial térmico es de casi 2°C, lo que supondría una diferencia energética entre un modelo y otro de 1,43 W/m².

10.6 TRABAJOS CITADOS

Porras Amores, C., Viñas Arrebola, C., Rodríguez Sánchez, A. & Villoria Sáez, P., 2014. Assessing the potential use of strategies independent from the architectural design to achieve efficient ventilation: A Spanish case study. Building Services Engineering Research and Technology, 35(5), pp. 529-542.

CAPÍTULO 11 CONCLUSIONES

CAPÍTULO 11. CONCLUSIONES

El impacto ambiental del sector de la construcción destaca por el gran consumo de energía que supone la demanda de calefacción y refrigeración de los edificios. Sin embargo, la normativa está imponiendo valores cada vez más restrictivos con respecto a la demandad energética, lo que se está traduciendo en un incremento en el uso de materiales aislantes térmicos. Por otra parte, también supone un elevado impacto ambiental la elevada generación de residuos y en este caso la normativa también es cada vez más restrictiva para los residuos de construcción y demolición, sobre los que se espera que se aumente el porcentaje de reciclaje o reutilización. Y en este sentido, destaca el poliestireno extruido, ya que es uno de los materiales aislantes térmicos que más se están utilizando últimamente y cuyos residuos van en un gran porcentaje directamente a vertedero.

Por último, otra causa de impacto ambiental del sector de la construcción son los materiales tradicionales que siguen empleándose en este sector, que además de contribuir al agotamiento de materias primas no aportan ninguna mejora ambiental, sino que además perjudican al medio ambiente. Como por ejemplo el elevado impacto ambiental que supone la extracción del yeso por la explotación de las canteras. En este caso, para reducir el consumo de yeso es posible sustituirlo parcialmente por agregados ligeros, que además pueden aportar una mejora al comportamiento térmico del yeso.

Existen numerosos estudios de investigación que analizan la incorporación de agregados en compuestos de yeso para mejorar alguna de sus propiedades. Sin embargo, sigue siendo escasa la información encontrada sobre el uso de residuos como agregados y sobre todo residuos procedentes de construcción y demolición. De hecho, hay residuos como el procedente del poliestireno extruido sobre el que no se ha encontrado ninguna opción de reutilización.

Por todo ello, en esta Tesis Doctoral se ha fijado como objetivo el ayudar a reducir el impacto ambiental del sector residencial y el desarrollo de un yeso de cuarta generación mediante el diseño de un nuevo material eco-eficiente a partir de un compuesto de yeso al que se le incorpora residuo de poliestireno extruido proveniente de obras de construcción, con el propósito de obtener un material aligerado con propiedades térmicas mejoradas a la vez que se reutiliza un residuo de construcción que de otra forma sería eliminado en vertedero o incinerado.

A continuación se presentan las conclusiones para cada objetivo específico establecido, de acuerdo con la metodología desarrollada y los resultados obtenidos.

11.1 CONCLUSIONES AL OBJETIVO 1

A continuación se muestran las conclusiones alcanzadas para el objetivo específico 1 “caracterizar los residuos de poliestireno extruido”:

- El residuo obtenido mediante el procedimiento de segregación propuesto en esta Tesis Doctoral tiene un tamaño excesivo para su incorporación en compuestos de yeso, por tanto debe ser triturado y tamizado.
- Se han seleccionado tres posibles granulometrías del residuo de poliestireno extruido: gruesa (4-6 mm), media (2-4 mm) y fina (1-2 mm).

11.2 CONCLUSIONES AL OBJETIVO 2

A continuación se muestran las conclusiones alcanzadas para el objetivo específico 2 “Caracterizar los compuestos de yeso aligerados con residuo de poliestireno extruido”:

- El máximo porcentaje de residuo de poliestireno extruido que admite una matriz de yeso es un 4%.
- Los compuestos de yeso aligerado con residuo de poliestireno extruido necesitan más agua de amasado para asegurar una consistencia óptima y tienen un tiempo de fraguado ligeramente menor que la referencia.
- La cohesión en la interfase entre el yeso y el residuo de poliestireno extruido es adecuada y se ha confirmado una buena adherencia interna entre ambos, ya que parte de la matriz de yeso se adhiere a las paredes del residuo.
- Al incorporar residuo de poliestireno extruido la densidad de un compuesto de yeso puede llegar a reducirse hasta en un 43%.
- Se ha confirmado que la reducción de densidad conlleva una pérdida de resistencia mecánica y de dureza y adherencia superficial, aunque se ha comprobado que se cumplen todos los requerimientos mínimos exigidos por la normativa, excepto el de resistencia a compresión y dureza superficial para los compuestos con un 4% de residuo.
- No parece haber diferencia significativa en los resultados entre la granulometría media o gruesa, pero sí existen diferencias en los resultados al incorporar finos.
- La absorción de agua por capilaridad se reduce con la incorporación del residuo, consiguiendo mejorar este parámetro hasta en un 60% con los porcentajes más altos de residuo.
- La adición de residuos de poliestireno extruido reduce el coeficiente de conductividad térmica hasta en un 43% con respecto a la referencia.
- El residuo de poliestireno extruido no aporta una mejora en el coeficiente de absorción acústica de un compuesto de yeso.
- En general se ha podido establecer que el factor que más influye en los parámetros de los compuestos de yeso con poliestireno extruido es el porcentaje de agregado, y solo en algunas propiedades afecta también la granulometría y la incorporación de finos a la mezcla.

11.3 CONCLUSIONES AL OBJETIVO 3

A continuación se muestran las conclusiones alcanzadas para el objetivo específico 3 “Comparar los resultados obtenidos al caracterizar los compuestos de yeso aligerados con residuo de poliestireno extruido con los resultados obtenidos al aligerar el yeso con otros agregados ligeros”:

- En general, al incorporar agregados ligeros aumenta la relación a/y y disminuye el tiempo de fraguado. Sin embargo, en otras ocasiones el efecto es el contrario, como ocurre con el gel de sílice que aumenta el tiempo de fraguado de la mezcla (Khalil, et al., 2013) o el caucho que inicialmente retiene agua, lo que permite que la hidratación del yeso sea más lenta y por tanto el tiempo de fraguado sea mayor (Herrero, et al., 2013).

- Con el poliestireno expandido se consigue reducir más la densidad que con el residuo de poliestireno extruido, pero en comparación con otros agregados ligeros la densidad obtenida con el residuo de poliestireno extruido se encuentra en la media.
- La reducción de densidad conlleva pérdidas de resistencia, dureza y adherencia superficial.
- Si se relaciona la densidad con los parámetros de resistencia, los compuestos con residuo de poliestireno extruido se encuentran entre los que mejor resultados obtienen para la dureza superficial, la resistencia a flexión y la adherencia superficial.
- En general con los agregados ligeros se reduce la absorción de agua por capilaridad, destacando especialmente el valor obtenido con el residuo de poliestireno extruido.
- La mejora del comportamiento aislante térmico del yeso obtenida al incorporar residuo de poliestireno extruido se encuentra en la media de los resultados generales obtenidos con otros agregados ligeros y por encima de los valores obtenidos con el poliestireno expandido.
- Por último, ni el residuo de poliestireno extruido ni el poliestireno expandido ayudan a reducir el coeficiente de absorción acústica, dado que su estructura celular es de celda cerrada.

11.4 CONCLUSIONES AL OBJETIVO 4

A continuación se muestran las conclusiones alcanzadas para el objetivo específico 4 “Desarrollar un índice de aligeramiento eco-eficiente para valorar los compuestos de yeso aligerados por sus propiedades físicas y por su eco-eficiencia”:

- Los principales parámetros de un yeso aligerado para enlucir son la densidad y la dureza, mientras que para tabiques son la resistencia a compresión y la densidad y para la aplicación en falsos techo son la densidad y la resistencia a flexión.
- El compuesto óptimo para su aplicación en revestimientos y falsos techos es el compuesto de yeso que incorpora un 3% de residuo de poliestireno extruido medio y para la aplicación en tabiques el compuesto óptimo es el compuesto de yeso con un 4% de residuo de poliestireno extruido medio.

11.5 CONCLUSIONES AL OBJETIVO 5

A continuación se muestran las conclusiones alcanzadas para el objetivo específico 5 “Analizar el comportamiento térmico de los compuestos de yeso aligerados con residuo de poliestireno extruido en su aplicación en distintos sistemas constructivos mediante simulación numérica”:

- El uso de este nuevo material reduce la pérdida de calor producida por el intercambio de temperaturas entre el interior y el exterior.
- En el caso del cerramiento vertical se consigue una diferencia térmica de casi 1°C, lo que no supone una diferencia energética destacable. Sin embargo, para la partición interior la diferencia térmica es de casi 2°C, lo que supone una diferencia energética de 1,43 W/m².

CHAPTER 11. CONCLUSIONS

The environmental impact of the construction sector stands out because of the high heating and cooling energy consumption. However, new regulations are imposing more restrictive values with respect to energy demand, which is translating into an increase in the use of thermal insulation materials. On the other hand, it is also an important environmental impact the high generation of waste and in this case there also regulations trying to control construction and demolition waste to increase recycling rate. And in this sense, the extruded polystyrene is outstanding, since it is one of the thermal insulation materials that are most used lately and whose waste is mostly disposed in landfill.

Finally, another cause of environmental impact of the construction sector are the traditional materials, that continue to be used in this sector, which in addition to contribute to the exhaustion of raw materials, they also harm the environment. As for example the high environmental impact of the extraction of gypsum from quarries. In this case, to reduce the consumption of gypsum it is possible to partially replace it with lightweight aggregates, which can also provide an improvement to the thermal behaviour of gypsum.

There are many research studies that analyse the incorporation of aggregates in gypsum composites to improve some of their properties. However, there is still little information on the use of waste as aggregates to improve gypsum properties and, in particular, construction and demolition waste. In fact, there is waste, such as extruded polystyrene waste, on which no reuse option has been found.

Therefore, the objective of this Thesis is to help reducing the environmental impact of the building sector and the development of a new generation of gypsum products, by designing a new eco-efficient material made of gypsum with extruded polystyrene waste, with the purpose of reusing a construction waste, that would otherwise be disposed of in landfill or incinerated and at the same time obtain a lightweight material with improved thermal properties.

In the next sections the conclusions for each specific objective are established, according to the methodology developed and the results obtained.

11.1 CONCLUSIONS OF OBJECTIVE 1

The following are the conclusions for the specific objective number 1 "Characterization of extruded polystyrene waste":

- The waste obtained by using this procedure has an excessive size for its use in gypsum composites and it has had to be transformed to obtain a smaller particle size.
- Three particle sizes of extruded polystyrene waste have been selected: large (4-6 mm), medium (2-4 mm) and small (1-2 mm).
- Extruded polystyrene waste has a similar density than the material itself and it also has a closed cell structure.

11.2 CONCLUSIONS OF OBJECTIVE 2

The following are the conclusions for the specific objective number 2 "Characterization of lightweight gypsum composites made with extruded polystyrene waste":

- The maximum percentage of extruded polystyrene waste that can be incorporated in a gypsum matrix is 4%.
- Composites with extruded polystyrene waste require a higher amount of water to ensure the same consistency and have a shorter setting time.
- The cohesion at the interface between the gypsum and the extruded polystyrene waste is adequate and a good internal adhesion has been confirmed between both of them, since part of the gypsum matrix adheres to the walls of the waste.
- Density of gypsum composites can be reduced up to 43% by incorporating extruded polystyrene waste.
- The reduction of density involves a loss of mechanical strength, surface hardness and surface adhesion. Despite this loss of strength the minimum requirements set in the established Standards are met all except for compression strength and surface hardness for the composites with a 4% of waste.
- There does not appear to be a significant difference in the results between the medium or large particle size, but there are differences in the results when incorporating fines.
- Capillary water absorption is reduced with the incorporation of waste up to 60%.
- The progressive incorporation of a higher percentage of waste involves a reduction of thermal conductivity coefficient up to 43%.
- The incorporation of extruded polystyrene waste does not improve acoustic absorption coefficient.
- From the statistical analysis it has been established that the most influential factor for gypsum composites with extrude polystyrene waste is the percentage of waste, since the particle size and the mixture of granulometries only slightly affect some properties.

11.3 CONCLUSIONS TO OBJECTIVE 3

The results obtained for the specific objective 3 "comparison of results obtained by characterizing the lightweight gypsum composites with extruded polystyrene waste with the results obtained with other lightweight gypsum composites":

- We have found nine references of lightened gypsum composites with light aggregates that are not waste and six references of lightweight gypsum composites with waste, with enough data to make a comparative analysis.
- A composite with expanded polystyrene beads with particle size between 4 and 6mm has been characterized to complete the comparative analysis.
- In general, the addition of lightweight aggregates increase the amount of water for the same consistency and reduce the setting time. However, other times happens the opposite, silica gel increases the setting time of the mixture (Khalil, et al., 2013) and rubber, that initially retains water, achieve a higher setting time (Herrero, et al., 2013).
- Gypsum composites with expanded polystyrene have a higher reduction of density than those with extruded polystyrene waste., but in comparison with other lightweight aggregates, the density obtained with extruded polystyrene waste is in the average.
- The reduction of density involves a decrease of strength, surface hardness and surface adhesion.
- If density is related to the mechanical parameters, the composites with extruded polystyrene waste are among the best results obtained for surface hardness, flexural strength and surface adhesion.

- With the use of lightweight aggregates capillary water absorption decreases, but it can be highlighted that the use of extruded polystyrene waste achieves remarkable reduction of this property.
- In comparison with other lightweight aggregates the thermal improvement obtained with extruded polystyrene waste is in the average, but it is above the values obtained with expanded polystyrene.
- Finally, neither extruded polystyrene waste nor expanded polystyrene help to reduce the acoustic absorption coefficient, since their cell structure is closed.

11.4 CONCLUSIONS TO OBJECTIVE 4

The following are the conclusions reached for the specific objective 4: "to develop an index to evaluate lightweight gypsum composites by their physical properties and their eco-efficiency":

- The main parameters of a lightweight gypsum for plastering are density and surface hardness, while for wall applications the most important parameters are compressive strength and density and for the application in false ceilings the most important parameters are density and flexural strength.
- The optimal composite for plastering and false ceilings applications is the one that incorporates 3% of extruded polystyrene waste and for the application in walls the optimal composite is the one that incorporates 4% of extruded polystyrene waste.

11.5 CONCLUSIONS TO OBJECTIVE 5

The following are the conclusions for the specific objective number 5 "to analyse the thermal behaviour of the optimal gypsum composites with extruded polystyrene waste used in different building systems by numerical simulation:

- The use of this new material reduces the loss of heat produced by the exchange of temperatures between the indoor and outdoor environment.
- In vertical envelope systems temperature can be increased up to 1°C, which does not involve any saving. However, the improvement obtained in the application for interior walls represents up to 2°C, which means a possible energy saving of 1.43 W/m².

CAPÍTULO 12 FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

CAPÍTULO 12. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Como consecuencia de la investigación realizada y de las conclusiones obtenidas, se proponen las siguientes líneas de investigación:

- Analizar el comportamiento del residuo de poliestireno extruido en otros materiales como el mortero de cemento o el hormigón.
- Calcular la cantidad de yeso que se ahorra al incorporar el residuo, analizar el ciclo de vida del compuesto y finalmente establecer la repercusión económica del nuevo material eco-eficiente en comparación con un yeso aligerado con otro tipo de agregado ligero utilizado comercialmente como la perlita.
- Analizar el comportamiento frente al fuego de los compuestos con residuo de poliestireno extruido.
- Validar el modelo de simulación mediante la caracterización de alguna de las aplicaciones propuestas.
- Estudiar el acabado superficial del nuevo compuesto de yeso mediante ensayo visual sobre el color, textura, etc.
- Analizar el refuerzo de los compuestos de yeso aligerados con residuo de poliestireno extruido mediante el empleo de otros residuos de construcción y demolición.

BIBLIOGRAFÍA

- AENOR, 1995. UNE-EN ISO 10211-1:1995 Puentes térmicos en edificación. Madrid: s.n.
- AENOR, 1995. UNE-EN ISO 140-3:1995 Acústica. Medición del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte 3. Madrid: s.n.
- AENOR, 1999. UNE-EN 1097-3 Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 3: Determinación de la densidad aparente y la porosidad. Madrid: AENOR.
- AENOR, 2000. UNE-EN 12114:2000 Prestaciones térmicas de los edificios. Permeabilidad al aire de componentes y elementos de los edificios. Método de ensayo de laboratorio. Madrid: s.n.
- AENOR, 2000. UNE-EN 12524:2000 Materiales y productos para la edificación. Propiedades higrótérmicas. Valores de diseño tabulados. Madrid: s.n.
- AENOR, 2002. UNE-EN 12664:2002 Materiales de construcción. Determinación de la resistencia térmica por el método de la placa caliente guardada y el método del medidor del flujo de calor. Productos secos y húmedos de baja y media resistencia térmica.. Madrid: s.n.
- AENOR, 2002. UNE-EN 12667:2002 Materiales de construcción. Determinación de la resistencia térmica por el método de la placa caliente guardada y el método del medidor de flujo de calor. Productos de alta y media resistencia térmica. Madrid: s.n.
- AENOR, 2002. UNE-EN ISO 12572:2002 Hygrothermal performance of building materials and products - Determination of water vapour transmission properties. Madrid: s.n.
- AENOR, 2004. UNE-EN ISO 354:2004 Acústica. Medición de la absorción acústica en una cámara reverberante. Madrid: s.n.
- AENOR, 2007. UNE-EN 14246:2007 Placas de escayola para techos suspendidos. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo. Madrid: s.n.
- AENOR, 2007. UNE-EN 1936:2007 Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la densidad real y aparente y de la porosidad abierta y total.. Madrid: AENOR.
- AENOR, 2008. UNE-EN 13964:2006/A1:2008 Techos suspendidos. Requisitos y métodos de ensayo. Madrid: s.n.
- AENOR, 2009. RP 35.01 Yesos para la construcción (B1) YG, YG/L, YPM. Madrid: s.n.
- AENOR, 2009. RP 35.02 Conglomerantes a base de yeso para la construcción (A) E30, E30/L, E35, E35/L e YP. Madrid: s.n.
- AENOR, 2009. RP 35.03 Yesos de construcción aligerados (B4) YA, YPM/A. Madrid: s.n.
- AENOR, 2009. UNE-EN 13279-1:2009 Yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción. Parte 1: Definiciones y especificaciones. Madrid: s.n.
- AENOR, 2009. UNE-EN 15318 Diseño e instalación de paneles de yeso. Madrid: s.n.
- AENOR, 2010. Aditivos para hormigones, morteros y pastas. Parte 2: Aditivos para hormigones. Definiciones, requisitos, conformidad, marcado y etiquetado. Madrid: s.n.
- AENOR, 2010. UNE-EN 13501-1:2007+A1:2010 Clasificación en función del comportamiento frente al fuego de los productos de construcción y elementos para la edificación. Parte 1: Clasificación a partir de datos obtenidos en ensayos de reacción al fuego.. Madrid: s.n.
- AENOR, 2010. UNE-EN 13501-2:2009+A1:2010 Clasificación en función del comportamiento frente al fuego de los productos de construcción y elementos para la edificación. Parte 2. Madrid: s.n.
- AENOR, 2010. UNE-EN 520:2005+A1:2010 Placas de yeso laminado. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo. Madrid: s.n.
- AENOR, 2011. UNE-EN 1998-1:2011 Eurocódigo 8: Proyecto de estructuras sismorresistentes. Parte 1: Reglas generales. Madrid: s.n.

- AENOR, 2012. UNE-EN 12859:2012 Paneles de yeso. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo. Madrid: s.n.
- AENOR, 2012. UNE-EN 933-1:2012 Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Madrid: s.n.
- AENOR, 2012. UNE-EN ISO 6946:2012 Componentes y elementos para la edificación. Resistencia térmica y transmitancia térmica. Método de cálculo. Madrid: s.n.
- AENOR, 2013. UNE-EN ISO 717-1:2013 Acústica. Evaluación del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte 1. Madrid: s.n.
- AENOR, 2014. UNE-EN 102042:2014 Yesos y escayolas de construcción. Otros métodos de ensayo. Madrid: AENOR.
- AENOR, 2014. UNE-EN 13279-2:2014 Yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción. Parte 2: Métodos de ensayo. Madrid: AENOR.
- Agulló, L., Aguado, A. & García, T., 2006. Study of the use of paper manufacturing waste in plaster composite mixtures. *Building and environment*, 41(6), pp. 821-827.
- AIPEX, 2014. Asociación Ibérica de Poliestireno extruido. [En línea] Disponible en: <http://www.aipex.es/> [Último acceso: 11 febrero 2014].
- Alcaide Tur, Á., 2012. Residuos sólidos urbanos, una consecuencia de la vida. Castellón: Universitat Jaume I.
- Algiss Uralita, 2014. Perla - Yeso manual con perlita. [En línea] Disponible en: www.algiss.es [Último acceso: noviembre 2014].
- Algiss Uralita, 2014. Yeso de proyección aligerado. [En línea] Disponible en: www.algiss.es [Último acceso: octubre 2014].
- Álvarez, C., 2010. La bandeja blanca de poliestireno. [En línea] Disponible en: <http://blogs.elpais.com/eco-lab/2010/10/la-bandeja-blanca-de-poliestireno.html> [Último acceso: 11 febrero 2014].
- Ambientum, 2014. Impacto ambiental de los plásticos. [En línea] Disponible en: http://www.ambientum.com/revista/2001_24/2001_24_SUELOS/MPCTPLST1.htm [Último acceso: 12 febrero 2014].
- ANAIP, 2014. Asociación Española de Industriales de Plásticos. [En línea] Disponible en: <http://www.anaip.es/> [Último acceso: 10 febrero 2014].
- Anink, D., Boonstra, C. & Mak, J., 1996. Handbook of Sustainable Building. An Environmental Preference Method for Selection of Materials for Use in Construction and Refurbishment. Londres: s.n.
- Arikan, M. & Sobolev, K., 2002. The optimization of a gypsum-based composite material. *Cement and concrete research*, 32(11), pp. 1725-1728.
- Asaad, J. & Tawfik, S., 2011. Polymeric composites based on polystyrene and cement dust wastes. *Materials & Design*, 32(10), pp. 5113-5119.
- ATEDY, 2014. Manual de ejecución de revestimientos de yeso. Madrid: Atedy.
- Australian Government, 2012. Construction and demolition waste guide recycling and re-use across the supply chain. Australia: s.n.
- Baoshan, J., 1999. Air-entraining high strength gypsum block. s.l. Patente nº CN2345618 (Y).
- Baspinar, M. S. & Kahraman, E., 2011. Modifications in the properties of gypsum construction element via addition of expanded macroporous silica granules. *Construction and Building Materials*, 25(8), pp. 3327-3333.

- Begum, R. A., Siwar, C., Pereira, J. & Jaafar, A., 2007. Implementation of waste management and minimisation in the construction industry of Malaysia. *Resources, Conservation and Recycling*, 51(1), pp. 190-202.
- Bolden, J., Abu-Lebdeh, T. & Fini, E., 2013. Utilization of recycled and waste materials in various construction applications. *American Journal of Environmental Sciences*, 9(1), pp. 14-24.
- Borreguero, A. M. et al., 2010. Improvement of the thermal behaviour of gypsum blocks by the incorporation of microcapsules containing PCMS obtained by suspension polymerization with and optimal core/coating mass ratio. *Applied Thermal Engineering*, 30(10), pp. 1164-1169.
- Bosco Hernandez-Zaragoza, J. y otros, 2013. Cellular Concrete Bricks with Recycled Expanded Polystyrene Aggregate. *Advances in Materials Science & Engineering*, p. 160162 (5 pp.).
- Cámaras Oficiales de Comercio, I. y. N., 2006. Cámara Santiago Compostela. [En línea] Disponible en: <http://www.camaracompostela.com/index.asp?ind=4A0&p=36>
- Carvalho, M. A. et al., 2008. Microstructure and Mechanical Properties of Gypsum Composites Reinforced with Recycled Cellulose Pulp. *Materials Research*, 11(4), pp. 391-397.
- CEDEX, 2012. Catálogo de Residuos utilizables en la construcción. [En línea] Disponible en: <http://www.cedexmateriales.vsf.es/view/catalogo.aspx> [Último acceso: 10 marzo 2014].
- Cherki, A. A.-b. y otros, 2014. Experimental thermal properties characterization of insulating cork-gypsum composite. *Construction and Building Materials*, Volumen 54, pp. 202-209.
- CNE, 2013. Comisión Nacional de Energía. [En línea] Disponible en: <http://www.cne.es/>
- Comisión Nacional de Energía, 1997. Ley 54/1997, de 27 de noviembre, del sector eléctrico. Madrid: s.n.
- Consejería de Medio Ambiente y Ordenación, 2006. Estrategia de residuos de la Comunidad de Madrid (2006-2016). Madrid: s.n.
- Coutts, R., 1991. Wastepaper fibers in plaster products. *Materials Science Letters*, 10(2), pp. 77-78.
- Cowan, H., 1977. History of masonry and concrete domes in building construction. *Building and Environment*, Volumen 12, pp. 1-24.
- Dalmay, P. et al., 2010. Properties of cellulosic fibre reinforced plaster: influence of hemp or flax fibres on the properties of set gypsum. *J Mater Sci*, Volume 45, pp. 793-803.
- Danosa, 2014. Danolosa-Aislamiento térmico. [En línea] Disponible en: www.danosa.es [Último acceso: 27 febrero 2014].
- Del Río Merino, M., 1999. Elaboración y aplicaciones constructivas de paneles prefabricados de escayola aligerada y reforzada con fibras de vidrio E y otros aditivos (tesis doctoral). Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- Del Río Merino, M. & Comino, P., 2001. Influencia del grado de dispersabilidad de la fibra de vidrio E en el comportamiento mecánico y la trabajabilidad de la escayola. *Materiales de construcción*, 51(261), pp. 33-44.
- Del Río Merino, M., Domínguez, J. D. & Hernández Olivares, F., 1998. Escayola aligerada con sólidos celulares. *Informes de la construcción*, 50(458), pp. nov-dic.
- Del Río Merino, M. & Hernández Olivares, F., 2004. Lightened plaster: alternative solutions to cellular solids addition. *Materiales de Construcción*, 54(275).
- Del Río Merino, M., Santa Cruz Astorqui, J. & Hernández Olivares, F., 2005. New prefabricated elements of lightened plaster used for partitions and extrados. *Construction and Building Materials*, 19(6), pp. 487-492.
- Demirboga, R. & Kan, A., 2012. Thermal conductivity and shrinkage properties of modified waste polystyrene aggregate concretes. *Construction and Building Materials*, Volumen 35, pp. 730-734.

- Demirel, B., 2013. Optimization of the composite brick composed of expanded polystyrene and pumice blocks. *Construction and Building Materials*, Volumen 40, pp. 306-313.
- Demir, I. & Baspinar, M. S., 2008. Effect of silica fume and expanded perlite addition on the technical properties of the fly ash-lime-gypsum mixture. *Construction and Building Materials*, 22(6), p. 1299–1304.
- Department of the environment, 2012. Construction and demolition waste guide recycling and re-use across the supply chain. Australia: Edge Environment Pty Ltd for the department.
- ECODES, 2013. CeroCO2. [En línea] Disponible en: www.ceroco2.org [Último acceso: 12 diciembre 2013].
- Egenhoper, C., Jansen, J., Bakker, S. & Jussila Hammes, J., 2006. Revisiting EU Policy Options for Tackling Climate Change: A Social Cost-Benefit Analysis of GHG Emissions Reduction Strategies, Bruselas: Centre for European Policy Studies.
- El Consejo de las Comunidades Europeas, 1991. Directiva 91/689/CEE del Consejo, de 12 de diciembre de 1991, relativa a residuos peligrosos. s.l.:s.n.
- El Parlamento Europeo, 2006. Directiva 2006/32/CE sobre la eficiencia del uso final de la energía y los servicios energéticos y por la que se deroga la Directiva 93/76/CEE del Consejo. s.l.:s.n.
- El Parlamento Europeo, 2008. Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 19 de noviembre de 2008 sobre los residuos. s.l.:s.n.
- El-Bashir, S., 2007. Thermal and mechanical properties of plywood sheets based on polystyrene/silica nanocomposites and palm tree fibers. *Polymer Bulletin*, 70(7), pp. 2035-2045.
- ETSIM-UPM, 2012. Cambio climático. Emisiones en el mundo. [En línea] Disponible en: <http://www.minas.upm.es/investigacion/co2/cambioClimatico.EWorld.htm>
- European Commission, 2014. Eurostat. [En línea] Disponible en: [http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/File:Waste_generation_by_economic_activities_and_households,_EU-28,_2014_\(%25\)_YB16.png](http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/File:Waste_generation_by_economic_activities_and_households,_EU-28,_2014_(%25)_YB16.png) [Último acceso: 23 octubre 2016].
- European Commission, 2014. Eurostat. [En línea] Disponible en: <http://ec.europa.eu/eurostat/en/web/products-statistical-books/-/KS-EN-16-001> [Último acceso: 20 mayo 2017].
- European Commission, 2014. Eurostat. [En línea] Disponible en: <http://ec.europa.eu/eurostat/en/web/products-statistical-books/-/KS-EN-16-001> [Último acceso: 20 mayo 2017].
- European Commission, 2014. Eurostat statistics for waste flow generation. [En línea] Disponible en: <http://ec.europa.eu/eurostat/web/environment/waste/main-tables>
- Eve, S. y otros, 2006. Investigation of the setting of polyamide fibre/latex-filled plaster composites. *Journal of the European Ceramic Society*, 26(13), pp. 2541-2546.
- Fischer, C. & Werge, M., 2009. EU as a Recycling Society. Copenhagen : ETC/SCP.
- Follner, S. & Follner, H., 2004. A potential process for production of gypsum board via recrystallization of dihydrate gypsum. *ZKG International*, 57(6), pp. 78-83.
- Fujita, T., Komatsu, N. & Kawai, S., 2006. Manufacture and properties of gypsum-bonded particleboard IV. Properties of gypsum-bonded particleboard made with raw material from waste gypsum boards. *Mokuzai Gakkaishi*, 52(6), pp. 368-375.
- García Santos, A., 1988. Comportamiento mecánico de yeso reforzado con polímeros sintéticos (tesis doctoral). Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- García Santos, A., 2004. Caracterización de compuestos de escayola reforzado, en relación con el tipo de refuerzo y la relación A/Y. *Informes de la construcción*, 46(493).

- García Santos, A., 2009. Escayola reforzada con fibras de polipropileno y aligerada con perlas de poliestireno expandido. *Materiales de Construcción*, 59(293), pp. 105-124.
- García Santos, A., 2009. PPF-reinforced, ESP-lightened gypsum plaster. *Materiales de Construcción*, 59(293), pp. 105-124.
- Geiseler, J., 1996. Use of steelworks slag in Europe. *Waste Management*, 16(1-3), p. 59–63.
- Gencel, O. y otros, 2016. A novel lightweight gypsum composite with diatomite and polypropylene fibers. *Construction and Building Materials*, Volumen 113, pp. 732-740.
- GERD, 2013. Informe sobre gestión y control de la producción de los RCD en España periodo 2008 – 2011, Madrid: Ferccid.
- Gmouh, A., Samdi, A., Moussa, R. & Gomina, M., 2001. Lightened plaster-based composite materials: Elaboration and mechanical properties. *Silicates industriels*, Volumen 5-6, pp. 61-66.
- Gobierno de España, 2001. Real Decreto 1481/2001, de 27 de diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero.. Madrid: s.n.
- Gobierno de España, 2002. Orden MAM/304/2002, de 8 de febrero por la que se publican las operaciones de valorización y eliminación de residuos y la lista europea de residuos. Madrid: s.n.
- Gobierno de España, 2014. Estadística Minera de España. [En línea] Disponible en: <http://www.minetad.gob.es/energia/mineria/Estadistica/2014/anual-2014.pdf>
- Gobierno de España, 2014. Libro de la Energía en España 2014. 1ª edición ed. Madrid: s.n.
- Gomis Yagües, V., 2014. El yeso como materia prima. [En línea] Disponible en: <http://iq.ua.es/Yeso/> [Último acceso: 17 febrero 2014].
- Gonçalves Rapazote, J., Laginhas, C. & Teixeira-Pinto, A., 2010. Development of Building Materials through Alkaline Activation of Construction and Demolition Waste (CDW) - Resistance to Acid Attack. *Advances in Science and Technology*, Volume 69, pp. 156-163.
- González Madariaga, F. J., 2005. Caracterización de mezclas de residuos de poliestireno expandido (EPS) conglomerados con yeso o escayola, su uso en la construcción (tesis doctoral). Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya.
- González Madariaga, F. J. & Lloveras Macia, J., 2008. EPS (expanded poliestyrene) recycled bends mixed with plaster or stucco, some applications in building industry. *Informes de la Construcción*, 60(509), pp. 35-43.
- Greenpeace, 2010. La incineración de residuos en cifras. [En línea] Disponible en: <http://www.greenpeace.org/espana/Global/espana/report/contaminacion/100720.pdf>
- Groetz, 2016. Insulation plaster. [En línea] Disponible en: <http://www.groetz.de/en/our-services/plasteringinsulation-materials.html> [Último acceso: 26 enero 2017].
- Gruzen Samton LLP with City Green Inc., 2003. Construction & Demolition Waste Manual. New York: s.n.
- Guangcai, X., 2013. Extruded polystyrene compound insulation fireproof plate. s.l. Patente nº E04B1/80; E04B1/94.
- Guleria, S. & Dutta, R., 2011. Unconfined Compressive Strength of Fly Ash-Lime-Gypsum Composite Mixed with Treated Tire Chips. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23(8), pp. 1255-1263.
- Gutiérrez González, S., Calderón Carpintero, V. & Gadea Sáinz, J., 2012. Yesos aligerados fabricados a partir de residuos de espumas de poliuretano y polvo de poliamida (tesis doctoral). Burgos: Universidad de Burgos.
- Gutierrez-Gonzalez, S. et al., 2013. Rheological behaviour of gypsum plaster pastes with polyamide powder wastes. *Construction and Building Materials*, Volume 38, pp. 407-412.

- Gutiérrez-González, S. y otros, 2012. Compatibility between gypsum and polyamide powder waste to produce lightweight plaster with enhanced thermal properties. *Construction and Building Materials*, Volumen 34, pp. 179-185.
- Gutiérrez-González, S. y otros, 2012. Lightweight plaster materials with enhanced thermal properties made with polyurethane foam wastes. *Construction and Building Materials*, 28(1), pp. 653-658.
- Gutt, W. & Nixon, P., 1979. Use of waste materials in the construction industry. *Materials and structures*, 12(4), pp. 255-306.
- Halada, K., 2003. Progress of ecomaterials toward a sustainable society. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, Volumen 7, pp. 209-216.
- Hernández-Olivares, F., Bollati, M., Del Río Merino, M. & Parga-Landa, B., 1999. Development of cork-gypsum composites for building applications. *Construction and Building Materials*, 13(4), pp. 179-186.
- Herrero, S., Mayor, P. & Hernández Olivares, F., 2013. Influence of proportion and particle size gradation of rubber from end-of-life tires on mechanical, thermal and acoustic properties of plaster-rubber mortars. *Materials & Design*, Volumen 47, pp. 633-642.
- Huang, B., Xhang, Y. & Li, D. X., 2013. Study on the Influences of Foaming Gypsum's Performance. *Materials Science Forum*, Volumen 743, pp. 222-227.
- Huang, K., Liang, H. & Hung, M., 2010. Improvement in fire prevention performance of cork-gypsum decorative materials by applying porous waste. *International Journal of Physical Sciences*, Volume 5, pp. 2038-2044.
- Hummel, H. et al., 2007. Examination of the exposure- and odour-reducing characteristics of gypsum-based building materials containing zeolite. *Bauphysik*, 29(6), pp. 430-435.
- IDAE, 2011. Análisis del consumo energético del sector residencial en España. Informe final. [En línea] Disponible en: www.idae.es [Último acceso: 9 enero 2014].
- IDAE, 2011. Plan de Ahorro y Eficiencia Energética 2011-2020. [En línea] [Último acceso: 11 diciembre 2013].
- Impernor, S., 2015. Datos de aislamiento suministrado y facturado en diferentes obras. Madrid: s.n.
- IngenieriaPlastica.com, s.f. La Historia del Plástico. [En línea] Disponible en: http://www.ingenieriaplastica.com/novedades_ip/instituciones/cipres_historia.html [Último acceso: 11 febrero 2014].
- Instituto Eduardo Torroja & Instituto de la Construcción de Castilla y León, 2007. CTE web. [En línea] Disponible en: <http://cte-web.iccl.es/materiales.php?a=22> [Último acceso: 08 09 16].
- International Organization for Standardization, 1988. ISO 7892:1988. Vertical building elements. Impact resistance tests. Impact bodies and general test procedures. Switzerland: s.n.
- Isern, E. R. & Messing, G. L., 2016. Direct foaming and seeding of highly porous, lightweight gypsum. *Journal of materials research*, 31(15), pp. 2244-2251.
- Iucolano, F., Caputo, D., Leboffe, F. & Liguori, B., 2015. Mechanical behavior of plaster reinforced with abaca fibers. *Construction and Building Materials*, Volumen 99, pp. 184-191.
- Jefatura del Estado, 2011. Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados. Madrid: s.n.
- Jiang, H. & Luan, C., 2011. Preparation and Absorption/Desorption Performance of Gypsum-based Humidity Controlling Materials. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater*, 26(4).
- Jiménez Rivero, A., de Guzmán Báez, A. & García Navarro, J., 2014. New composite gypsum plaster – ground waste rubber coming from pipe foam insulation. *Construction and Building Materials*, Volumen 55, pp. 146-152.
- Jin Hee, L., Hare Ri, L. & Bang, H. B., 2012. Simple manufacturing method of the extruded polystyrene foam containing graphites. s.l. Patente nº KR20110100631 20111004.

- Karaman, S., Sahin, S., Gunal, H. & Orung, I., 2006. Stabilization of waste pet bottles with Gypsum. *Journal of Applied Sciences*, Volumen 6, pp. 1119-1122.
- Khalil, A., Tawfik, A., Hegazy, A. & El-Shahat, M., 2013. Effect of different forms of silica on the physical and mechanical properties of gypsum plastercomposites. *Materiales de construcción*, 63(312), pp. 529-537.
- Kim, C., 2009. Heat insulating panel for building, has bottom panel, which is manufactured according to sheet configuration using waste styrofoam and regeneration polystyrene resin, and top panel manufactured in same form as that of bottom panel. s.l. Patente nº KR2009049678-A.
- Kim, S., 2009. Incombustibility, physico-mechanical properties and TVOC emission behavior of the gypsum–rice husk boards for wall and ceiling materials for construction. *Industrial crops and products*, 29(2), pp. 381-387.
- Klöck, W. & Aicher, S., 2005. Size effect in paper fiber-reinforced gypsum panels under in-plane bending. *Wood and fiber science*, 37(3), pp. 403-412.
- Knauf, 2014. Mortero proyectado para protección pasiva al fuego Vermiplaster. [En línea] Disponible en: www.knauf.es [Último acceso: noviembre 2014].
- Kocemba, A. & Mucha, M., 2016. Water retention and setting in gypsum/polymers composites. *Przemysl Chemiczny*, 95(5), pp. 1003-1005.
- Koeseoglu, C., 2009. Lightweight brick type construction element producing-composition comprises clay, expanded perlite, shavings or styrofoam powder, and electron sourcing materials having tincal, ulexite and/or albite. s.l. Patente nº WO2009040147-A2.
- Kumar, S., 2002. A perspective study on fly ash-lime-gypsum bricks and hollow blocks for low cost housing development. *Construction and Building Materials*, 16(8), pp. 519-525.
- La Maruxina, 2014. Aliproyes. [En línea] Disponible en: www.lamaruxina.com [Último acceso: noviembre 2014].
- Lakraflı, H., Tahiri, S., Albizane, A. & El Otmani, M., 2012. Effect of wet blue chrome shaving and buffing dust of leather industry on the thermal conductivity of cement and plaster based materials. *Construction and Building Materials*, Volumen 30, pp. 590-596.
- Lanzón, M. & García-Ruiz, P., 2012. Effect of citric acid on setting inhibition and mechanical properties of gypsum building plasters. *Construction and Building Materials*, 28(1), pp. 506-511.
- Laukaitis, A., Zurauskas, R. & Keriene, J., 2005. The effect of foam polystyrene granules on cement composite properties. *Cement Concrete Comp*, Volume 27, p. 41–47.
- Leiva Aguilera, M. & Del Río Merino, M., 2014. Escayola aditivada con residuos agrícolas: cáscara de arroz y cáscara triturada. En: e. a. C. Llinares-Millán, ed. *Construction and Building Research*. Switzerland: Springer, pp. 463-470.
- Leiva Aguilera, M. J., Del Río Merino, M. & Villoria Sáez, P., 2016. Feasability of plaster composites with rice husk waste. *ZKG drymix special* 2016, pp. 30-40.
- Li, G. y otros, 2003. Properties study of cotton stalk fiber/gypsum composite. *Cement and Concrete Research*, 33(1), pp. 43-46.
- Lihua, Z. & Zhibin, G., 2013. Curtain wall integrating XPS (extruded polystyrene) heat insulation material and stone. s.l. Patente nº B32B27/12; B32B27/30; E04B2/88; E04B2/92.
- Lima, J. & Faria, P., 2016. Eco-Efficient Earthen Plasters: The Influence of the Addition of Natural Fibers. *Natural fibres: advances in science and technology towards industrial applications: from science to market*, Volumen 12, pp. 315-327.
- Linchang, M. y otros, 2013. Properties and Applications of Cement-Treated Sand-Expanded Polystyrene Bead Lightweight Fill. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25(1), pp. 86-93.

- Lipeng, C., 2012. Experimental research on producing thermal insulating bonding mortar by spent polystyrene foam. *Applied Mechanics and Materials*, Volumen 174-177, pp. 1253-6.
- Lorenzo García, S., 2013. Un futuro en peligro. *Cuadernos de Tomás*, pp. 283-295.
- Lousef, S., Montazeri, H., Blocken, B. & Van Wesemael, P., 2017. On the use of non-conformal grids for economic LES of wind flow and convective heat transfer for a wall-mounted cube. *Building and Environment*, Volumen 119, pp. 44-61.
- Madandoust, R., Ranjbar, M. M. & Mousavi, S. Y., 2011. An investigation on the fresh properties of self-compacted lightweight concrete containing expanded polystyrene. *Construction and Building Materials*, 25(9), pp. 3721-3731.
- Magallanes-Rivera, R., Escalante-García, J. & Gorokhovskiy, A., 2009. Hydration reactions and microstructural characteristics of hemihydrate with citric and malic acid. *Construction and Building Materials*, 23(3), pp. 1298-1305.
- Martín Larrañaga, M., 2009. La bioenergía: estrategia para una economía verde. *Revista Ambienta*.
- Mizera, J., 2004. The influence of admixture of fibres from artificial plastics upon the technical properties of composite gypsum materials. *Silicates industriels*, Volumen 3-4, pp. 43-45.
- Mohandesi, J. A., Sangghaleh, A., Nazari, A. & Pourjavad, N., 2011. Analytical modeling of strength in randomly oriented PP and PPTA short fiber reinforced gypsum composites. *Computational Materials Science*, Volumen 50, pp. 1619-1624.
- Morales Conde, M. J., Rodríguez Liñán, C. & Pedreño Rojas, M. A., 2016. Physical and mechanical properties of wood-gypsum composites from demolition material in rehabilitation works. *Construction and Building Materials*, Volumen 114, pp. 6-14.
- Mundoplast, 2013. España, demanda de plásticos por sector 2012. [En línea] Disponible en: <http://www.mundoplast.com/noticia/la-produccion-materias-primas-plasticas-cayo-84-espana-2012-/70832> [Último acceso: 11 febrero 2014].
- National Academy of Engineering, 1990. *Energy: Production, Consumption, and Consequences*. Washington, D.C.: National Academy Press.
- Nazerian, M. & Kamyab, M., 2013. Gypsum-bonded particleboard manufactured from agricultural based material. *Forest Science and Practice*, 15(4), pp. 325-331.
- Neila González, F. J. & Bedoya Frutos, C., 1997. *Técnicas arquitectónicas y constructivas de acondicionamiento ambiental*. Madrid: Munilla-Lería.
- Oh, J., 2009. Lightweight brick manufacturing method involves pulverizing styrofoam or waste building materials into predetermined size, where bricks are molded into specific size, and moisture contained inside molded bricks are dried. s.l. Patente nº KR2009120634-A.
- Oliver Ramírez, A., 2009. Integración de materiales de cambio de fase en placas de yeso reforzadas con fibras de polipropileno (tesis doctoral). Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- Oliver, A., 2012. Thermal characterization of gypsum boards with PCM included: Thermal energy storage in buildings through latent heat. *Energy and Buildings*, Volumen 48, pp. 1-7.
- Onishi, K., Tsukamoto, Y., Saito, R. & Chiyoda, T., 2010. Strength and small-strain modulus of lightweight geomaterials: cement-stabilised sand mixed with compressible expanded polystyrene beads. *Geosynthetics International*, 16(10), pp. 380-388.
- Ortiz Hernández, M. L., 2009. El impacto de los plásticos en el ambiente. *Hypatia*, Volumen 30.
- Osmani, M., Glass, J. & Price, A. D., 2008. Architects' perspectives on construction waste reduction by design. *Waste Management*, 28(7), pp. 1147-1158.
- Panelsystem, 2014. Catálogo técnico TC7. [En línea] Disponible en: www.panelsystem.com [Último acceso: octubre 2014].
- Papresa, 2014. Yeso de proyectar aligerado. [En línea] Disponible en: www.papresa.net [Último acceso: noviembre 2014].

- Parres, F., Crespo-Amoros, J. & Nadal-Gisbert, A., 2009. Mechanical properties analysis of plaster reinforced with fiber and microfiber obtained from shredded tires. *Construction and Building Materials*, 23(10), p. 3182–3188.
- Peña Sánchez de Rivera, D., 1986. *Estadística, modelos y métodos*. s.l.:Alianza.
- Pichniarczyk, P., Malata, G. & Szelag, H., 2005. The polymer impregnated gypsum mineral wool as a new, alternative material for thermal insulation. *Cement Wapno Beton*.
- Placo, 2014. Yeso de fraguado rápido Iberplast. [En línea] Disponible en: <https://www.placo.es/es-es/productos/yesos-escayolas/yesos-manuales-iberplast> [Último acceso: 20 marzo 2017].
- Placo, 2014. Yeso Igniver. [En línea] Disponible en: <https://www.placo.es/Portals/0/Documentacion/Productos/Morteros/Igniver%20feb14.pdf> [Último acceso: 26 enero 2017].
- Placo, 2014. Yesos de proyectar aligerados. [En línea] Disponible en: www.placo.es [Último acceso: 24 10 2014].
- Planética.org, 2011. Clasificación de los residuos. [En línea] Disponible en: <http://www.planetica.org/clasificacion-de-los-residuos>
- Plastech, 2011. Plastics demand in Europe by types and by sectors. [En línea] Disponible en: <http://www.plastech.biz/news/Plastics-demand-in-Europe-by-types-and-by-sectors,n5728> [Último acceso: 11 febrero 2014].
- PlasticsEurope, 2012. World plastics materials production 2012. [En línea] Disponible en: <http://www.plasticseurope.org/> [Último acceso: 11 febrero 2014].
- PlasticsEurope, 2013. Plastics - the Facts 2013. [En línea] Disponible en: http://www.plasticseurope.org/documents/document/20131014095824-final_plastics_the_facts_2013_published_october2013.pdf [Último acceso: 11 febrero 2014].
- Porras Amores, C., Viñas Arrebola, C., Rodríguez Sánchez, A. & Villoria Sáez, P., 2014. Assessing the potential use of strategies independent from the architectural design to achieve efficient ventilation: A Spanish case study. *Building Services Engineering Research and Technology*, 35(5), pp. 529-542.
- Ramazan Demirboga, A., 2012. Thermal conductivity and shrinkage properties of modified waste polystyrene aggregate concretes. *Construction and Building Materials*, pp. 730-734.
- Ramezani, H., Shandab, S. & Nouri, A., 2012. Study on effects of wood fiber content on physical, mechanical and acoustical properties of wood-fiber-filled gypsum composites. *Materials Research*, Volume 15, pp. 236-241.
- REN21, 2016. Renewables 2016. Global Status Report. [En línea] Disponible en: http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2016/06/GSR_2016_Full_Report.pdf [Último acceso: 2 enero 2017].
- RILEM, 1980. TC 25-PEM. Protection et erosion des monuments: Recommandés pour mesurer l'artération des pierres et évaluer l'efficacité des méthodes de traitement. *Matériaux et Constructions*, 13, N. 75. s.l.:RILEM.
- Rodríguez, A., Gutiérrez-González, S., Horgnies, M. & Calderón, V., 2013. Design and properties of plaster mortars manufactured with ladle furnace slag. *Materials & Design*, Volumen 52, pp. 987-994.
- Romaniega Piñeiro, S., Del Río Merino, M. & Pérez García, C., 2015. New Plaster Composite with Mineral Wool Fibres from CDW Recycling. *Advances in Materials Science and Engineering*, Volumen 2015.
- Rudnick, H., 2010. *Impuestos al carbono*. Chile: Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Ru, W. & Meyer, C., 2012. Performance of cement mortar made with recycled high impact polystyrene. *Cement and Concrete Composites*, 34(9), pp. 975-81.

- Santos Aguilera, J. H. & D. Matías, J., 2008. Pensamiento ecológico y ambiental. [En línea] Disponible en: <http://revistaambiental.blogspot.co.uk/> [Último acceso: 17 diciembre 2013].
- Schneider, J., Freyer, D. & Voigt, W., 2007. The effect of retarders on the setting process in industrially relevant hemihydrate gypsum plasters. *ZKG International*, 60(12), pp. 68-76.
- Scholer, M. & Patt, R., 1987. Production of gypsum-bonded high-strength fiberboards using recycled paper. *Holz als Roh-und Werkstoff*, 45(9), pp. 390-390.
- Serna, Á., del Río Merino, M., Palomo, J. G. & González Cortina, M., 2012. Improvement of gypsum plaster strain capacity by the addition of rubber particles from recycled tyres. *Construction and Building Materials*, Volumen 35, p. 633–641.
- Smithers Apex, 2016. Worldwide Gypsum Market to Reach \$3.8 Billion by 2023. [En línea] Disponible en: <https://www.smithersapex.com/market-reports/news/worldwide-gypsum-market-to-reach-3-8-billion-by-2023.aspx> [Último acceso: 17 diciembre 2016].
- Tam, V., 2008. On the effectiveness in implementing a waste-management-plan method in construction. *Waste management*, 28(6), pp. 1072-1080.
- Tang, W., Lo, Y. & Nadeem, A., 2008. Mechanical and drying shrinkage properties of structural-graded polystyrene aggregate concrete. *Cement and Concrete Composites*, 30(5), pp. 403-409.
- Tejero González, A., 2012. Reducción del consumo energético y emisiones anhídrido carbónico en edificios combinando enfriamiento evaporativo, enfriamiento gratuito y recuperación de energía en sistemas todo aire. Valladolid: Universidad de Valladolid.
- Textos científicos.com, 2013. Polímeros sintéticos. [En línea] Disponible en: <http://www.textoscientificos.com/polimeros/sinteticos> [Último acceso: 11 febrero 2014].
- Thermochip, 2014. [En línea] Disponible en: www.termochip.com [Último acceso: 27 febrero 2014].
- Thole, V., 1992. Bending strength of gypsum-bonded particleboards using flax waste as an additive. *Holz als Roh-und Werkstoff*, 50(7-8), pp. 327-327.
- Thole, V. & Weiss, D., 1992. Suitability of annual plants as additives for gypsum-bounded particleboards. *Holz als Roh-und Werkstoff*, 50(6), pp. 241-252.
- Tiscareño Vizcarra, A. A., 2005. Propuesta de mejora en la operación del sistema de recolección y procesamiento de residuos de la Ciudad de Puebla (Tesis doctoral). Méjico: Universidad de las Américas Puebla.
- U.S. Energy Information Administration, 2011. [En línea] [Último acceso: 4 noviembre 2013].
- U.S. Energy Information Administration, 2012. EIA. [En línea] Disponible en: <http://www.eia.gov/cfapps/ipdbproject/IEDIndex3.cfm?tid=44&pid=44&aid=2> [Último acceso: 31 octubre 2013].
- U.S. Energy Information Administration, 2013. EIA. [En línea] Disponible en: <http://www.eia.gov/forecasts/ieo/world.cfm>
- UNED, 2014. El tratamiento de los residuos. [En línea] Disponible en: <http://www.uned.es/biblioteca/rsu/pagina1.htm> [Último acceso: 12 febrero 2014].
- USGS, 2014. Gypsum statistics and information. [En línea] Disponible en: <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/gypsum/myb1-2014-gypsu.pdf> [Último acceso: 20 mayo 2017].
- UTE, Planta de Navalmorcal, 2014. [En línea] [Último acceso: Mayo 2014].
- Van Dijk, K., Boedianto, P., te Dorsthorst, B. J. & Kowalczyk, T., 2001. Strategy for reuse of construction and demolition waste role of authorities. *Heron*, 46(2), pp. 0046-7316.
- Veischi, S. & Yousefi, A., 2003. The use of polystyrene in lightweight brick production. *Iranian Polymer Journal*, 12(4), pp. 323-329.

- Villanueva Domínguez, L. d., 1975. Documentación técnica de las propiedades del yeso en la construcción. Madrid: Ministerio de la Vivienda.
- Villanueva Domínguez, L. d. & García Santos, A., 2001. Manual del Yeso. Madrid: CIE Inversiones Editoriales.
- Villoria Sáez, P., 2014. Sistema de gestión de residuos de construcción y demolición (RCD) en obras de edificación residencial. Buenas prácticas en la ejecución de obra (tesis doctoral). Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- Villoria Sáez, P., Del Río Merino, M. & Porras-Amores, C., 2012. Estimation of construction and demolition waste volume generation in new residential buildings in Spain. *Waste Management & Research*, 30(2), pp. 137-146.
- Villoria Sáez, P., Del Río Merino, M., San-Antonio-González, A. & Porras-Amores, C., 2013. Best practice measures assessment for construction and demolition waste. *Resources, Conservation and Recycling*, Volumen 75, p. 52– 62.
- Vimmrová, A., Nazmunnahar, M. & Cerny, R., 2016. Lightweight gypsum-based materials prepared with aluminum powder as foaming agent. *Cement Wapno Beton*, 19(5), pp. 299-307.
- Vimmrová, A., Keppert, M., Svoboda, L. & Černý, R., 2011. Lightweight gypsum composites: Design strategies for multi-functionality. *Cement and Concrete Composites*, 33(1), pp. 84-89.
- Wang, J., Yuan , H., Kang, X. & Lu, W., 2010. Critical success factors for on-site sorting of construction waste: A China study. *Resources, Conservations and Recycling*, 54(11), pp. 931-936.
- Wang, Y. Y. & Li , G. Z., 2011. Surface Modification of Cornstalk Fiber and Properties of Cornstalk Fiber/Gypsum Composites. *Advanced Materials Research*, Volumen 306, pp. 766-769.
- Winterling, H. & Sonntag, N., 2011. Rigid Polystyrene Foam (EPS, XPS). *Kunststoffe International*, 101(10), pp. 18-21.
- World Energy Council, 2013. World Energy Perspective. [En línea] Disponible en: http://www.worldenergy.org/publications/energy_efficiency_policies_around_the_world_review_and_evaluation/1_introduction/1175.asp [Último acceso: 23 octubre 2013].
- WRAP, 2009. Construction products, materials and waste. [Online] Disponible en: <http://www.wrap.org.uk/> [Último acceso: marzo 2014].
- Wu, Z., Chen, B. & Liu, N., 2013. Fabrication and compressive properties of expanded polystyrene foamed concrete: Experimental research and modeling. *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)*, 18(1), pp. 61-9.
- Xiaolong , S., Mingsheng, H. & Xiaojian , F., 2011. Linear analysis and strength prediction of experiment on lightweight heterogeneous soil mixed with expanded polystyrene. *Advanced Materials Research*, Volumen 250-253, pp. 622-5.
- Xinfeng , T., Ying , W., Yan , Y. & Zengzhi , Z., 2013. Study on the Influences of Foaming Gypsum's Performance. *Materials Science Forum*, Volumen 743 - 744, pp. 222-227.
- Xi, Y. G., Peng, T., Liu, H. & Chen, J., 2011. Preparation and Properties of Expanded Vermiculite/Gypsum Thermal Insulation Boards. *Advanced Materials Research*, Volumen 178, pp. 220-225.
- Yadollah, D., Mitchell, W. & Breindel, R. M., 2011. Extruded polystyrene foam containing propylene carbonate, ethylene carbonate or butylene carbonate as a process aids. s.l. Patente nº MX20100013201 20101202.
- Yedesa, 2014. Yeso de proyección aligerado. [En línea] Disponible en: www.yedesa.com [Último acceso: noviembre 2014].
- Yesamsa, 2014. Yeso de proyectar aligerado. [En línea] Disponible en: www.yesamsa.es [Último acceso: 26 enero 2017].

- Yesos Millán, 2014. Yesos aligerados de proyectar. [En línea] Disponible en: www.yesosmillan.es [Último acceso: noviembre 2014].
- Yetosa, 2014. Yeso de proyectar aligerado. [En línea] Disponible en: www.yetosa-yemasa.com [Último acceso: noviembre 2014].
- Yi, X. & Linhua, J., 2011. Investigating mix proportions of lightweight expanded polystyrene concrete. *Applied Mechanics and Materials*, pp. 950-3.
- Yi, X., Linhua, J., Jinxia, X. & Yang, L., 2012. Mechanical properties of expanded polystyrene lightweight aggregate concrete and brick. *Construction & Building Materials*, 27(1), pp. 32-8.
- Yong, G. X., Tong, J. P., Hai, F. L. & Ji, M., 2010. Preparation and Properties of Expanded Vermiculite/Gypsum Thermal Insulation Boards. *Advanced Materials Research*, Volumen 178, pp. 220-225.
- Zhang, W. H., Li, G. Z. & Liu, M. R., 2011. Properties research of cotton fiber reinforced gypsum based composites. *Advanced Materials Research*, Volumen 194, pp. 1759-1762.
- Zhao, J., 2013. Cement XPS (Extruded Polystyrene)-sandwiched composite insulation board. s.l. Patente nº B32B13/12; B32B13/14; B32B27/06; B32B27/30; B32B3/30; E04B1/80; E04B1/94.
- Zheng, G., Wang, R., Zhao, G. & Yu, X., 2012. Adsorption and dispersion characteristics of superplasticizer with waste plexiglas (WPS) on the surface of gypsum particles. *Applied Mechanics and Materials*, Volumen 127, pp. 272-276.
- Zhengxian, Y., Hollar, J. & Xianming, S., 2010. Surface-sulfonated polystyrene microspheres improve crack resistance of carbon microfiber-reinforced Portland cement mortar. *Journal of Materials Science*, 45(13), pp. 3497-505.
- Zhou, S. y otros, 2013. The preparation and performance of gypsum-based composites. *Applied Mechanics and Materials*, Volumen 310, pp. 46-50.

INDICIOS DE CALIDAD

Publicaciones científicas

San-Antonio-González, del Río Merino, M., Viñas Arrebola, C., & Villoria Sáez, P. (2015). Lightweight material made with gypsum and extruded polystyrene waste with enhanced thermal behaviour. *Construction and Building Materials*, 93, 57-63. (Índice de impacto 2,421 cuartil Q1 nº de citas 5)

Santos Jiménez, R., San-Antonio-González, A., del Río Merino, M., González Cortina, M., & Viñas Arrebola, C. (2015). Gypsum Composites with CDW as Raw Material. *International Journal of Chemical, Molecular, Nuclear, Materials and Metallurgical Engineering*, 9(7).

Martínez Martínez, R., del Río Merino, M., San-Antonio-González, A., Santa Cruz Astorqui, A., & Villoria Sáez, P. (2013). Sustainable lightweight gypsum products. *Global Gypsum*, July, 28-31.

Congresos y conferencias científicas

San-Antonio-González, A., del Río Merino, M., & Viñas Arrebola, C. (2015). Reutilización de residuo de poliestireno extruido en compuestos de yeso. En EXCO'15. Valencia, Spain: XXIX Salón Tecnológico de la construcción. Feria Valencia.

San-Antonio-González, A., del Río Merino, M., & Viñas Arrebola, C. (2015). Nuevo eco-material de yeso con residuo de poliestireno extruido. En II Jornada sobre Innovación en el sector del Yeso. Madrid, Spain: Asociación Técnica y Empresarial del Yeso.

San-Antonio-González, A., del Río Merino, M., Viñas Arrebola, C., & Villoria Sáez, P. (2015). Lightweight construction material made with gypsum and extruded polystyrene waste. En II International Congress on Sustainable Construction and Eco-Efficient Solutions. Sevilla, Spain: Escuela Técnica Superior de Arquitectura – Universidad de Sevilla.

San-Antonio-González, A., del Río Merino, M., Viñas Arrebola, C., & Villoria Sáez, P. (2015). Lightweight construction material made with gypsum and extruded polystyrene waste. En IV National Congress on Sustainable Construction and Eco-Efficient Solutions. Sevilla, Spain: Escuela Técnica Superior de Arquitectura – Universidad de Sevilla.

Del Río Merino, M., Villoria Sáez, P., San-Antonio-González, A., Santos Jiménez, R., González Cortina, M., Santa Cruz Astorqui, J., Rodríguez Sánchez, A., & Viñas Arrebola, C. (2015). Proyecto W2R: Valorización integral de los residuos generados en la rehabilitación energética de edificios. Ecomateriales de yeso. En II Jornada sobre Innovación en el sector del Yeso (pp. 29). Madrid, Spain: Asociación Técnica y Empresarial del Yeso.

San-Antonio-González, A. (2014). Viabilidad de nuevos materiales de yeso con cargas procedentes del reciclaje. Ponencia invitada en la Primera Jornada sobre Innovación en el Sector del Yeso. Madrid, Spain: Asociación Técnica y Empresarial del Yeso.

San-Antonio-González, A., del Río Merino, M., González Cortina, M., & Santos Jiménez, R. (2014). Feasibility of Recycling CDW as Raw Material in Gypsum Composites. En G. T. Papanikos. (Ed.), 4th Annual International Conference on Architecture (pp. 90). Athens, Greece: Athens Institute for Education and Research.

San-Antonio-González, A., del Río Merino, M., Viñas Arrebola, C., & Villoria Sáez, P. (2013). Futuras líneas de investigación para el diseño de compuestos con una matriz de yeso con propiedades eco-eficientes. En *Jornadas internacionales de investigación en construcción*. Madrid, Spain: Fundación Eduardo Torroja.

San-Antonio-González, A., del Río Merino, M., Viñas Arrebola, C., & Villoria Sáez, P. (2013). Yeso aligerado con agregados procedentes de residuos de construcción, demolición o industria. En *Workshop on Environmental Impact of Buildings (WEIB)*. Madrid, Spain: Escuela Técnica Superior de Edificación – Universidad Politécnica de Madrid.

San-Antonio-González, A., del Río Merino, M., Viñas Arrebola, C., & Villoria Sáez, P. (2013). Trend on the research on gypsum composites. The current importance of waste materials. En *International Congress on Sustainable Construction and Ecoefficient Solutions*. Sevilla, Spain: Escuela Técnica Superior de Arquitectura – Universidad de Sevilla.

San-Antonio-González, A., del Río Merino, M., Viñas Arrebola, C., & Villoria Sáez, P. (2013). Trend on the research on gypsum composites. The current importance of waste materials. En *III National Congress on Sustainable Construction and Ecoefficient Solutions*. Sevilla, Spain: Escuela Técnica Superior de Arquitectura – Universidad de Sevilla.

San-Antonio-González, A., del Río Merino, M., Martínez Martínez, R., & Villoria Sáez, P. (2012). Properties of lightweight plaster materials made with expanded polystyrene foam (EPS). En *2nd International Conference on Construction and Building Research (COINVEDI)*. Valencia, Spain: Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Edificación – Universidad Politécnica de Valencia.

Patentes

De San Antonio González, A., del Río Merino, M., Viñas Arrebola, C., & Villoria Sáez, P., 2014. *Procedimiento para la obtención de un material de construcción a base de yeso*. España, Patente nº es2515640.

Capítulo de libro

San-Antonio-González, A., del Río Merino, M., Martínez Martínez, R., & Villoria Sáez, P. (2014). Properties of Lightweight Plaster Materials made With Expanded Polystyrene Foam (EPS). En C. Llinares-Millán et al., *Construction and Building Research* (pág. 413-417). Switzerland: Springer.

SIGLAS Y ACRÓNIMOS

A	Agua
AENOR	Asociación Española De Normalización Y Certificación
AIPEX	Asociación Ibérica De Poliestireno Extruido
ANAIP	Asociación Española De Industriales De Plásticos
ATEDY	Asociación Técnica Y Empresarial Del Yeso
CEDEX	Centro De Estudios Y Experimentación De Obras Públicas
CFD	Computational Fluids Dynamics
CNE	Comisión Nacional De Energía
CTE	Código Técnico De La Edificación
CV	Cara vista
E	Escayola
EPS	Poliestireno Expandido
ETSIM	Escuela Técnica Superior De Ingeniería De Minas
EUROSTAT	Oficina Europea De Estadística
IDAE	Instituto Para La Diversificación Y Ahorro De La Energía
ISO	International Organization For Standardization
LER	Lista Europea De Residuos
LHD	Ladrillo hueco doble
LHS	Ladrillo hueco sencillo
NBE	Norma Básica De La Edificación
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
RCD	Residuos De Construcción Y Demolición
RD	Real Decreto
REF	Referencia
RP	Reglamento Particular
SEM	Scanning Electron Microscopy
UE	Unión Europea
UNE	Una Norma Española
UPM	Universidad Politécnica De Madrid
XPS	Poliestireno Extruido
XPS<2	Residuo De Poliestireno Extruido De Tamaño <2mm
XPS>4	Residuo De Poliestireno Extruido De Tamaño >4mm
XPS2	Residuo De Poliestireno Extruido De Tamaño Aproximado 2mm
XPS4	Residuo De Poliestireno Extruido De Tamaño Aproximado 4mm

XPSf	Residuo De Poliestireno Extruido Fino (<2mm)
XPSg	Residuo De Poliestireno Extruido Grueso (>4mm)
XPSm	Residuo De Poliestireno Extruido Medio (4mm)
Y	Yeso
YA	Yeso Aligerado
YG	Yeso Grueso
YG/L	Yeso Grueso De Fraguado Lento
YPM	Yeso De Proyección Mecánica

LISTADO DE TABLAS, FIGURAS Y FÓRMULAS

Listado de figuras

Figura 1-1 Previsión de consumo mundial de energía (U.S. Energy Information Administration, 2013).....	3
Figura 1-2 Energía final consumida por sectores en la Unión Europea (European Commission, 2014)	4
Figura 1-3 Energía final consumida por sectores en España (European Commission, 2014)	4
Figura 1-4 Consumo de energía primaria en España (Gobierno de España, 2014)	5
Figura 1-5 Previsión del agotamiento de combustibles fósiles (Martín Larrañaga, 2009)	6
Figura 1-6 Dependencia energética para los países de la Unión Europea (European Commission, 2014)	7
Figura 1-7 Evolución de las emisiones de CO ₂ período 1990-2010 (Gobierno de España, 2014).....	8
Figura 1-8 Proceso de fabricación del poliestireno extruido (AIPEX, 2014)	12
Figura 1-9 Baldosa aislante de hormigón poroso con poliestireno extruido (Danosa, 2014)	14
Figura 1-10 Panel sándwich de poliestireno extruido revestido con madera (Thermochip, 2014)	14
Figura 1-11 Consumo de polímeros sintéticos en la Unión Europea (PlasticsEurope, 2013)	15
Figura 1-12 Demanda de polímeros sintéticos por tipos (PlasticsEurope, 2012)	16
Figura 1-13 Tratamiento de residuos de polímeros sintéticos en la Unión Europea (PlasticsEurope, 2013). ..	18
Figura 1-14 Residuos generados en la Unión Europea años 2004-2010 (European Commission, 2014).....	23
Figura 1-15 Residuos generados por países de la Unión Europea (European Commission, 2014)	23
Figura 1-16 Generación de residuos en la Unión Europea por sectores (European Commission, 2014)	24
Figura 1-17 Generación de residuos en España por sectores (European Commission, 2014).....	25
Figura 1-18 Jerarquía de gestión de residuos (El Parlamento Europeo, 2008).....	26
Figura 1-19 Previsión de consumo mundial de yeso (Smithers Apex, 2016)	45
Figura 1-20 Producción mundial de yeso en 2014 (USGS, 2014)	46
Figura 1-21 Producción de yeso en España en 2014 (Gobierno de España, 2014)	46
Figura 2-1 Panel TC7 (Panelsystem, 2014)	61
Figura 5-1 Picnómetro	91
Figura 5-2 Molde 1 probetas tipo 1: de acero para probetas de dimensiones (40x40x160) mm ³	97
Figura 5-3 Molde probetas tipo 2: de madera para probetas de dimensiones (300x300x30) mm ³	97
Figura 5-4 Molde probetas tipo 3: de acero para probetas de dimensiones Ø30 mm	98
Figura 5-5 Mesa de sacudidas	99
Figura 5-6 Aparato de Vicat.....	101
Figura 5-7 Durómetro Shore C	102
Figura 5-8 Prensa monitorizada con dispositivos de flexión Mod. AUTOTEST 200-10SW.....	103
Figura 5-9 Prensa monitorizada con dispositivos de compresión Mod. AUTOTEST 200-10SW	104
Figura 5-10 Dispositivo central para realizar tracciones	105
Figura 5-11 Recipiente con rejilla para ensayo de absorción de agua por capilaridad	106
Figura 5-12 Ensayo de absorción sobre probetas de referencia	106
Figura 5-13 “Heat insulation house”	108
Figura 5-14 Software “Heat insulation house”	108
Figura 5-15 Esquema posición termopares en caja térmica	109
Figura 5-16 Sensor, agente de contacto y peso para ensayo con C-Therm TCi.....	110
Figura 5-17 Tubo de Kundt Acupro de Spectronics	111
Figura 5-18 Yeso Iberplast YG de la marca Placo	111
Figura 5-19 Residuo de XPS	113
Figura 5-20 Perlas de poliestireno expandido	114
Figura 5-21 Fibra de polipropileno SikaFiber M-12 de Sika	114
Figura 5-22 Modelo de referencia para envolvente vertical	120
Figura 5-23 Modelo de referencia para envolvente horizontal	120
Figura 5-24 Modelo de referencia para partición interior de LHD con revestimiento a dos caras	120
Figura 6-1 Primera hoja del procedimiento de segregación de poliestireno extruido	125

Figura 6-2 Trituradora eléctrica no industrial (izquierda) y rayador manual (derecha)	128
Figura 6-3 Proceso de rayado del residuo de XPS	129
Figura 6-4 Residuos de XPS en los diferentes porcentajes obtenidos	130
Figura 6-5 Residuo de poliestireno extruido triturado (izquierda) y tamizado (derecha)	131
Figura 6-6 Picnómetro	131
Figura 6-7 Microscopía de una muestra de residuo de XPS a 200x (izquierda) y 100x (derecha)	132
Figura 7-1 Sección de probeta de referencia 100Y+80A	138
Figura 7-2 Mezcla del compuesto de yeso con 4% de residuo de XPSm	138
Figura 7-3 Sección compuesto de referencia.....	139
Figura 7-4 Transición de incorporación de residuo de XPS de granulometría fina, desde 1 a 5%	139
Figura 7-5 Transición de incorporación de residuo de XPS de granulometría media, desde 1 a 4%	139
Figura 7-6 Transición de incorporación de residuo de XPS de granulometría gruesa, desde 1 a 4%	140
Figura 7-7 Densidad de los compuestos de yeso con residuo de XPS	140
Figura 7-8 Medida diámetro en mesa de sacudidas compuesto de yeso con serie 5 al 3%	142
Figura 7-9 Relación agua/yeso de los compuestos de yeso con residuo de XPS.....	142
Figura 7-10 Ensayo tiempo de fraguado método del cono de Vicat para el compuesto de referencia	143
Figura 7-11 Amasado de agua y yeso con un 2% de residuo de XPS (izda.) y 4% (derecha).....	143
Figura 7-12 Tiempo de fraguado de los compuestos de yeso con residuo de XPS	144
Figura 7-13 Microscopía a 500x (izquierda) y 2000x (derecha) del compuesto de yeso de referencia	145
Figura 7-14 Microscopía a 500x de muestra de yeso con residuo XPSg	145
Figura 7-15 Microscopía a 500x de muestra de yeso con residuo XPSm	145
Figura 7-16 Microscopía a 500x de muestra de yeso con residuo XPSf	146
Figura 7-17 Densidad de los compuestos de yeso con residuo de XPS	146
Figura 7-18 Gráfico de probabilidad normal para los residuos estadísticos de la variable densidad	147
Figura 7-19 Dureza superficial Shore C de los compuestos de yeso con residuo de XPS	148
Figura 7-20 Gráfico de probabilidad normal para los residuos estadísticos de la variable dureza sup.	149
Figura 7-21 Superficie de probeta con residuo de poliestireno extruido.....	149
Figura 7-22 Resistencia mecánica a flexión de los compuestos de yeso con residuo de XPS.....	150
Figura 7-23 Gráfico de probabilidad normal para los residuos estadísticos de la variable r. flexión	150
Figura 7-24 Relación entre la densidad y la resistencia a flexión de los compuestos seleccionados	151
Figura 7-25 Resistencia mecánica a compresión de los compuestos de yeso con residuo de XPS.....	152
Figura 7-26 Gráfico de probabilidad normal para los residuos estadísticos de la variable r. compresión....	152
Figura 7-27 Relación entre la densidad y la resistencia a compresión de los compuestos seleccionados..	153
Figura 7-28 Adherencia superficial de los compuestos de yeso con residuo de XPS.....	154
Figura 7-29 Gráfico de probabilidad normal para los residuos estadísticos de la variable adherencia sup.	154
Figura 7-30 Muestra ensayo adherencia compuesto de referencia	155
Figura 7-31 Muestra ensayo adherencia compuesto XPSg.....	155
Figura 7-32 Muestra ensayo adherencia compuesto XPSm.....	155
Figura 7-33 Muestra ensayo adherencia compuesto XPSf.....	156
Figura 7-34 Absorción de agua por capilaridad de los compuestos de yeso con residuo de XPS.....	156
Figura 7-35 Gráfico de probabilidad normal para los residuos estadísticos de la variable absorción de agua por capilaridad	157
Figura 7-36 Resultados durabilidad compuestos con residuo de poliestireno extruido.....	158
Figura 7-37 Probeta de referencia sometida a dos ciclos de desecado-saturado	158
Figura 7-38 Coeficiente de conductividad térmico de los compuestos de yeso con residuo de XPS	159
Figura 7-39 Gráfico de probabilidad normal para los residuos estadísticos de la variable coef. conductividad térmico	159
Figura 7-40 Ensayo de comportamiento térmico en equipo C-Therm TCi.....	160
Figura 7-41 Contacto entre sensor y probeta.....	161
Figura 7-42 Elaboración probetas acústicas	162
Figura 7-43 Coef. de absorción de los compuestos con residuo de XPS vs material aislante acústico	162
Figura 7-44 Coeficientes de absorción acústica de los compuestos con residuo de XPS	163
Figura 8-1 Perlas de poliestireno expandido	171

Figura 8-2 Mezcla del compuesto de yeso con poliestireno expandido.....	172
Figura 8-3 Sección compuesto de referencia.....	172
Figura 8-4 Transición de incorporación de las perlas de poliestireno expandido al yeso desde 1 a 3%	173
Figura 8-5 Densidad de los compuestos de yeso con poliestireno expandido	173
Figura 8-6 Relación agua/yeso de los compuestos de yeso con poliestireno expandido.....	174
Figura 8-7 Tiempo de fraguado de los compuestos de yeso con poliestireno expandido	175
Figura 8-8 Microscopía a 180x del compuesto de yeso con EPS (izda.) y del compuesto de referencia (derecha)	176
Figura 8-9 Densidad de los compuestos de yeso con poliestireno expandido	176
Figura 8-10 Dureza superficial de los compuestos de yeso con poliestireno expandido	177
Figura 8-11 Superficie de probeta con poliestireno expandido	177
Figura 8-12 Resistencia mecánica a flexión de los compuestos de yeso con poliestireno expandido.....	178
Figura 8-13 Relación entre la densidad y la resistencia a flexión de los compuestos con EPS.....	178
Figura 8-14 Resistencia mecánica a compresión de los compuestos de yeso con poliestireno expandido	179
Figura 8-15 Relación entre la densidad y la resistencia a compresión de los compuestos seleccionados..	179
Figura 8-16 Adherencia superficial de los compuestos de yeso con poliestireno expandido	180
Figura 8-17 Absorción de agua por capilaridad de los compuestos de yeso con poliestireno expandido ...	180
Figura 8-18 Resultados durabilidad compuestos con poliestireno expandido	181
Figura 8-19 Coeficiente de conductividad térmico de los compuestos de yeso con poliestireno expandido	181
Figura 8-20 Coeficientes de absorción acústica de los compuestos con residuo de EPS	182
Figura 8-21 Amasada con EPS (izquierda) y con residuo de XPS (derecha).....	183
Figura 8-22 Relación agua/yeso de los compuestos de yeso con residuo de XPS y con EPS	184
Figura 8-23 Tiempo de fraguado de los compuestos de yeso con residuo de XPS y con EPS	185
Figura 8-24 Densidad de los compuestos de yeso con residuo de XPS y con EPS	186
Figura 8-25 Reducción de densidad en compuestos de yeso con agregados ligeros (datos obtenidos de la tabla 8-1).....	186
Figura 8-26 Dureza superficial vs densidad de los compuestos de yeso con residuo de XPS y con EPS ..	187
Figura 8-27 Reducción de densidad frente a pérdida de dureza superficial en compuestos de yeso con agregados ligeros (datos obtenidos de la tabla 8-1)	188
Figura 8-28 Resistencia mecánica de los compuestos de yeso con residuo de XPS y con EPS frente a su densidad	189
Figura 8-29 Reducción de densidad frente a pérdida de resistencia a flexión en compuestos de yeso con agregados ligeros (datos obtenidos de la tabla 8-1)	189
Figura 8-30 Reducción de densidad frente a pérdida de resistencia a compresión en compuestos de yeso con agregados ligeros (datos obtenidos de la tabla 8-1)	190
Figura 8-31 Adherencia superficial de los compuestos de yeso con residuo de XPS y con EPS	191
Figura 8-32 Absorción de agua por capilaridad de los compuestos de yeso con residuo de XPS y con EPS	191
Figura 8-33 Durabilidad de los compuestos de yeso con residuo de XPS y con EPS	192
Figura 8-34 Coeficiente de conductividad térmico de los compuestos de yeso con residuo de XPS y con EPS	193
Figura 8-35 Reducción de densidad y coeficiente de conductividad térmico en compuestos de yeso con agregados ligeros (datos obtenidos de la tabla 8-1)	193
Figura 8-36 Conductividad térmica media de materiales de construcción (Instituto Eduardo Torroja & Instituto de la Construcción de Castilla y León, 2007) en comparación con los compuestos de yeso con XPS	194
Figura 8-37 Coeficientes de absorción obtenidos mediante tubo de Kundt de los compuestos de yeso con residuo de XPS y con EPS	194
Figura 10-1 Sección cerramiento envolvente vertical modelo referencia	212
Figura 10-2 Mallado tetraédrico.....	213
Figura 10-3 Representación de izquierda a derecha del flujo de calor para los modelos referencia y los escenarios 1.1, 1.2 y 1.3 del cerramiento envolvente vertical.....	214
Figura 10-4 Representación del flujo de calor en el modelo de referencia con la temperatura interior del escenario 1.3	214

Figura 10-5 Sección cerramiento envolvente horizontal modelo referencia	215
Figura 10-6 Mallado tetraédrico	216
Figura 10-7 Representación del flujo de calor para los modelos referencia (izda.) y el escenario 2.1 (derecha) del cerramiento envolvente horizontal.....	216
Figura 10-8 Sección partición interior modelo referencia.....	217
Figura 10-9 Mallado tetraédrico de la partición	218
Figura 10-10 Representación de izquierda a derecha del flujo de calor para la referencia y los escenarios de la partición interior	218
Figura 10-11 Representación del flujo de calor en el modelo de referencia con la temperatura interior del escenario 1.3	219
Figura 0-1 Tamaños de fibra SikaFiber M-12 de Sika.....	277
Figura 0-2 Microscopía del compuesto de yeso con poliestireno extruido y fibra de polipropileno a 27x (izquierda) y 220x (derecha).....	278
Figura 0-3 Densidad de compuestos de yeso con residuo de XPS reforzados con fibra de polipropileno ..	278
Figura 0-4 Dureza superficial de compuestos de yeso con residuo de XPS reforzados con fibra de polipropileno	278
Figura 0-5 Resistencia a flexión de compuestos de yeso con residuo de XPS reforzados con fibra de polipropileno	279
Figura 0-6 Resistencia a compresión de compuestos de yeso con residuo de XPS reforzados con fibra de polipropileno	279
Figura 0-7 Rotura a flexión de probeta de yeso con XPS y fibra de polipropileno (izquierda) y sección (derecha)	279
Figura 0-8 Gráfico de medias para la variable dependiente densidad y el factor porcentaje de residuo	282
Figura 0-9 Gráfico de medias para la variable dependiente densidad y el factor porcentaje de dispersión	282
Figura 0-10 Gráfico de medias para la variable dependiente densidad y el factor porcentaje de fibra	282
Figura 0-11 Gráfico de interacciones para la variable dependiente densidad y los factores porcentaje de residuo y porcentaje de dispersión	283
Figura 0-12 Gráfico de interacciones para la variable dependiente densidad y los factores porcentaje de residuo y porcentaje de fibra	283
Figura 0-13 Gráfico de interacciones para la variable dependiente densidad y los factores porcentaje de fibra y porcentaje de dispersión.....	283
Figura 0-14 Gráfico de medias para la variable dependiente dureza superficial y el factor porcentaje de residuo	284
Figura 0-15 Gráfico de medias para la variable dependiente dureza superficial y el factor porcentaje de dispersión	285
Figura 0-16 Gráfico de medias para la variable dependiente dureza superficial y el factor porcentaje de fibra	285
Figura 0-17 Gráfico de interacciones para la variable dependiente dureza superficial y los factores porcentaje de residuo y porcentaje de dispersión	285
Figura 0-18 Gráfico de interacciones para la variable dependiente dureza superficial y los factores porcentaje de residuo y porcentaje de fibra	285
Figura 0-19 Gráfico de interacciones para la variable dependiente dureza superficial y los factores porcentaje de dispersión y porcentaje de fibra.....	286
Figura 0-20 Gráfico de medias para la variable dependiente resistencia a flexión y el factor porcentaje de residuo	287
Figura 0-21 Gráfico de medias para la variable dependiente resistencia a flexión y el factor porcentaje de dispersión	287
Figura 0-22 Gráfico de medias para la variable dependiente resistencia a flexión y el factor porcentaje de fibra	287
Figura 0-23 Gráfico de interacciones para la variable dependiente resistencia a flexión y los factores porcentaje de residuo y porcentaje de dispersión	288
Figura 0-24 Gráfico de interacciones para la variable dependiente resistencia a flexión y los factores porcentaje de residuo y porcentaje de fibra	288

Figura 0-25 Gráfico de interacciones para la variable dependiente resistencia a flexión y los factores porcentaje de fibra y porcentaje de dispersión.....	288
Figura 0-26 Gráfico de medias para la variable dependiente resistencia a compresión y el factor porcentaje de residuo	289
Figura 0-27 Gráfico de medias para la variable dependiente resistencia a compresión y el factor porcentaje de dispersión	289
Figura 0-28 Gráfico de medias para la variable dependiente resistencia a compresión y el factor porcentaje de fibra	290
Figura 0-29 Gráfico de interacciones para la variable dependiente resistencia a compresión y los factores porcentaje de residuo y porcentaje de dispersión.....	290
Figura 0-30 Gráfico de interacciones para la variable dependiente resistencia a compresión y los factores porcentaje de residuo y porcentaje de fibra	290
Figura 0-31 Gráfico de interacciones para la variable dependiente resistencia a compresión y los factores porcentaje de dispersión y porcentaje de fibra.....	290
Figura 0-32 Gráfico de residuos estadísticos para la variable dependiente densidad frente al factor porcentaje de residuo	291
Figura 0-33 Gráfico de residuos estadísticos para la variable dependiente densidad frente al factor porcentaje de dispersión	291
Figura 0-34 Gráfico de residuos estadísticos para la variable dependiente densidad frente al factor porcentaje de agregado.....	291
Figura 0-35 Gráfico de probabilidad normal para los residuos estadísticos de la variable dependiente densidad	292
Figura 0-36 Gráfico de residuos estadísticos para la variable dependiente dureza superficial frente al factor porcentaje de residuo	292
Figura 0-37 Gráfico de residuos estadísticos para la variable dependiente dureza superficial frente al factor porcentaje de dispersión.....	292
Figura 0-38 Gráfico de residuos estadísticos para la variable dependiente dureza superficial frente al factor porcentaje de fibra	293
Figura 0-39 Gráfico de probabilidad normal para los residuos estadísticos de la variable dependiente dureza superficial.....	293
Figura 0-40 Gráfico de residuos estadísticos para la variable dependiente resistencia a flexión frente al factor porcentaje de residuo	293
Figura 0-41 Gráfico de residuos estadísticos para la variable dependiente resistencia a flexión frente al factor porcentaje de dispersión.....	294
Figura 0-42 Gráfico de residuos estadísticos para la variable dependiente resistencia flexión frente al factor porcentaje de fibra	294
Figura 0-43 Gráfico de probabilidad normal para los residuos estadísticos de la variable dependiente resistencia a flexión	294
Figura 0-44 Gráfico de residuos estadísticos para la variable dependiente resistencia a compresión frente al factor porcentaje de residuo	295
Figura 0-45 Gráfico de residuos estadísticos para la variable dependiente resistencia a compresión frente al factor porcentaje de dispersión	295
Figura 0-46 Gráfico de residuos estadísticos para la variable dependiente resistencia a compresión frente al factor porcentaje de fibra	295
Figura 0-47 Gráfico de probabilidad normal para los residuos estadísticos de la variable dependiente resistencia a compresión	296
Figura 0-48 Comportamiento térmico compuestos óptimos mediante C-Therm TCi.....	319
Figura 0-49 Gráfico de medias para la variable dependiente densidad y el factor porcentaje	324
Figura 0-50 Gráfico de medias para la variable densidad y el factor mezcla de granulometrías	325
Figura 0-51 Gráfico de medias para la variable densidad y el factor granulometría	325
Figura 0-52 Gráfico de interacciones para la variable dependiente densidad y los factores porcentaje y mezcla de granulometrías.....	325

Figura 0-53 Gráfico de interacciones para la variable dependiente densidad y los factores porcentaje y granulometría.....	325
Figura 0-54 Gráfico de interacciones para la variable dependiente densidad y los factores mezcla de granulometrías y granulometría.....	326
Figura 0-55 Gráfico de medias para la variable dependiente dureza superficial y el factor porcentaje de agregado.....	327
Figura 0-56 Gráfico de medias para la variable dependiente dureza superficial y el factor mezcla de granulometrías.....	327
Figura 0-57 Gráfico de medias para la variable dependiente dureza superficial y el factor granulometría..	327
Figura 0-58 Gráfico de interacciones para la variable dependiente dureza superficial y los factores porcentaje de agregado y mezcla de granulometrías	328
Figura 0-59 Gráfico de interacciones para la variable dependiente dureza superficial y los factores porcentaje de agregado y granulometría	328
Figura 0-60 Gráfico de interacciones para la variable dependiente dureza superficial y los factores mezcla de granulometrías y granulometría.....	328
Figura 0-61 Gráfico de medias para la variable dependiente resistencia a flexión y el factor porcentaje de agregado.....	329
Figura 0-62 Gráfico de medias para la variable dependiente resistencia a flexión y el factor mezcla de granulometrías.....	330
Figura 0-63 Gráfico de medias para la variable dependiente resistencia a flexión y el factor mezcla de granulometrías.....	330
Figura 0-64 Gráfico de interacciones para la variable dependiente resistencia a flexión y los factores porcentaje de agregado y mezcla de granulometrías	330
Figura 0-65 Gráfico de interacciones para la variable dependiente resistencia a flexión y los factores porcentaje de agregado y granulometría.....	330
Figura 0-66 Gráfico de interacciones para la variable dependiente resistencia a flexión y los factores mezcla de granulometrías y granulometría.....	331
Figura 0-67 Gráfico de medias para la variable dependiente resistencia a compresión y el factor porcentaje de agregado.....	332
Figura 0-68 Gráfico de medias para la variable dependiente resistencia a compresión y el factor mezcla de granulometrías.....	332
Figura 0-69 Gráfico de medias para la variable dependiente resistencia a compresión y el factor granulometría	332
Figura 0-70 Gráfico de interacciones para la variable dependiente resistencia a compresión y los factores porcentaje de agregado y mezcla de granulometrías	332
Figura 0-71 Gráfico de interacciones para la variable dependiente resistencia a compresión y los factores porcentaje de agregado y granulometría.....	333
Figura 0-72 Gráfico de interacciones para la variable dependiente resistencia a compresión y los factores mezcla de granulometrías y granulometría	333
Figura 0-73 Gráfico de medias para la variable dependiente adherencia superficial y el factor porcentaje de agregado.....	334
Figura 0-74 Gráfico de medias para la variable dependiente adherencia superficial y el factor mezcla de granulometrías.....	334
Figura 0-75 Gráfico de medias para la variable dependiente adherencia superficial y el factor granulometría	334
Figura 0-76 Gráfico de interacciones para la variable dependiente adherencia superficial y los factores porcentaje de agregado y mezcla de granulometrías	335
Figura 0-77 Gráfico de interacciones para la variable dependiente adherencia superficial y los factores porcentaje de agregado y granulometría.....	335
Figura 0-78 Gráfico de interacciones para la variable dependiente adherencia superficial y los factores mezcla de granulometrías y granulometría.....	335
Figura 0-79 Gráfico de medias para la variable dependiente absorción de agua y el factor porcentaje de agregado.....	336

Figura 0-80 Gráfico de medias para la variable dependiente absorción de agua y el factor mezcla de granulometrías	337
Figura 0-81 Gráfico de medias para la variable dependiente absorción de agua y el factor granulometría	337
Figura 0-82 Gráfico de interacciones para la variable dependiente absorción de agua y los factores porcentaje de agregado y mezcla de granulometrías	337
Figura 0-83 Gráfico de interacciones para la variable dependiente absorción de agua y los factores porcentaje de agregado y granulometría	337
Figura 0-84 Gráfico de interacciones para la variable dependiente absorción de agua y los factores mezcla de granulometrías y granulometría	338
Figura 0-85 Gráfico de medias para la variable dependiente conductividad térmica y el factor porcentaje de agregado	339
Figura 0-86 Gráfico de medias para la variable dependiente conductividad térmica y el factor mezcla de granulometrías	339
Figura 0-87 Gráfico de medias para la variable dependiente conductividad térmica y el factor granulometría	339
Figura 0-88 Gráfico de interacciones para la variable dependiente conductividad térmica y los factores porcentaje de agregado y mezcla de granulometrías	339
Figura 0-89 Gráfico de interacciones para la variable dependiente conductividad térmica y los factores porcentaje de agregado y granulometría	340
Figura 0-90 Gráfico de interacciones para la variable dependiente conductividad térmica y los factores mezcla de granulometrías y granulometría	340
Figura 0-91 Gráfico de residuos estadísticos para la variable dependiente densidad frente al factor porcentaje de agregado	340
Figura 0-92 Gráfico de residuos estadísticos para la variable dependiente densidad frente al factor mezcla de granulometrías	341
Figura 0-93 Gráfico de residuos estadísticos para la variable dependiente densidad frente al factor granulometría	341
Figura 0-94 Gráfico de probabilidad normal para los residuos estadísticos de la variable dependiente densidad	341
Figura 0-95 Gráfico de residuos estadísticos para la variable dependiente dureza superficial frente al factor porcentaje de agregado	342
Figura 0-96 Gráfico de residuos estadísticos para la variable dependiente dureza superficial frente al factor mezcla de granulometrías	342
Figura 0-97 Gráfico de residuos estadísticos para la variable dependiente dureza superficial frente al factor granulometría	342
Figura 0-98 Gráfico de probabilidad normal para los residuos estadísticos de la variable dependiente dureza superficial	343
Figura 0-99 Gráfico de residuos estadísticos para la variable dependiente resistencia a flexión frente al factor porcentaje de agregado	343
Figura 0-100 Gráfico de residuos estadísticos para la variable dependiente resistencia a flexión frente al factor mezcla de granulometrías	343
Figura 0-101 Gráfico de residuos estadísticos para la variable dependiente resistencia a flexión frente al factor granulometría	344
Figura 0-102 Gráfico de probabilidad normal para los residuos estadísticos de la variable dependiente resistencia a flexión	344
Figura 0-103 Gráfico de residuos estadísticos para la variable dependiente resistencia a compresión frente al factor porcentaje de agregado	344
Figura 0-104 Gráfico de residuos estadísticos para la variable dependiente resistencia a compresión frente al factor mezcla de granulometrías	345
Figura 0-105 Gráfico de residuos estadísticos para la variable dependiente resistencia a compresión frente al factor granulometría	345
Figura 0-106 Gráfico de probabilidad normal para los residuos estadísticos de la variable dependiente resistencia a compresión	345

Figura 0-107 Gráfico de residuos estadísticos para la variable dependiente adherencia superficial frente al factor porcentaje de agregado.....	346
Figura 0-108 Gráfico de residuos estadísticos para la variable dependiente adherencia superficial frente al factor mezcla de granulometrías	346
Figura 0-109 Gráfico de residuos estadísticos para la variable dependiente adherencia superficial frente al factor granulometría.....	346
Figura 0-110 Gráfico de probabilidad normal para los residuos estadísticos de la variable dependiente adherencia superficial.....	347
Figura 0-111 Gráfico de residuos estadísticos para la variable dependiente absorción de agua frente al factor porcentaje de agregado.....	347
Figura 0-112 Gráfico de residuos estadísticos para la variable dependiente absorción de agua frente al factor mezcla de granulometrías	347
Figura 0-113 Gráfico de residuos estadísticos para la variable dependiente absorción de agua frente al factor granulometría.....	348
Figura 0-114 Gráfico de probabilidad normal para los residuos estadísticos de la variable dependiente absorción de agua	348
Figura 0-115 Gráfico de residuos estadísticos para la variable dependiente conductividad térmica frente al factor porcentaje de agregado.....	348
Figura 0-116 Gráfico de residuos estadísticos para la variable dependiente conductividad térmica frente al factor mezcla de granulometrías	349
Figura 0-117 Gráfico de residuos estadísticos para la variable dependiente conductividad térmica frente al factor granulometría.....	349
Figura 0-118 Gráfico de probabilidad normal para los residuos estadísticos de la variable dependiente conductividad térmica	349

Listado de tablas

Tabla 1-1 Consumos energéticos (ktep) por sectores en España en el año 2011 (European Commission, 2014)	5
Tabla 1-2 Principales productores mundiales de combustibles fósiles (U.S. Energy Information Administration, 2011)	6
Tabla 1-3 Principales importadores mundiales de combustibles fósiles (U.S. Energy Information Administration, 2011)	7
Tabla 1-4 Datos de aislamiento suministrado y facturado en diferentes obras (Impernor, 2015)	19
Tabla 1-5 Toneladas de RCD generados en España por comunidad autónoma para el período 2008-2011 (GERD, 2013)	25
Tabla 1-6 Tratamiento de los residuos en la Unión Europea en porcentaje (European Commission, 2014)	27
Tabla 1-7. Precio de árido reciclado en la planta de reciclaje de Navalcarnero (UTE, Planta de Navalcarnero, 2014)	30
Tabla 1-8. Tipos de conglomerantes a base de yeso y de yesos para la construcción según la norma UNE-EN 13279-1 (AENOR, 2009)	36
Tabla 1-9 Conductividad térmica mínima para yesos, norma UNE-EN 13279-1 (AENOR, 2009)	40
Tabla 1-10 Resistencia mecánica a flexión mínima para yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso, especificadas en el RP 35.01 (AENOR, 2009), el RP 35.02 (AENOR, 2009) y el RP 35.03 (AENOR, 2009)	41
Tabla 1-11 Dureza superficial mínima para yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso especificadas en el RP 35.01 (AENOR, 2009) y el RP 35.02 (AENOR, 2009)	41
Tabla 1-12 Valores de uso para la resistencia al fuego de tabiques de paneles de yeso, norma UNE-EN 15318 (AENOR, 2009)	43
Tabla 1-13 Valores de uso para el aislamiento acústico en dB de tabiques sin aberturas y tabiques sin aberturas y de gran altura, norma UNE-EN 15318 (AENOR, 2009)	43
Tabla 1-14 Valores mínimos de resistencia a flexión de placas de yeso laminado, norma UNE-EN 520 (AENOR, 2010)	44
Tabla 1-15 Valores de absorción máximos para placas de yeso laminado con capacidad de absorción de agua reducida, norma UNE-EN 520 (AENOR, 2010)	44
Tabla 2-1 Selección de guías y manuales que plantean estrategias para el tratamiento de los RCD	65
Tabla 5-1 Principales parámetros de compuestos de yeso aligerados obtenidos de la búsqueda bibliográfica	93
Tabla 5-2 Estudio de máxima relación agua/yeso	94
Tabla 5-3 Tipos de probetas y tipo de molde para cada ensayo realizado	97
Tabla 5-4 Abreviaturas de los componentes utilizados en los diferentes compuestos	98
Tabla 5-5 Método de nomenclatura de los compuestos	98
Tabla 5-6 Características técnicas medias obtenidas en laboratorio para un yeso elaborado con Iberplast YG de Placo y agua	112
Tabla 5-7 Especificaciones técnicas del poliestireno extruido TOPOX	113
Tabla 5-8 Especificaciones técnicas de las perlas de poliestireno expandido	113
Tabla 5-9 Especificaciones técnicas de las fibras de polipropileno SikaFiber M-12 de Sika	114
Tabla 5-10 Especificaciones técnicas del aditivo Masterset R111	115
Tabla 5-11 Bonificador variable "incorporación de residuo"	118
Tabla 5-12 Datos elementos constructivos (Instituto Eduardo Torroja & Instituto de la Construcción de Castilla y León, 2007)	121
Tabla 6-1 Tamaño de tamiz y porcentaje de residuo retenido para 500 gramos de residuo de XPS triturado	129
Tabla 6-2 Resultados densidad aparente residuo XPS	132
Tabla 7-1 Series de compuestos	140
Tabla 7-2 Series de compuestos	141
Tabla 7-3 Series de compuestos seleccionados	141

Tabla 7-4 P-valores del análisis estadístico de la muestra para la variable dependiente densidad.....	147
Tabla 7-5 P-valores del análisis estadístico de la muestra para la variable dependiente dureza superficial	148
Tabla 7-6 P-valores del análisis estadístico de la muestra para la variable dependiente r. flexión.....	150
Tabla 7-7 P-valores del análisis estadístico de la muestra para la variable dependiente r. compresión	152
Tabla 7-8 P-valores del análisis estadístico de la muestra para la variable dependiente adherencia superficial	154
Tabla 7-9 P-valores del análisis estadístico de la muestra para la variable dependiente absorción de agua por capilaridad	157
Tabla 7-10 P-valores del análisis estadístico de la muestra para la variable dependiente coeficiente de conductividad térmico	159
Tabla 7-11 Comportamiento térmico de compuestos óptimos y referencia mediante C-Therm TCi.....	161
Tabla 8-1 Resultados obtenidos en diferentes estudios de investigación sobre compuestos de yeso aligerados	170
Tabla 8-2 Series de compuestos.....	173
Tabla 9-1 P-valor obtenido del análisis estadístico de los resultados de la encuesta para las distintas aplicaciones	204
Tabla 9-2 Tabla de medias para el revestimiento con intervalos de confianza del 95%	204
Tabla 9-3 Tabla de medias para el tabique con intervalos de confianza del 95%.....	204
Tabla 9-4 Tabla de medias para falsos techos con intervalos de confianza del 95%	205
Tabla 9-5 Valores de índice de aligeramiento eco-eficiente	206
Tabla 10-1 Datos de partida de cada aplicación	211
Tabla 10-2 Escenarios para cerramiento vertical.....	212
Tabla 10-3 Resultados obtenidos para la simulación del cerramiento en envolvente vertical.....	213
Tabla 10-4 Escenarios para cerramiento horizontal.....	215
Tabla 10-5 Resultados obtenidos para la simulación del cerramiento en envolvente horizontal	216
Tabla 10-6 Escenarios para particiones	217
Tabla 10-7 Resultados obtenidos para la simulación de la partición	218
Tabla 0-1 Series de compuestos.....	276
Tabla 0-2 Muestra de datos análisis estadístico	280
Tabla 0-3 Análisis de la varianza - anova multifactorial de la variable dependiente densidad	282
Tabla 0-4 Análisis de la varianza - anova multifactorial de la variable dependiente dureza superficial	284
Tabla 0-5 Análisis de la varianza - anova multifactorial de la variable dependiente resistencia a flexión	287
Tabla 0-6 Análisis de la varianza - anova multifactorial de la variable dependiente resistencia a compresión	289
Tabla 0-7 Test de normalidad para los residuos estadísticos de la variable dependiente densidad.....	292
Tabla 0-8 Test de normalidad para los residuos estadísticos de la variable dependiente dureza superficial	293
Tabla 0-9 Test de normalidad para los residuos estadísticos de la variable dependiente resistencia a flexión	294
Tabla 0-10 Test de normalidad para los residuos estadísticos de la variable dependiente resistencia a compresión	295
Tabla 0-11 Resultados de conductividad térmica series 1-7.....	316
Tabla 0-12 Coeficientes de absorción obtenidos mediante tubo de Kundt de la serie 4	317
Tabla 0-13 Medias de los coeficientes de absorción obtenidos mediante tubo de Kundt de la serie 4	317
Tabla 0-14 Coeficientes de absorción obtenidos mediante tubo de Kundt de la serie 7	318
Tabla 0-15 Medias de los coeficientes de absorción obtenidos mediante tubo de Kundt de la serie 7	318
Tabla 0-16 Resultados de durabilidad para las series 4 y 7	319
Tabla 0-17 Muestra de datos análisis estadístico	322
Tabla 0-18 Análisis de la varianza - anova multifactorial de la variable dependiente densidad	324
Tabla 0-19 Análisis de la varianza - anova multifactorial de la variable dependiente dureza superficial	327
Tabla 0-20 Análisis de la varianza – anova multifactorial de la variable dependiente resistencia a flexión .	329
Tabla 0-21 Análisis de la varianza – anova multifactorial de la variable dependiente resistencia a compresión	331

Tabla 0-22 Análisis de la varianza – anova multifactorial de la variable dependiente adherencia superficial	334
Tabla 0-23 Análisis de la varianza – anova multifactorial de la variable dependiente absorción de agua ...	336
Tabla 0-24 Análisis de la varianza – anova multifactorial de la variable dependiente conductividad térmica	338
Tabla 0-25 Test de normalidad para los residuos estadísticos de la variable dependiente densidad.....	341
Tabla 0-26 Test de normalidad para los residuos estadísticos de la variable dependiente dureza superficial	343
Tabla 0-27 Test de normalidad para los residuos estadísticos de la variable dependiente resistencia a flexión	344
Tabla 0-28 Test de normalidad para los residuos estadísticos de la variable dependiente resistencia a compresión	345
Tabla 0-29 Test de normalidad para los residuos estadísticos de la variable dependiente adherencia superficial	347
Tabla 0-30 Test de normalidad para los residuos estadísticos de la variable dependiente absorción de agua	348
Tabla 0-31 Test de normalidad para los residuos estadísticos de la variable dependiente conductividad térmica	349

Listado de fórmulas

[1]	91
[2]	92
[3]	100
[4]	101
[5]	102
[6]	103
[7]	104
[8]	105
[9]	109
[10]	109
[11]	110
[12]	116
[13]	116
[14]	201
[15]	201
[16]	202
[17]	202
[18]	205
[19]	205
[20]	205
[21]	280
[22]	281
[23]	322
[24]	323

ANEXOS

ANEXO 1. Ficha técnica “high insulation house”

ANEXO 2. Ficha técnica poliestireno extruido *Topox*

ANEXO 3. Refuerzo de compuestos de yeso aligerados con residuo de XPS

ANEXO 4. Resumen completo de resultados

ANEXO 5. Análisis estadístico capítulo 6

ANEXO 6. Resultados de la encuesta

ANEXO

1

**FICHA TÉCNICA “HIGH INSULATION
HOUSE”**

ANEXO 1. FICHA TÉCNICA “HIGH INSULATION HOUSE”

Heat insulation / Heat conduction	LEP 3.6.03																											
Related topics	Heat transition, heat transfer, heat conductivity, thermal radiation, hothouse effect, thermal capacity, temperature amplitude attenuation.																												
Principle and task	<p>A model house with replaceable side walls is used for determining the heat transition coefficients (k values) of various walls and windows and for establishing the heat conductivities of different materials. For this purpose the temperatures on the inside and outside of the walls are measured at a constant interior and outer air temperature (in the steady state).</p> <p>With a multilayer wall structure the temperature difference over a layer is proportional to the particular thermal transmission resistance. The thermal capacity of the wall material affects the wall temperatures during heating up and temporary exposure to solar radiation.</p>																												
Equipment	<table border="0"> <tr> <td>High insulation house</td><td>04507.93</td><td>1</td></tr> <tr> <td>Thermal regul. f. high insul. house</td><td>04506.93</td><td>1</td></tr> <tr> <td>Partitions, plastic foam, 5 off</td><td>44536.02</td><td>1</td></tr> <tr> <td>Lamp socket E27, mains conn.</td><td>06751.00</td><td>1</td></tr> <tr> <td>Filament lamp, 220 V/120 W, w. refl.</td><td>06759.93</td><td>1</td></tr> <tr> <td>Temp. meter 2x NiCr-Ni, hand-held</td><td>07140.00</td><td>2</td></tr> <tr> <td>Thermocouple NiCr-Ni, 500 C max.</td><td>13615.02</td><td>4</td></tr> <tr> <td>Tripod base -PASS-</td><td>02002.55</td><td>1</td></tr> <tr> <td>Stopwatch, digital, 1/100 sec.</td><td>03071.01</td><td>1</td></tr> </table>		High insulation house	04507.93	1	Thermal regul. f. high insul. house	04506.93	1	Partitions, plastic foam, 5 off	44536.02	1	Lamp socket E27, mains conn.	06751.00	1	Filament lamp, 220 V/120 W, w. refl.	06759.93	1	Temp. meter 2x NiCr-Ni, hand-held	07140.00	2	Thermocouple NiCr-Ni, 500 C max.	13615.02	4	Tripod base -PASS-	02002.55	1	Stopwatch, digital, 1/100 sec.	03071.01	1
High insulation house	04507.93	1																											
Thermal regul. f. high insul. house	04506.93	1																											
Partitions, plastic foam, 5 off	44536.02	1																											
Lamp socket E27, mains conn.	06751.00	1																											
Filament lamp, 220 V/120 W, w. refl.	06759.93	1																											
Temp. meter 2x NiCr-Ni, hand-held	07140.00	2																											
Thermocouple NiCr-Ni, 500 C max.	13615.02	4																											
Tripod base -PASS-	02002.55	1																											
Stopwatch, digital, 1/100 sec.	03071.01	1																											
	Problems	<ol style="list-style-type: none"> 1. Measurement and interpretation of water temperatures during the heating up and during temporary external illumination of the walls. 2. Determination of the heat conductivities of wood and Styropor. 3. Determination of the k values of ordinary glass and insulating glass windows and of wooden walls of different thicknesses, and of walls with wood, Styropor or cavity layers. 																											
	Set-up and procedure	<p>Since the measured temperature differences play a part in the evaluation of the experimental results, the agreement of the thermocouples must be checked and any deviations taken into account in the evaluation.</p> <p>Eight different walls and windows are examined in two measurement series each lasting about 1.5 h. Inner and outer wall and air temperatures have to be measured in each case and in addition the temperatures between the layers in the case of a multilayer wall structure.</p> <p>Since there will be a temperature gradient from the top downwards in any house, all temperature measurements have to be recorded at the same height. Holes in the corner posts of the model house are used for the insertion of thermocouples to measure the interior and inside wall temperatures. The thermocouple used for measurement of the interior temperature projects about 5 cm into the house.</p>																											

Fig. 1: Experimental set-up: Heat insulation / Heat conduction.

LEP
3.6.03

Heat insulation / Heat conduction

For measurement of the wall temperatures, the tip of the thermocouple should be firmly secured at the level of the lateral holes and as close as possible to the perpendicular centreline of the wall. The leads must also be secured to the house structure to ensure strain relief.

A 100 W incandescent lamp with a covering cap is used for heating purposes, the interior temperature being kept virtually constant by a heating thermostat. The temperature sensor of the thermostat is secured to the covering cap of the incandescent lamp and connected to the thermostat by means of a 5-pin socket on the floor and on the side of the house. The power supply for heating is introduced via the thermostat plug. The temperature switch is set on the fourth graduated division, thus producing in the steady state an internal temperature in the room of about 60°C.

1. The following walls and windows are used for the first series of measurements:

- wood, $d = 1$ cm in thickness,
- wood, $d = 2$ cm in thickness,
- Styropor, $d = 2$ cm in thickness (large 25×25 cm panel),
- ordinary glass.

The windows are in this case set in a wooden wall, $d = 1$ cm in thickness.

During the heating-up phase:

Measurement of the inside and outside wall temperatures on the wood ($d = 2$ cm) and Styropor ($d = 2$ cm) at intervals of about 5 min. After 30 min, illuminate in succession the wooden wall ($d = 2$ cm), the Styropor wall and the glass window for 5 min with a 150 W incandescent lamp from a distance of about 15 cm, leaving in each case a 5 min interval between illumination phases. Temperature measurements to be recorded at minute intervals. While the window is illuminated, remove the thermocouple from the outer side of the wooden wall and use it to measure the interior temperature.

After about 70 min heating time (steady state): Measure the inside and outside wall temperatures of the Styropor wall over a period of about 5 min, taking particular note of the effect of the connection and disconnection of the heating. Withdraw the thermocouple measuring the interior temperature and use it for measurement of the external air temperature, then resecure it to the outside of the wooden wall, $d = 2$ cm. Measure the inside and outside wall temperatures on the wooden wall ($d = 2$ cm) during a period when the heating is connected. Open the cover of the model house and reposition the inside wall thermocouples on the wood ($d = 1$ cm) and glass sections, then close the cover. Reposition the outside wall thermocouples on the wood ($d = 1$ cm) and glass sections.

Wait about 15 min, measure the wall temperatures, then check the internal and external air temperatures.

2. The following walls and windows are used for the second series of measurements:

- multilayer wall consisting of 2 cm Styropor (inside) and 2 cm wood (outside),
- multilayer wall consisting of 1 cm wood (inside) 1 cm cavity layer (with a narrow foam strip at the edge) and 2 cm Styropor (a small 21×21 cm panel, inserted in the opening of the wall from the outside)
- wooden wall, $d = 3$ cm in thickness,
- insulating glass windows.

Fig. 2: Heat energy flow through a wall.
Internal and external air and wall temperatures:
 θ_{Li} , θ_{La} , θ_{Wi} , θ_{Wa} .

First of all measurements are recorded at four points on the wall with the cavity layer: on the wood, on the room side; on the wood, on the cavity layer side; on the Styropor, on the cavity layer side; on the Styropor, on the outside. Care is required while securing the thermocouples, to prevent folding.

After about 70 min heating time (steady state):

The temperatures at the four points on the wall with a cavity layer are kept under observation and measured over a period of a few minutes.

Open the cover of the house and reposition the thermocouples on the multilayer wood/Styropor wall, loosening the tensioning screws as far as necessary and retightening. Measure the temperature at the following three points: on the Styropor, on the room side; at the contact surface between wood and Styropor; on the wooden wall, on the outside. Then close the cover. The fourth thermocouple is used for air temperature measurements. Wait for about 15 min, measure the wall temperature, then measure the internal air temperatures (mean value over the heating period) and the outer air temperatures.

Open the cover of the house and use two thermocouples for measuring the inside wall temperatures of the wooden wall ($d = 3$ cm) and of the insulating glass windows. Close the cover. The other two thermocouples are placed on the outside of the wooden wall ($d = 3$ cm) and on the insulating glass window. Wait about 15 min and measure the wall temperatures.

Theory and evaluation

The thermal energy flow P through a homogeneous, flat wall is determined in the steady state (permanent state) by means of the air-wall heat transfer and the heat conduction in the wall. The energy flow is governed by the surface area of the wall A and the particular temperature differences:

Air-wall heat transfer, internal
(α_1 = internal heat transfer coefficient)

$$P = \alpha_1 \cdot A \cdot (\theta_{Li} - \theta_{Wi}) \quad (1)$$

Wall-air heat transmission, external
(α_a = external heat transfer coefficient)

$$P = \alpha_a \cdot A \cdot (\theta_{Wa} - \theta_{La}) \quad (2)$$

Heat insulation / Heat conduction

 LEP
3.6.03

Heat conduction in the wall
(d = thickness, λ = heat conductivity)

$$P = \frac{\lambda}{d} \cdot A \cdot (\Theta_{Wi} - \Theta_{Wa}) \quad (3)$$

Rearrangement and summation of these three equations yields

$$P = k \cdot A \cdot (\Theta_{Li} - \Theta_{La}) \quad (4)$$

in which k = heat transition coefficient or k value.

The following formula then applies

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_i} + \frac{1}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_a} \quad (5)$$

The parameter

$$\Delta = \lambda / d \quad (6)$$

which is governed only by the material and thickness of the wall is known as the thermal transmission coefficient.

The reciprocals α , k and Δ are thermal resistance values which are designated the heat transfer resistance, the heat transition resistance and the heat transmission resistance. In a wall consisting of successive layers, equation (3) applies as appropriate to all layers, so that the sum of the heat transmission resistance has to be inserted in equation (5).

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_i} + \frac{1}{\Delta_1} + \frac{1}{\Delta_2} + \dots + \frac{1}{\Delta_n} + \frac{1}{\alpha_a} \quad (7)$$

The phenomena participating in the transfer of heat through a layer of air are the conduction, convection and radiation. Equation (6) yields an approximate value for the heat transmission coefficient of a vertical air layer between non-metallic walls only in the case of small thicknesses ($d < 5$ mm). With an increase in the thickness it is mainly determined by the radiation fraction which, in the case of parallel surfaces, is independent of the distance between them. With layer thicknesses in excess of 5 cm the convection process causes a reduction in the resistance.

Our consideration of the problem has up to now dealt with the steady state. The heating and cooling of a wall accompanying a change of solar radiation is determined by the heat storage capacity C of the wall:

$$C = c \cdot m \quad (8)$$

in which c = specific thermal capacity,
 m = mass of the wall.

Temperature variations on the outside should be reflected as little as possible on the inside. A smaller temperature amplitude on the inside wall is in general accompanied by a correspondingly large phase displacement.

The wood and Styropor wall temperatures recorded during the heating up phase, showed wooden walls of identical thickness to have a higher heat storage capacity. In the Styropor wall steady-state temperatures were reached even after 20 min.

Short-term illumination of the walls gives rise to a very high temperature on the outside wall (heating from about 30° to about 80°C). In the Styropor wall the heating is transmitted with only a very slight time-lag (about 2 min) and a low amplitude to the inner wall (heating by about 7 K). After disconnection of the lamp, the temperatures on both the inside and the outside fall to the initial values within 5 min.

During illumination of the wooden wall the temperature on the inside only rises appreciably after about 2 min, reaching the peak value after a further 8 min. Since the steady-state temperature of the wooden wall has not yet been reached, only a very slight fall in the inside wall temperature occurs on conclusion of the illumination period. The temperature of the outside wall falls back slowly after disconnection of the lamp, reaching the end temperature only after about 30 min.

The entry of light through the window causes the interior temperature to rise initially by about 5 K. The heating comes into operation very much less frequently if at all, so that cooling occurs and the room temperature again falls. A heating of 1–2 K is observed on the inside of wooden and Styropor walls.

In the steady state the interior temperature may vary by about 2 K as a result of the thermostatically controlled heating; it

Table 1

Temperatures of air and insulating materials as well as the values of k and the conductivities of different insulating materials and windows.		Θ_{Li} °C	Θ_{La} °C	Θ_{Wi} °C	Θ_{Wa} °C	P/A W/m ²	k W/Km ²	λ W/Km
Styropor,	2 cm	55.3	22.3	51.6	27.7	44	1.3	0.037
Wood,	1 cm	55.3	22.3	45.1	35.1	109	3.3	0.12
Wood,	2 cm	55.3	22.3	47.3	34.0	95	2.9	0.14
Wood,	3 cm	58.1	23.0	49.1	32.2	75	2.1	0.13
Glass,	5 mm	55.3	22.3	40.7	39.4	139	4.2	0.53
Insulating glass		58.1	23.0	48.7	34.5	93	2.7	–
Values taken from the literature for the thermal conductivities of the materials used:								
Wood (spruce, plywood)		$\lambda = 0.14$ W/Km						
Polystyrene expanded foam,		$\lambda = 0.035$ – 0.041 W/Km						
Bulk density 15–30 kg/m ³								
Glass		$\lambda = 0.7$ – 1.1 W/Km						

LEP
3.6.03

Heat insulation / Heat conduction

also rises by a further 2 K/h after 1 h heating time, so that the interior temperature is slightly higher during the second series of measurements. Measurement of the inside wall temperatures of Styropor walls may reveal a variation of about 0.5 K in parallel with variations in the air temperature, the variation in other types of wall being only 0.1 K (corresponding to 1 digit on the dial).

The thermal energy flow through a wall is determined from the difference in the outside wall and the outside air temperature. The heat transfer coefficient in the case of natural air movement in enclosed rooms is for all wall materials encountered in practice

$$\alpha = 8.1 \text{ W/Km}^2$$

Course of the calculation:

Equation (2) yields P/A

Equation (4) yields k

Equation (3) yields λ

Table 1 contains all the calculated data and measurement results for homogeneous walls and for windows.

The bulk density of the Styropor wall used for this purpose is 20 kg/m^3 . Determination of the thermal conductivity of glass involves a serious error, since the temperature difference across the wall is small.

Equation (5) indicates a linear connection between the heat transition resistance $1/k$ and the wall thickness d , which is reproduced in Fig. 3. The intercept of the axis for $d = 0$ is equal to the sum of the internal and external heat transfer resistance $1/\alpha_i + 1/\alpha_a$; it is obtained by extrapolation of the measurement values for wood (in the model house $\alpha_i > \alpha_a$ as a result of the radiation of heat to the walls from the large radiator). The measurement for Styropor has been entered in the graph in order to make this clear.

The greater the thermal conductivity, the less steep will be the curve. In the case of good heat conductors, the main factor contributing to heat insulation is the heat transfer resistance (due merely to the presence of a wall). The thickness of the wall exerts a considerable influence on the heat transition resistance, especially in the case of bad heat conductors (insulating materials).

The heat transmission coefficient for a vertical layer of air in a wall is calculated from equations (3) and (6) in the following form:

$$\frac{1}{\Lambda} = \frac{\Delta\theta \cdot A}{P} \quad (9)$$

in which $\Delta\theta$ denotes the temperature difference over the air layer and P/A is determined from equation (2).

The measurements on the wood/Styropor wall with a cavity layer yield the following:

$$\frac{P}{A} = 8.1 \frac{\text{W}}{\text{Km}^2} \cdot (27.8^\circ\text{C} - 23.0^\circ\text{C}) = 39 \text{ W/m}^2$$

$$\frac{1}{\Lambda} = \frac{(50.1^\circ\text{C} - 45.1^\circ\text{C})}{39 \text{ W/m}^2} = 0.13 \frac{\text{Km}^2}{\text{W}}$$

Fig. 3: Heat transition resistance $1/k$ as a function of the wall thickness d .

Literature value for an air layer 1 cm in thickness:

$$\frac{1}{\Lambda} = 0.14 \frac{\text{Km}^2}{\text{W}}$$

On a multilayer wall the ratio of the temperature differences is equal to the inverse ratio of the heat transmission resistances:

$$\frac{\Lambda_2}{\Lambda_1} = \frac{\Delta\theta_1}{\Delta\theta_2} \quad (10)$$

This expression is frequently used in conjunction with a heat measuring plate having a known heat transmission coefficient to determine the thermal conductivity value of other materials.

Using equation (10), we obtain for the wood/Styropor walls with layers of identical thickness d , used in the experiment:

$$\frac{\Delta\theta_{\text{wood}}}{\Delta\theta_{\text{Styropor}}} = \frac{\lambda_{\text{Styropor}}}{\lambda_{\text{Wood}}} \quad (11)$$

Assuming λ_{wood} to be a known quantity, the measurement yields the following value:

$$\begin{aligned} \lambda_{\text{Styropor}} &= \frac{34.3^\circ\text{C} - 28.2^\circ\text{C}}{55.4^\circ\text{C} - 34.3^\circ\text{C}} \cdot 0.14 \text{ W/Km} \\ &= 0.040 \text{ W/Km} \end{aligned}$$

ANEXO

2

**FICHA TÉCNICA POLIESTIRENO EXTRUIDO
TOPOX**

ANEXO 2. FICHA TÉCNICA POLIESTIRENO EXTRUIDO TOPOX

TOPOX CUBER SL

Cubierta invertida

Características técnicas:

Propiedad	Valor	Unidad	Norma
Espesor	30,40,50,60,70,80 y 100	mm	EN 823
Largo x ancho	1250x600	mm	EN 822
Resistencia a la compresión mínima (10% deformación)	300	KPa	EN 826
Estabilidad dimensional bajo condiciones específicas de temperatura y humedad (48h, 70°C, 90% HR)	< 5	%	EN 1604
Deformación bajo condiciones específicas de carga a compresión y de temperatura (40KPa, 70°C, 168h)	< 5	%	EN 1605
Fluencia de compresión 2% a 50 años	125	KPa	EN 1606
Tracción mínima perpendicular a las caras	100	KPa	EN 1607
Densidad nominal	35 (+/- 15%)	kg/m ³	EN 1602
Conductividad térmica a 10°C	0,034 (30-60 mm) 0,036 (> 60 mm)	W/m·K	EN 12667 EN 12939
Absorción de agua inmersión total	≤0,7	% volumen	EN 12087
Absorción de agua por difusión	1,5 ⁽¹⁾	% volumen	En 12088
Resistencia hielo-deshielo	≤1	% volumen	EN 12091
Reacción al fuego	E	Euroclase	EN 13501-1
Temperatura límite de aplicación	-50/+75	°C	
Capilaridad	0		
Escuadra	5	mm/m	EN 824
Tolerancia de espesor	+2/-2 (< 50 mm) +3/-2 (≥ 50 mm)	mm	EN 823
Tolerancia de ancho	+/- 8	mm	EN 822
Tolerancia de largo	+/- 10	mm	EN 822
Acabado de la superficie	liso		
Acabado lateral	media madera		

Nota 1: espesores 30-50 mm Wd=3; espesor 60 mm Wd= 2,7; espesores 80-100 Wd= 1,5

Valores de resistencia térmica:

Espesor (mm)	Resistencia térmica (m ² .K/W)
30	0,90
40	1,20
50	1,50
60	1,80
70	1,95
80	2,20
100	2,80

ANEXO

3

**REFUERZO DE COMPUESTOS DE YESO
ALIGERADOS CON RESIDUO DE XPS**

ANEXO 3. REFUERZO DE COMPUESTOS DE YESO ALIGERADOS CON RESIDUO DE XPS

En este estudio complementario se ha analizado un método de refuerzo de los compuestos de yeso aligerados con residuo de poliestireno extruido para contrarrestar la pérdida de resistencia que supone la incorporación de este residuo.

A3.1 METODOLOGÍA

Se ha seleccionado un método de refuerzo en base a los estudios de investigación llevados a cabo por García Santos (1988) y Oliver Ramírez (2009). En estos estudios se analiza el comportamiento de los compuestos de yeso al reforzarlos con fibra de vidrio, fibra de polietileno o fibra de polipropileno, y dispersión sintética y se identifica la combinación de fibras de polipropileno y dispersión sintética como el mejor método de refuerzo de compuestos de yeso.

Teniendo en cuenta esto, en este estudio se va a realizar:

- Un análisis del efecto de la fibra de polipropileno en los compuestos de yeso con residuo de poliestireno extruido;
- Un análisis del efecto de la dispersión sintética en los compuestos de yeso con residuo de poliestireno extruido;
- Un análisis sobre el efecto de la combinación de fibra de polipropileno y dispersión sintética en los compuestos de yeso con residuo de poliestireno extruido.

Los diferentes métodos de refuerzo se van a aplicar sobre los dos compuestos óptimos seleccionados en el capítulo 9 (100Y+80A+3XPSm y 100Y+80A+4XPSm), dando como resultado las series de compuestos de la siguiente tabla:

Serie	Refuerzo	Compuesto
Serie 8	Fibra polipropileno	3%XPSm+1FPP
		3%XPSm+2FPP
		3%XPSm+3FPP
		4%XPSm+1FPP
		4%XPSm+2FPP
		4%XPSm+3FPP
Serie 9	Dispersión sintética	3%XPSm+0,5D
		4%XPSm+0,5D
Serie 10	Dispersión sintética+Fibra pp	3%XPSm+0,5D+1FPP
		3%XPSm+0,5D+2FPP
		3%XPSm+0,5D+3FPP
		4%XPSm+0,5D+1FPP
		4%XPSm+0,5D+2FPP
		4%XPSm+0,5D+3FPP

Tabla 0-1 Series de compuestos

A3.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS

La fibra de polipropileno es el método de refuerzo más empleado en materiales prefabricados de yeso y para este estudio se ha utilizado fibra de polipropileno *SikaFiber M-12* de *Sika* con una

longitud media de 20 mm. En la figura 0-1 se puede observar una muestra de la fibra y los diferentes tamaños de la misma desde 10 mm hasta 30 mm.

Por otra parte, las dispersiones sintéticas son compuestos orgánicos tensoactivos formados por una molécula larga de carbono, con una extremidad hidrófoba y otra hidrófila. La ionización de los filamentos del aditivo produce la separación de los granos de yeso entre sí lo que produce una hidratación y reducción del esfuerzo de cizalla necesario para poner en movimiento el yeso fresco. El principal efecto producido por estos aditivos incide sobre la trabajabilidad del yeso en su estado fresco, ya que retarda el tiempo de fraguado, lo que puede traducirse en una reducción de la dosis de agua. Entre los efectos derivados de la reducción de la dosis de agua se encuentra la mejora de la uniformidad general del yeso, aumentando la resistencia mecánica de la pasta misma, lo que permite obtener un aumento de la cohesión con el cual se reduce la tendencia a la segregación. Para este estudio se ha utilizado aditivo retardante de fraguado *Masterset R111* de *Basf*.

Figura 0-1 Tamaños de fibra SikaFiber M-12 de Sika

A la dosificación de los dos compuestos óptimos se le han incorporado porcentajes de fibra de polipropileno del 1, el 2 y el 3% y dispersión sintética en un porcentaje del 0,5% en conjunto y por separado. Sobre estos compuestos se han obtenido los parámetros básicos de densidad, dureza superficial Shore C, resistencia mecánica a flexión y resistencia mecánica a compresión y los resultados se han analizado estadísticamente mediante una análisis de la varianza.

Adicionalmente se ha analizado la estructura a nivel celular de uno de los compuestos de yeso con residuo y fibra mediante microscopía electrónica de barrido, según lo descrito en el apartado 5.1.4.3. ya que la adherencia entre la fibra y la matriz es un parámetro fundamental para la resistencia del material (Mizera, 2004). El resultado de este último ensayo se muestra en la figura 0-2, donde puede observarse en la figura de la izquierda cómo las fibras se entremezclan con la red de agujas del yeso sin atravesar el residuo y en la figura de la derecha se observa como estas agujas del yeso se adhieren a la fibra confirmando que la cohesión entre la interfase del yeso y la fibra es adecuada.

En la figura 0-3 se muestran los resultados de densidad para los dos compuestos óptimos reforzados y se puede observar cómo parece que altos porcentajes de fibra (con o sin dispersión sintética) pueden afectar a la densidad aumentándola. Sin embargo, el resultado estadístico no demuestra que existan diferencias significativas entre los resultados al incrementarse el porcentaje de fibra. A pesar de que en el gráfico de medias para el porcentaje de fibra se ve que el valor para un 3% de fibra es claramente diferente al resto de valores.

Figura 0-2 Microscopía del compuesto de yeso con poliestireno extruido y fibra de polipropileno a 27x (izquierda) y 220x (derecha)

Figura 0-3 Densidad de compuestos de yeso con residuo de XPS reforzados con fibra de polipropileno

Respecto a la dureza superficial Shore C, en la figura 0-4 se observan los resultados y puede verse cómo la dureza superficial aumenta al incorporarse tanto dispersión sintética como fibra de polipropileno, lo que se confirma mediante el análisis de la varianza. Además, el análisis de la varianza también confirma que existe evidencia de que la combinación entre la fibra y el residuo afecta a los resultados de dureza superficial con un P-valor de (0,0114) para un nivel de confianza del 95%.

Figura 0-4 Dureza superficial de compuestos de yeso con residuo de XPS reforzados con fibra de polipropileno

Por último, como puede verse en la figura 0-5 y la figura 0-6, tanto la resistencia mecánica a flexión como a compresión aumentan al incorporarse mayor porcentaje de fibra de polipropileno, lo que se confirma mediante el análisis de la varianza. Este incremento es mucho mayor cuando se incorpora la fibra en combinación con la dispersión sintética. Por otra parte, del análisis de la varianza también se ha confirmado que la combinación de fibra y dispersión sintética afecta al valor de la resistencia mecánica a flexión con un P-valor de 0,0085 al 95% de confianza. Además, como puede verse en la figura 0-7, la rotura a flexión no es limpia, si no que se mantiene unida por las fibras.

Figura 0-5 Resistencia a flexión de compuestos de yeso con residuo de XPS reforzados con fibra de polipropileno

Figura 0-6 Resistencia a compresión de compuestos de yeso con residuo de XPS reforzados con fibra de polipropileno

Figura 0-7 Rotura a flexión de probeta de yeso con XPS y fibra de polipropileno (izquierda) y sección (derecha)

En cualquier caso, los mejores valores se consiguen con la combinación de la fibra y la dispersión sintética, llegándose a reforzar el compuesto que tiene un 3% de residuo de poliestireno extruido hasta en un 30% y el que tiene un 4% hasta en un 35%. Mientras que en el caso de la resistencia a compresión se logra reforzar el compuesto con un 3% hasta en un 36% y el compuesto con un 4% hasta en un 28%.

A3.3 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Para el análisis estadístico se ha realizado un diseño factorial $2^2 \times 4^1$ donde las variables de respuesta que se han analizado son: densidad, dureza superficial, resistencia a flexión y resistencia a compresión. Y los factores que han intervenido en el estudio son: porcentaje del residuo (en dos niveles: 3 y 4%), porcentaje de dispersión (en dos niveles: 0 y 0,5%) y porcentaje de fibra (en cuatro niveles: 0, 1, 2 y 3%). Los cálculos se han llevado a cabo con el software *Statgraphics Centurion* y la muestra se puede ver en la siguiente tabla:

FACTORES			VARIABLES DEPENDIENTES			
% residuo	% dispersión	% fibra	Densidad	Dureza superficial	Resistencia flexión	Resistencia compresión
3	0	0	0,84	2,07	2,07	2,78
3	0	1	0,84	2,17	2,17	2,79
3	0	2	0,85	2,26	2,26	2,85
3	0	3	0,86	2,38	2,38	3,23
3	0,5	0	0,84	2,10	2,10	2,80
3	0,5	1	0,83	2,30	2,30	3,40
3	0,5	2	0,84	2,51	2,51	3,65
3	0,5	3	0,85	2,70	2,70	3,80
4	0	0	0,73	1,68	1,68	2,46
4	0	1	0,73	1,79	1,79	2,51
4	0	2	0,78	1,82	1,82	2,65
4	0	3	0,82	1,90	1,90	2,77
4	0	0	0,72	1,80	1,80	2,51
4	0,5	1	0,74	1,91	1,91	2,85
4	0,5	2	0,74	2,15	2,15	2,99
4	0,5	3	0,77	2,27	2,27	3,15

Tabla 0-2 Muestra de datos análisis estadístico

El modelo que explica la relación entre cada una de las variables de respuesta y los niveles de los factores viene dado en la expresión [23].

$$y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_k + (\alpha\beta)_{ij} + (\alpha\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\alpha\beta\gamma)_{ijk} + \text{error aleatorio} \quad [21]$$

Siendo,

y_{ijk} , el valor observado en la experimentación para una variable dependiente cuando el primer factor se encuentra en un nivel "i", el segundo factor en un nivel "j" y el tercer nivel en un nivel "k".

μ , la media general de la variable dependiente

α_i , el efecto producido por el porcentaje de residuo para cada uno de sus "i" valores (3 y 4)

β_j , el efecto producido por el porcentaje de dispersión para cada uno de sus “j” valores (0 y 0,5%)

γ_k , el efecto producido por el porcentaje de fibra para cada uno de sus “k” valores (0, 1, 2 y 3%)

$(\alpha\beta)_{ij}$, el efecto de la interacción del porcentaje de residuo con el porcentaje de dispersión para cada una de las combinaciones de los “i” valores del porcentaje de residuo con los “j” valores del porcentaje de dispersión

$(\alpha\gamma)_{ik}$, el efecto de la interacción del porcentaje de residuo con el porcentaje de fibra para cada una de las combinaciones de los “i” valores del porcentaje de residuo con los “k” valores del porcentaje de fibra

$(\beta\gamma)_{jk}$, el efecto de la interacción del porcentaje de dispersión con el porcentaje de fibra para cada una de las combinaciones de los “j” valores del porcentaje de dispersión con los “k” valores del porcentaje de fibra

$(\alpha\beta\gamma)_{ijk}$, el efecto de la interacción del porcentaje de residuo con el porcentaje de dispersión y el porcentaje de fibra para cada una de las combinaciones de los “i” valores del porcentaje de residuo con los “j” valores del porcentaje de dispersión y los “k” valores del porcentaje de fibra

error aleatorio, que es la diferencia entre el valor observado para el factor y el valor previsto y que se supone que tiene un comportamiento N (0, σ^2)

Sin embargo, al hacer el análisis se ha considerado que la interacción $(\alpha\beta\gamma)_{ijk}$ es nula, por lo que el modelo real que analizamos viene dado en la expresión [24].

$$y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_k + (\alpha\beta)_{ij} + (\alpha\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + \text{error aleatorio} \quad [22]$$

Análisis de la varianza para cada una de las variables con los tres factores y sus interacciones

Del análisis de la varianza de la variable dependiente densidad con los tres factores (tabla 0-3) y en el rango de experimentación, se entiende que:

- Existe evidencia de que el porcentaje de residuo incorporado al compuesto afecta de forma estadísticamente significativa a la densidad, ya que su P-valor (0,0009) es menor que 0,05, con una confianza del 95%. Lo que se confirma al observar el gráfico de medias (véase figura 0-8).
- No existe evidencia de que el porcentaje de dispersión incorporado al compuesto afecte de forma estadísticamente significativa a la densidad, ya que su P-valor (0,1081) es mayor que 0,05, con una confianza del 95%. Lo que se confirma al observar el gráfico de medias (véase figura 0-9).
- No existe evidencia de que el porcentaje de fibra incorporado al compuesto afecte de forma estadísticamente significativa a la densidad, ya que su P-valor (0,0535) es mayor que 0,05, con una confianza del 95%. Aunque al observar el gráfico de medias sí parece que cuanto más fibra se incorpora mayor es el valor de la densidad (véase figura 0-10).

Adicionalmente, del análisis de las interacciones de nivel 2 entre los tres factores para la variable dependiente densidad y en el rango de experimentación, se entiende que:

- No existe evidencia de que exista ninguna dependencia entre los factores, ya que el P-valor de las interacciones es mucho mayor que 0,05 en todos los casos.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:% residuo	0,0324	1	0,0324	185,14	0,0009
B:% dispersión	0,0009	1	0,0009	5,14	0,1081
C:% fibra	0,004625	3	0,00154167	8,81	0,0535
INTERACCIONES					
AB	0,000225	1	0,000225	1,29	0,3393
AC	0,00165	3	0,00055	3,14	0,1861
BC	0,00065	3	0,000216667	1,24	0,4324
RESIDUOS ESTADÍST.	0,000525	3	0,000175		
TOTAL (CORREGIDO)	0,040975	15			

Tabla 0-3 Análisis de la varianza - anova multifactorial de la variable dependiente densidad

Figura 0-8 Gráfico de medias para la variable dependiente densidad y el factor porcentaje de residuo

Figura 0-9 Gráfico de medias para la variable dependiente densidad y el factor porcentaje de dispersión

Figura 0-10 Gráfico de medias para la variable dependiente densidad y el factor porcentaje de fibra

Figura 0-11 Gráfico de interacciones para la variable dependiente densidad y los factores porcentaje de residuo y porcentaje de dispersión

Figura 0-12 Gráfico de interacciones para la variable dependiente densidad y los factores porcentaje de residuo y porcentaje de fibra

Figura 0-13 Gráfico de interacciones para la variable dependiente densidad y los factores porcentaje de fibra y porcentaje de dispersión

Del análisis de la varianza de la variable dependiente dureza superficial con los tres factores (tabla 0-4) y en el rango de experimentación, se entiende que:

- Existe evidencia de que el porcentaje de residuo incorporado al compuesto afecta de forma estadísticamente significativa a la dureza superficial, ya que su P-valor (0,0012) es menor que 0,05, con una confianza del 95%. Lo que se confirma al observar el gráfico de medias (véase figura 0-14).

- Existe evidencia de que el porcentaje de residuo incorporado al compuesto afecta de forma estadísticamente significativa a la dureza superficial, ya que su P-valor (0,0380) es menor que 0,05, con una confianza del 95%. Lo que se confirma al observar el gráfico de medias (véase figura 0-15).
- Existe evidencia de que el porcentaje de residuo incorporado al compuesto afecta de forma estadísticamente significativa a la dureza superficial, ya que su P-valor (0,0039) es menor que 0,05, con una confianza del 95%. Lo que se confirma al observar el gráfico de medias (véase figura 0-16).

Adicionalmente, del análisis de las interacciones de nivel 2 entre los tres factores para la variable dependiente dureza superficial y en el rango de experimentación, se entiende que:

- No existe evidencia de que el cambio de porcentaje de residuo en la dureza superficial dependa del porcentaje de dispersión, ya que su P-valor (0,4731) es mayor que 0,05, con una confianza del 95%. Lo que se confirma al observar el gráfico de interacciones (véase figura 0-59).
- Existe evidencia de que el cambio de porcentaje de residuo en la dureza superficial dependa del porcentaje de fibra, ya que su P-valor (0,0114) es menor que 0,05, con una confianza del 95%. Al observar el gráfico de interacciones (véase figura 0-58), se confirma esta dependencia.
- No existe evidencia de que el cambio de porcentaje de dispersión en la dureza superficial dependa del porcentaje de fibra, ya que su P-valor (0,3264) es mayor que 0,05, con una confianza del 95%. Lo que se confirma al observar el gráfico de interacciones (véase figura 0-59).

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:% residuo	131,848	1	131,848	149,90	0,0012
B:% dispersión	11,1056	1	11,1056	12,63	0,0380
C:% fibra	149,323	3	49,7745	56,59	0,0039
INTERACCIONES					
AB	0,589056	1	0,589056	0,67	0,4731
AC	70,9199	3	23,64	26,88	0,0114
BC	4,65217	3	1,55072	1,76	0,3264
RESIDUOS ESTADÍST.	2,63867	3	0,879556		
TOTAL (CORREGIDO)	371,077	15			

Tabla 0-4 Análisis de la varianza - anova multifactorial de la variable dependiente dureza superficial

Figura 0-14 Gráfico de medias para la variable dependiente dureza superficial y el factor porcentaje de residuo

Figura 0-15 Gráfico de medias para la variable dependiente dureza superficial y el factor porcentaje de dispersión

Figura 0-16 Gráfico de medias para la variable dependiente dureza superficial y el factor porcentaje de fibra

Figura 0-17 Gráfico de interacciones para la variable dependiente dureza superficial y los factores porcentaje de residuo y porcentaje de dispersión

Figura 0-18 Gráfico de interacciones para la variable dependiente dureza superficial y los factores porcentaje de residuo y porcentaje de fibra

Figura 0-19 Gráfico de interacciones para la variable dependiente dureza superficial y los factores porcentaje de dispersión y porcentaje de fibra

Del análisis de la varianza de la variable dependiente resistencia a flexión con los tres factores (tabla 0-5 y en el rango de experimentación, se entiende que:

- Existe evidencia de que el porcentaje de residuo incorporado al compuesto afecta de forma estadísticamente significativa a la resistencia a flexión, ya que su P-valor (0,0001) es menor que 0,05, con una confianza del 95%. Lo que se confirma al observar el gráfico de medias (véase figura 0-20).
- Existe evidencia de que el porcentaje de dispersión incorporado al compuesto afecta de forma estadísticamente significativa a la resistencia a flexión, ya que su P-valor (0,0003) es menor que 0,05, con una confianza del 95%. Lo que se confirma al observar el gráfico de medias (véase figura 0-21).
- Existe evidencia de que el porcentaje de fibra incorporado al compuesto afecta de forma estadísticamente significativa a la resistencia a flexión, ya que su P-valor (0,0005) es menor que 0,05, con una confianza del 95%. Lo que se confirma al observar el gráfico de medias (véase figura 0-22).

Adicionalmente, del análisis de las interacciones de nivel 2 entre los tres factores para la variable dependiente resistencia a flexión y en el rango de experimentación, se entiende que:

- No existe evidencia de que el cambio de porcentaje de residuo en la resistencia a flexión dependa del porcentaje de dispersión, ya que su P-valor (0,1018) es mayor que 0,05, con una confianza del 95%. Lo que se confirma al observar el gráfico de interacciones (véase figura 0-23).
- No existe evidencia de que el cambio de porcentaje de residuo en la dureza superficial dependa del porcentaje de fibra, ya que su P-valor (0,1386) es mayor que 0,05, con una confianza del 95%. Lo que se confirma al observar el gráfico de interacciones (véase figura 0-24).
- Existe evidencia de que el cambio de porcentaje de dispersión en la dureza superficial depende del porcentaje de fibra, ya que su P-valor (0,0085) es menor que 0,05, con una confianza del 95%. Al observar el gráfico de interacciones (véase figura 0-25), se confirma esta dependencia.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:% residuo	0,628056	1	0,628056	1240,60	0,0001
B:% dispersión	0,174306	1	0,174306	344,31	0,0003
C:% fibra	0,360619	3	0,120206	237,44	0,0005
INTERACCIONES					
AB	0,00275625	1	0,00275625	5,44	0,1018
AC	0,00621875	3	0,00207292	4,09	0,1386
BC	0,0500687	3	0,0166896	32,97	0,0085
RESIDUOS ESTADÍST.	0,00151875	3	0,00050625		
TOTAL (CORREGIDO)	1,22354	15			

Tabla 0-5 Análisis de la varianza - anova multifactorial de la variable dependiente resistencia a flexión

Figura 0-20 Gráfico de medias para la variable dependiente resistencia a flexión y el factor porcentaje de residuo

Figura 0-21 Gráfico de medias para la variable dependiente resistencia a flexión y el factor porcentaje de dispersión

Figura 0-22 Gráfico de medias para la variable dependiente resistencia a flexión y el factor porcentaje de fibra

Figura 0-23 Gráfico de interacciones para la variable dependiente resistencia a flexión y los factores porcentaje de residuo y porcentaje de dispersión

Figura 0-24 Gráfico de interacciones para la variable dependiente resistencia a flexión y los factores porcentaje de residuo y porcentaje de fibra

Figura 0-25 Gráfico de interacciones para la variable dependiente resistencia a flexión y los factores porcentaje de fibra y porcentaje de dispersión

Del análisis de la varianza de la variable dependiente resistencia a compresión con los tres factores (véase tabla 0-6) y en el rango de experimentación, se entiende que:

- Existe evidencia de que el porcentaje de residuo incorporado al compuesto afecta de forma estadísticamente significativa a la resistencia a compresión, ya que su P-valor (0,0035) es menor que 0,05, con una confianza del 95%. Lo que se confirma al observar el gráfico de medias (véase figura 0-26).
- Existe evidencia de que el porcentaje de dispersión incorporado al compuesto afecta de forma estadísticamente significativa a la resistencia a compresión, ya que su P-valor

(0,0046) es menor que 0,05, con una confianza del 95%. Lo que se confirma al observar el gráfico de medias (véase figura 0-27).

- Existe evidencia de que el porcentaje de fibra incorporado al compuesto afecta de forma estadísticamente significativa a la resistencia a compresión, ya que su P-valor (0,0128) es menor que 0,05, con una confianza del 95%. Lo que se confirma al observar el gráfico de medias (véase figura 0-28).

Adicionalmente, del análisis de las interacciones de nivel 2 entre los tres factores para la variable dependiente resistencia a compresión y en el rango de experimentación, se entiende que:

- No existe evidencia de que exista ninguna dependencia entre los factores, ya que el P-valor de las interacciones es mucho mayor que 0,05 en todos los casos.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:% residuo	0,726756	1	0,726756	70,63	0,0035
B:% dispersión	0,604506	1	0,604506	58,75	0,0046
C:% fibra	0,765769	3	0,255256	24,81	0,0128
INTERACCIONES					
AB	0,0495062	1	0,0495062	4,81	0,1159
AC	0,0314187	3	0,0104729	1,02	0,4944
BC	0,172869	3	0,0576229	5,60	0,0954
RESIDUOS ESTADÍST.	0,0308688	3	0,0102896		
TOTAL (CORREGIDO)	2,38169	15			

Tabla 0-6 Análisis de la varianza - anova multifactorial de la variable dependiente resistencia a compresión

Figura 0-26 Gráfico de medias para la variable dependiente resistencia a compresión y el factor porcentaje de residuo

Figura 0-27 Gráfico de medias para la variable dependiente resistencia a compresión y el factor porcentaje de dispersión

Figura 0-28 Gráfico de medias para la variable dependiente resistencia a compresión y el factor porcentaje de fibra

Figura 0-29 Gráfico de interacciones para la variable dependiente resistencia a compresión y los factores porcentaje de residuo y porcentaje de dispersión

Figura 0-30 Gráfico de interacciones para la variable dependiente resistencia a compresión y los factores porcentaje de residuo y porcentaje de fibra

Figura 0-31 Gráfico de interacciones para la variable dependiente resistencia a compresión y los factores porcentaje de dispersión y porcentaje de fibra

Diagnosis

Para que el estudio estadístico del análisis de la varianza sea válido y las conclusiones sean científicamente creíbles, el error tiene que ser una normal $N(0, \sigma^2)$. Esta comprobación se realiza comprobando la homocedasticidad y la normalidad a través de los residuos estadísticos de cada variable.

Como se puede ver en los siguientes gráficos, del análisis de los residuos estadísticos de la variable densidad frente a cada uno de los factores: porcentaje de residuo (véase figura 0-32), porcentaje de dispersión (véase figura 0-33) y porcentaje de fibra (véase figura 0-34), se observa que en todos los casos se cumple la homocedasticidad.

Figura 0-32 Gráfico de residuos estadísticos para la variable dependiente densidad frente al factor porcentaje de residuo

Figura 0-33 Gráfico de residuos estadísticos para la variable dependiente densidad frente al factor porcentaje de dispersión

Figura 0-34 Gráfico de residuos estadísticos para la variable dependiente densidad frente al factor porcentaje de agregado

Del análisis del gráfico de probabilidad normal para los residuos estadísticos de la variable densidad (véase figura 0-35) y del test de normalidad (véase tabla 0-7), se observa que también se cumple la normalidad con una confianza del 95%, ya que los residuos estadísticos se asemejan a una recta y los P-valores del test de normalidad son mayores que 0,05.

Figura 0-35 Gráfico de probabilidad normal para los residuos estadísticos de la variable dependiente densidad

Prueba	Estadístico	Valor-P
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,941857	0,367129

Tabla 0-7 Test de normalidad para los residuos estadísticos de la variable dependiente densidad

Como se puede ver en los siguientes gráficos, del análisis de los residuos estadísticos de la variable dureza superficial frente a cada uno de los factores: porcentaje de residuo (véase figura 0-36), porcentaje de dispersión (véase figura 0-37) y porcentaje de fibra (véase figura 0-38), se observa que en todos los casos se cumple la homocedasticidad.

Figura 0-36 Gráfico de residuos estadísticos para la variable dependiente dureza superficial frente al factor porcentaje de residuo

Figura 0-37 Gráfico de residuos estadísticos para la variable dependiente dureza superficial frente al factor porcentaje de dispersión

Figura 0-38 Gráfico de residuos estadísticos para la variable dependiente dureza superficial frente al factor porcentaje de fibra

Del análisis del gráfico de probabilidad normal para los residuos estadísticos de la variable densidad (véase figura 0-39) y del test de normalidad (véase tabla 0-8), se observa que también se cumple la normalidad con una confianza del 95%, ya que los residuos estadísticos se asemejan a una recta y los P-valores del test de normalidad son mayores que 0,05.

Figura 0-39 Gráfico de probabilidad normal para los residuos estadísticos de la variable dependiente dureza superficial

Prueba	Estadístico	Valor-P
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,942992	0,381237

Tabla 0-8 Test de normalidad para los residuos estadísticos de la variable dependiente dureza superficial

Como se puede ver en los siguientes gráficos, del análisis de los residuos estadísticos de la variable resistencia a flexión frente a cada uno de los factores: porcentaje de residuo (véase figura 0-40), porcentaje de dispersión (véase figura 0-41) y porcentaje de fibra (véase figura 0-42), se observa que en todos los casos se cumple la homocedasticidad.

Figura 0-40 Gráfico de residuos estadísticos para la variable dependiente resistencia a flexión frente al factor porcentaje de residuo

Figura 0-41 Gráfico de residuos estadísticos para la variable dependiente resistencia a flexión frente al factor porcentaje de dispersión

Figura 0-42 Gráfico de residuos estadísticos para la variable dependiente resistencia flexión frente al factor porcentaje de fibra

Del análisis del gráfico de probabilidad normal para los residuos estadísticos de la variable densidad (véase figura 0-43) y del test de normalidad (véase tabla 0-9), se observa que también se cumple la normalidad con una confianza del 95%, ya que los residuos estadísticos se asemejan a una recta y los P-valores del test de normalidad son mayores que 0,05.

Figura 0-43 Gráfico de probabilidad normal para los residuos estadísticos de la variable dependiente resistencia a flexión

Prueba	Estadístico	Valor-P
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,947693	0,444106

Tabla 0-9 Test de normalidad para los residuos estadísticos de la variable dependiente resistencia a flexión

Como se puede ver en los siguientes gráficos, del análisis de los residuos estadísticos de la variable resistencia a compresión frente a cada uno de los factores: porcentaje de residuo (véase figura 0-44), porcentaje de dispersión (véase figura 0-45) y porcentaje de fibra (véase figura 0-46), se observa que en todos los casos se cumple la homocedasticidad.

Figura 0-44 Gráfico de residuos estadísticos para la variable dependiente resistencia a compresión frente al factor porcentaje de residuo

Figura 0-45 Gráfico de residuos estadísticos para la variable dependiente resistencia a compresión frente al factor porcentaje de dispersión

Figura 0-46 Gráfico de residuos estadísticos para la variable dependiente resistencia a compresión frente al factor porcentaje de fibra

Del análisis del gráfico de probabilidad normal para los residuos estadísticos de la variable densidad (véase figura 0-47) y del test de normalidad (véase tabla 0-10), se observa que también se cumple la normalidad con una confianza del 95%, ya que los residuos estadísticos se asemejan a una recta y los P-valores del test de normalidad son mayores que 0,05.

Prueba	Estadístico	Valor-P
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,888342	0,0529555

Tabla 0-10 Test de normalidad para los residuos estadísticos de la variable dependiente resistencia a compresión

Figura 0-47 Gráfico de probabilidad normal para los residuos estadísticos de la variable dependiente resistencia a compresión

A3.4 CONCLUSIONES

Se ha analizado un método de refuerzo de los compuestos de yeso que ha sido previamente estudiado en profundidad por otros investigadores y se ha confirmado que la fibra de polipropileno sirve para reforzar los compuestos de yeso aligerados con residuo de poliestireno extruido, pero que se obtienen mejores resultados si se combina la fibra de polipropileno con dispersión sintética. En este estudio no se ha modificado la relación agua/yeso, pero es previsible que con la adición de la dispersión sintética, al ser un retardante del fraguado, se pueda reducir la cantidad de agua de amasado, lo que serviría para aumentar más la resistencia mecánica.

Respecto a la densidad, parece que la adición de fibras y aditivos de refuerzo hacen que aumente su valor, pero esto no se ha confirmado mediante el análisis de varianza. A pesar de que con la incorporación de un 3% de fibra de polipropileno aumenta la densidad en un 12%, lo que es preocupante a la hora de diseñar compuestos de yeso aligerados y por tanto debería analizarse en mayor profundidad.

Por otra parte, tanto la dureza superficial como la resistencia mecánica mejoran al incorporarse la fibra, obteniéndose mejores resultados al incorporar también la dispersión sintética. La combinación de residuo y fibra parece tener un efecto positivo en la mejora de la dureza superficial, posiblemente porque la fibra sirve para rellenar las coqueras que se forman al añadir el residuo. Además, la fibra hace que no se produzca una rotura completa, si no que las probetas al romperse se mantienen unidas y se ha confirmado que la combinación de fibra y dispersión sintética afecta positivamente a la mejora de la resistencia mecánica a flexión.

Con esta metodología de refuerzo se ha llegado a reforzar la dureza superficial hasta en un 33%, la resistencia mecánica a flexión hasta en un 35% y la resistencia mecánica a compresión hasta en un 37%.

A3.5 TRABAJOS CITADOS

- García Santos, A., 1988. Comportamiento mecánico de yeso reforzado con polímeros sintéticos (tesis doctoral). Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- Mizera, J., 2004. The influence of admixture of fibres from artificial plastics upon the technical properties of composite gypsum materials. Silicates industriels, Volumen 3-4, pp. 43-45 .
- Oliver Ramírez, A., 2009. Integración de materiales de cambio de fase en placas de yeso reforzadas con fibras de polipropileno (tesis doctoral). Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.

ANEXO

4

RESUMEN COMPLETO DE RESULTADOS

ANEXO 4. RESUMEN COMPLETO DE RESULTADOS

Referencia				Denominación:100Y+80A
Resultados ensayos		Probetas		Media
				Densidad (g/cm³)	312,32		1,22	
					310,00			
					314,64			
				Dureza superficial (Shore C)	67,20		67,28	
68,25								
66,39								
Dosificación		Peso (g)		Resistencia flexión (N/mm²)	3,20		3,16	
Yeso	900		2,98					
Agua	720		3,30					
XPSm	-		Resistencia compresión (N/mm²)	5,20	5,67	5,59		
XPSg	-			5,30	6,29			
XPSf	-			5,35	5,73			
EPS	-		Adherencia superficial (N/mm²)	0,77		0,78		
Dispersión	-			0,90				
Fibra polipropileno	-			0,78				
Caracterización estado húmedo				0,76				
Relación a/y	m ₃	114g		0,57	0,69			
	m ₄	200g	Absorción de agua por capilaridad (mm/min)					
	Ø	170mm						
Tiempo de fraguado	T _{if}	6,55			6,55	51,86		51,83
	T ₀	0	51,84					
			51,79					

Serie 1				Denominación:100Y+80A+2XPSm
Resultados ensayos		Probetas	Media
				Densidad (g/cm³)	217,60		0,85
					215,00		
					220,20		
				Dureza superficial (Shore C)	64,53		62,17
61,10							
60,88							
Dosificación		Peso (g)		Resistencia flexión (N/mm²)	2,15		2,16
Yeso	630		2,12				
Agua	504		2,21				
XPSm	12,6		Resistencia compresión (N/mm²)	3,24	3,25	3,26	
XPSg	-			3,17	3,39		
XPSf	-			3,25	3,26		
EPS	-		Adherencia superficial (N/mm²)	0,67		0,68	
Dispersión	-			0,80			
Fibra polipropileno	-			0,68			
Caracterización estado húmedo				0,66			
Relación a/y	m ₃	114g		0,57	0,59		
	m ₄	200g					
	Ø	164mm					
Tiempo de fraguado	T _{if}	4,90	4,90	Absorción de agua por capilaridad (mm/min)	32,03	32,00	
	T ₀	0			32,01		
					31,96		

Serie 1				Denominación:100Y+80A+3XPSm
Resultados ensayos		Probetas		Media
				Densidad (g/cm³)	215,04		0,84	
					212,00			
					218,08			
				Dureza superficial (Shore C)	58,52		56,10	
					57,00			
52,78								
Dosificación		Peso (g)		Resistencia flexión (N/mm²)	2,03		2,07	
Yeso	620		1,98					
Agua	496		2,20					
XPSm	18,6		Resistencia compresión (N/mm²)	2,76		2,77	2,78	
XPSg	-			2,69		2,91		
XPSf	-			2,77		2,78		
EPS	-							
Dispersión	-		Adherencia superficial (N/mm²)	0,49		0,50		
Fibra polipropileno	-			0,62				
Caracterización estado húmedo				0,50				
Relación a/y	m ₃	130g		0,48				
	m ₄	200g		0,41				
	Ø	161mm						
Tiempo de fraguado	T _{if}	4,70	Absorción de agua por capilaridad (mm/min)	30,32		30,29		
	T ₀	0		30,30				
				30,25				

Serie 1				Denominación:100Y+80A+4XPSm
Resultados ensayos		Probetas		Media
				Densidad (g/cm³)	186,88		0,73	
					180,00			
					193,76			
				Dureza superficial (Shore C)	45,20		45,00	
					47,00			
42,80								
Dosificación		Peso (g)		Resistencia flexión (N/mm²)	1,75		1,68	
Yeso	540		1,48					
Agua	432		1,81					
XPSm	21,6		Resistencia compresión (N/mm²)	2,44		2,45	2,46	
XPSg	-			2,37		2,59		
XPSf	-			2,45		2,46		
EPS	-		Adherencia superficial (N/mm²)	0,40		0,41		
Dispersión	-			0,53				
Fibra polipropileno	-			0,41				
Caracterización estado húmedo				0,39				
Relación a/y	m ₃	152g		0,76				0,32
	m ₄	200g						
	Ø	169mm						
Tiempo de fraguado	T _{if}	4,50	4,50		25,23		25,20	
	T ₀	0			25,25			
					25,12			

Serie 2				Denominación:100Y+80A+1,5XPSm+0,5XPSf			
---------	--	--	--	---------------------------------------	--	--	--

Resultados ensayos		Probetas		Media
				Densidad (g/cm³)			220,16	0,86
							225,00	
							215,32	
				Dureza superficial (Shore C)			54,90	52,93
		55,00						
		48,89						
Dosificación		Peso (g)		Resistencia flexión (N/mm²)		2,25	2,33	
Yeso	640		2,40					
Agua	512		2,34					
XPSm	9,6							
XPSg	-		Resistencia compresión (N/mm²)		3,99	4,00	4,01	
XPSf	3,2				3,92	4,14		
EPS	-				4,00	4,01		
Dispersión	-		Adherencia superficial (N/mm²)		0,57		0,58	
Fibra polipropileno	-				0,65			
Caracterización estado húmedo					0,58			
Relación a/y	m ₃	114g			0,57	0,56		
	m ₄	200g	0,54					
	Ø	167mm						
Tiempo de fraguado	T _{if}	4,85	4,85	Absorción de agua por capilaridad (mm/min)		34,03	34,00	
						34,05		
	T ₀	0				33,92		

Serie 2				Denominación:100Y+80A+2,25XPSm+0,75XPSf
Resultados ensayos		Probetas		Media
				Densidad (g/cm³)	204,80		0,80	
					210,00			
					199,60			
				Dureza superficial (Shore C)	51,00		50,80	
52,00								
49,40								
Dosificación		Peso (g)		Resistencia flexión (N/mm²)	2,11		2,10	
Yeso	600		2,25					
Agua	480		1,94					
XPSm	13,5		Resistencia compresión (N/mm²)	2,97		2,98	2,99	
XPSg	-			2,90		3,12		
XPSf	4,5			2,98		2,99		
EPS	-							
Dispersión	-		Adherencia superficial (N/mm²)	0,47		0,48		
Fibra polipropileno	-			0,55				
Caracterización estado húmedo				0,48				
Relación a/y	m ₃	132g		0,66	0,46			
	m ₄	200g			0,44			
	Ø	165mm						
Tiempo de fraguado	T _{if}	4,55	4,55	Absorción de agua por capilaridad (mm/min)	32,13		32,10	
	T ₀	0			32,15			
					32,02			

Serie 2				Denominación:100Y+80A+3XPSm+1XPSf
Resultados ensayos		Probetas		Media
				Densidad (g/cm³)	176,64		0,69	
					175,00			
					178,28			
				Dureza superficial (Shore C)	29,00		28,80	
32,00								
25,40								
Dosificación		Peso (g)		Resistencia flexión (N/mm²)	1,42		1,45	
Yeso	510		1,35					
Agua	408		1,58					
XPSm	15,3		Resistencia compresión (N/mm²)	1,63	1,64	1,65		
XPSg	-			1,56	1,78			
XPSf	5,1			1,64	1,65			
EPS	-		Adherencia superficial (N/mm²)	0,39		0,40		
Dispersión	-			0,47				
Fibra polipropileno	-			0,40				
Caracterización estado húmedo				0,38				
Relación a/y	m ₃	150g		0,75	0,36			
	m ₄	200g	30,28					
	Ø	163mm	30,30					
Tiempo de fraguado	T _{if}	4,30	4,30	Absorción de agua por capilaridad (mm/min)	30,25			
	T ₀	0			30,17			

Serie 3				Denominación:100Y+80A+1XPSm+1XPSf
Resultados ensayos		Probetas		Media
				Densidad (g/cm³)	222,72		0,87	
					226,00			
					219,44			
				Dureza superficial (Shore C)	53,80		57,53	
					54,80			
63,99								
Dosificación		Peso (g)		Resistencia flexión (N/mm²)	2,40		2,51	
Yeso	645		2,60					
Agua	516		2,53					
XPSm	6,45		Resistencia compresión (N/mm²)	3,83	3,84	3,85		
XPSg	-			3,76	3,98			
XPSf	6,45			3,84	3,85			
EPS	-		Adherencia superficial (N/mm²)	0,59		0,60		
Dispersión	-			0,67				
Fibra polipropileno	-			0,60				
Caracterización estado húmedo				0,58				
Relación a/y	m ₃	118g		0,59	0,56			
	m ₄	200g	Absorción de agua por capilaridad (mm/min)		38,72			
	Ø	161mm			38,92			
Tiempo de fraguado	T _{if}	4,70		4,70	38,92		38,52	
	T ₀	0	37,92					

Serie 3				Denominación:100Y+80A+1,5XPSm+1,5XPSf
Resultados ensayos		Probetas		Media
				Densidad (g/cm³)	209,92		0,82	
					210,00			
					209,84			
				Dureza superficial (Shore C)	58,90		55,00	
					57,00			
49,10								
Dosificación		Peso (g)		Resistencia flexión (N/mm²)	2,38		2,38	
Yeso	610		2,40					
Agua	488		2,36					
XPSm	9,15		Resistencia compresión (N/mm²)	3,14	3,15	3,16		
XPSg	-			3,07	3,29			
XPSf	9,15			3,15	3,16			
EPS	-		Adherencia superficial (N/mm²)	0,47		0,48		
Dispersión	-			0,55				
Fibra polipropileno	-			0,48				
Caracterización estado húmedo				0,46				
Relación a/y	m ₃	136g	0,68	0,44		Absorción de agua por capilaridad (mm/min)	33,70	33,50
	m ₄	200g		33,90				
	Ø	165mm		32,90				
Tiempo de fraguado	T _{if}	4,68	4,68	33,90				
	T ₀	0		32,90				

Serie 3				Denominación:100Y+80A+2XPSm+2XPSf
Resultados ensayos		Probetas		Media
				Densidad (g/cm³)	189,44		0,74	
					185,00			
					193,88			
				Dureza superficial (Shore C)	32,00		32,37	
35,70								
29,41								
Dosificación		Peso (g)		Resistencia flexión (N/mm²)	1,52		1,58	
Yeso	550		1,50					
Agua	440		1,72					
XPSm	11		Resistencia compresión (N/mm²)	1,69	1,70	1,71		
XPSg	-			1,62	1,84			
XPSf	11			1,70	1,71			
EPS	-		Adherencia superficial (N/mm²)	0,39		0,40		
Dispersión	-			0,47				
Fibra polipropileno	-			0,40				
Caracterización estado húmedo				0,38				
Relación a/y	m ₃	154g		0,77	0,36			
	m ₄	200g	31,40					
	Ø	168mm	31,60					
Tiempo de fraguado	T _{if}	4,40	4,40	Absorción de agua por capilaridad (mm/min)	31,20			
	T ₀	0			30,60			

Serie 4				Denominación:100Y+80A+2XPSg
Resultados ensayos		Probetas		Media
				Densidad (g/cm³)	215,04		0,84	
					217,00			
					213,08			
				Dureza superficial (Shore C)	58,00		57,33	
59,20								
54,79								
Dosificación		Peso (g)		Resistencia flexión (N/mm²)	2,15		2,21	
Yeso	620		2,20					
Agua	496		2,28					
XPSm	-		Resistencia compresión (N/mm²)	3,04	3,05	3,06		
XPSg	12,4			2,97	3,19			
XPSf	-			3,05	3,06			
EPS	-		Adherencia superficial (N/mm²)	0,59		0,60		
Dispersión	-			0,67				
Fibra polipropileno	-			0,60				
Caracterización estado húmedo				0,58				
Relación a/y	m ₃	116g		0,58	0,58			
	m ₄	200g	0,56					
	Ø	170mm	31,37					
Tiempo de fraguado	T _{if}	4,55	4,55	Absorción de agua por capilaridad (mm/min)	31,77		31,87	
	T ₀	0			32,47			

Serie 4				Denominación:100Y+80A+3XPSg
Resultados ensayos		Probetas		Media
				Densidad (g/cm³)	209,92		0,82	
					211,80			
					208,04			
				Dureza superficial (Shore C)	49,50		50,10	
52,60								
48,20								
Dosificación		Peso (g)		Resistencia flexión (N/mm²)	1,97		1,99	
Yeso	610		2,02					
Agua	488		1,98					
XPSm	-		Resistencia compresión (N/mm²)	2,74	2,75	2,76		
XPSg	18,3			2,67	2,89			
XPSf	-			2,75	2,76			
EPS	-		Adherencia superficial (N/mm²)	0,44		0,45		
Dispersión	-			0,52				
Fibra polipropileno	-			0,45				
Caracterización estado húmedo				0,43				
Relación a/y	m ₃	134g		0,67	0,41			
	m ₄	200g						
	Ø	164mm						
Tiempo de fraguado	T _{if}	4,50	4,50	Absorción de agua por capilaridad (mm/min)	28,83		29,33	
	T ₀	0			29,23			
					29,93			

Serie 4				Denominación:100Y+80A+4XPSg
Resultados ensayos		Probetas		Media
				Densidad (g/cm³)	186,88		0,73	
					184,50			
					189,26			
				Dureza superficial (Shore C)	45,03		44,03	
46,50								
40,56								
Dosificación		Peso (g)		Resistencia flexión (N/mm²)	1,54		1,54	
Yeso	540		1,52					
Agua	432		1,56					
XPSm	-		Resistencia compresión (N/mm²)	1,82	1,83	1,84		
XPSg	21,6			1,75	1,97			
XPSf	-			1,83	1,84			
EPS	-		Adherencia superficial (N/mm²)	0,34		0,35		
Dispersión	-			0,42				
Fibra polipropileno	-			0,35				
Caracterización estado húmedo				0,33				
Relación a/y	m ₃	156g		0,78	0,31			
	m ₄	200g						
	Ø	165mm						
Tiempo de fraguado	T _{if}	4,48	4,48	Absorción de agua por capilaridad (mm/min)		23,10	23,60	
	T ₀	0				23,50		
						24,20		

Serie 5				Denominación:100Y+80A+1,5XPSg+0,5XPSf
Resultados ensayos		Probetas		Media
				Densidad (g/cm³)	215,04		0,84	
					211,00			
					219,08			
				Dureza superficial (Shore C)	58,32		57,20	
58,65								
54,63								
Dosificación		Peso (g)		Resistencia flexión (N/mm²)	2,41		2,37	
Yeso	620		2,32					
Agua	496		2,38					
XPSm	-		Resistencia compresión (N/mm²)	3,66	3,67	3,68		
XPSg	9,3			3,59	3,81			
XPSf	3,1			3,67	3,68			
EPS	-		Adherencia superficial (N/mm²)	0,54		0,55		
Dispersión	-			0,62				
Fibra polipropileno	-			0,55				
Caracterización estado húmedo				0,53				
Relación a/y	m ₃	116g		0,58	0,51			
	m ₄	200g	33,65					
	Ø	161mm	34,05					
Tiempo de fraguado	T _{if}	4,50	4,50	Absorción de agua por capilaridad (mm/min)		34,15		
	T ₀	0		34,75				

Serie 5				Denominación:100Y+80A+2,25XPSg+0,75XPSf
Resultados ensayos		Probetas		Media
				Densidad (g/cm³)	202,24		0,79	
					201,00			
					203,48			
				Dureza superficial (Shore C)	51,60		53,07	
					52,00			
55,61								
Dosificación				Peso (g)				
Yeso		585		Resistencia flexión (N/mm²)	2,04		2,06	
Agua		468			2,05			
XPSm		-			2,09			
XPSg		13,16		Resistencia compresión (N/mm²)	2,75	2,76	2,77	
XPSf		4,39			2,68	2,90		
EPS		-			2,76	2,77		
Dispersión		-		Adherencia superficial (N/mm²)	0,39		0,40	
Fibra polipropileno		-			0,47			
Caracterización estado húmedo					0,40			
Relación a/y	m ₃	142g	0,71		0,38			
	m ₄	200g			0,36			
	Ø	167mm						
Tiempo de fraguado	T _{if}	4,46	4,46	Absorción de agua por capilaridad (mm/min)	32,70		33,20	
	T ₀	0			33,10			
					33,80			

Serie 5				Denominación:100Y+80A+3XPSg+1XPSf
Resultados ensayos		Probetas		Media
				Densidad (g/cm³)	176,64		0,69	
					179,10			
					174,18			
				Dureza superficial (Shore C)	35,00		33,93	
					40,00			
26,79								
Dosificación		Peso (g)		Resistencia flexión (N/mm²)	1,33		1,33	
Yeso		510						
Agua		408						
XPSm		-		1,35		1,31		
XPSg		15,3		1,45			1,47	
XPSf		5,1		1,38				
EPS		-		1,46		1,47		
Dispersión		-		0,31			0,32	
Fibra polipropileno		-		0,39				
Caracterización estado húmedo				Adherencia superficial (N/mm²)		0,32		
Relación a/y	m ₃	158g	0,79	0,30				
	m ₄	200g		0,28				
	Ø	169mm						
Tiempo de fraguado	T _{if}	4,41	4,41	Absorción de agua por capilaridad (mm/min)		29,00		29,50
	T ₀	0				29,40		
						30,10		

Serie 6				Denominación:100Y+80A+1XPSg+1XPSf
Resultados ensayos		Probetas		Media
				Densidad (g/cm³)	232,96		0,91	
					233,90			
					232,02			
				Dureza superficial (Shore C)	58,00		57,67	
56,20								
58,81								
Dosificación		Peso (g)		Resistencia flexión (N/mm²)	2,79		2,80	
Yeso	680		2,81					
Agua	544		2,80					
XPSm	-		Resistencia compresión (N/mm²)	3,94	3,95	3,96		
XPSg	6,8			3,87	4,09			
XPSf	6,8			3,95	3,96			
EPS	-		Adherencia superficial (N/mm²)	0,56		0,57		
Dispersión	-			0,64				
Fibra polipropileno	-			0,57				
Caracterización estado húmedo				0,55				
Relación a/y	m ₃	118g		0,59	0,53			
	m ₄	200g	37,00					
	Ø	169mm	37,40					
Tiempo de fraguado	T _{if}	4,48	4,48	38,10				
	T ₀	0						

Serie 6				Denominación:100Y+80A+1,5XPSg+1,5XPSf
Resultados ensayos		Probetas		Media
				Densidad (g/cm³)	215,04		0,84	
					217,00			
					213,08			
<div>Dosificación</div> <div>Peso (g)</div>				Dureza superficial (Shore C)	49,50		47,20	
					41,50			
					50,60			
Yeso		620		Resistencia flexión (N/mm²)	1,99		2,01	
Agua		496			2,02			
XPSm		-			2,02			
XPSg		9,3		Resistencia compresión (N/mm²)	2,66	2,67	2,68	
XPSf		9,3			2,59	2,81		
EPS		-			2,67	2,68		
Dispersión		-		Adherencia superficial (N/mm²)	0,39		0,41	
Fibra polipropileno		-			0,49			
Caracterización estado húmedo					0,41			
Relación a/y	m ₃	140g	0,70		0,38			
	m ₄	200g			0,38			
	Ø	170mm						
Tiempo de fraguado	T _{if}	4,47	4,47	Absorción de agua por capilaridad (mm/min)	31,70		32,20	
				32,10				
	T ₀	0		32,80				

Serie 6				Denominación:100Y+80A+2XPSg+2XPSf
Resultados ensayos		Probetas		Media
				Densidad (g/cm³)	189,44		0,74	
					193,00			
					185,88			
				Dureza superficial (Shore C)	35,00		32,37	
37,70								
24,41								
Dosificación		Peso (g)		Resistencia flexión (N/mm²)	1,56		1,58	
Yeso	560		1,63					
Agua	448		1,55					
XPSm	-		Resistencia compresión (N/mm²)	1,69	1,70	1,71		
XPSg	11,2			1,62	1,84			
XPSf	11,2			1,70	1,71			
EPS	-		Adherencia superficial (N/mm²)	0,32		0,34		
Dispersión	-			0,42				
Fibra polipropileno	-			0,34				
Caracterización estado húmedo				0,31				
Relación a/y	m ₃	162g		0,81	0,31			
	m ₄	200g	0,31					
	Ø	165mm	27,95					
Tiempo de fraguado	T _{if}	4,40	4,40	Absorción de agua por capilaridad (mm/min)	28,35			
	T ₀	0			29,05			

Serie 7				Denominación:100Y+80A+1EPS
Resultados ensayos		Probetas		Media
				Densidad (g/cm³)	204,80		0,80	
					206,00			
					203,60			
				Dureza superficial (Shore C)	49,00		48,93	
41,00								
56,79								
Dosificación		Peso (g)		Resistencia flexión (N/mm²)	2,09		2,10	
Yeso	700		2,12					
Agua	560		2,09					
XPSm	-		Resistencia compresión (N/mm²)	2,88	2,89	2,90		
XPSg	-			2,81	3,03			
XPSf	-			2,89	2,90			
EPS	7		Adherencia superficial (N/mm²)	0,53		0,55		
Dispersión	-			0,63				
Fibra polipropileno	-			0,55				
Caracterización estado húmedo				0,52				
Relación a/y	m ₃	124g		0,62	0,52			
	m ₄	200g	44,50					
	Ø	164mm	44,90					
Tiempo de fraguado	T _{if}	4,92	4,92	Absorción de agua por capilaridad (mm/min)	45,00			
	T ₀	0			45,60			

Serie 7				Denominación:100Y+80A+2EPS
Resultados ensayos		Probetas		Media
				Densidad (g/cm³)	151,04		0,59	
					155,00			
					147,08			
				Dureza superficial (Shore C)	37,80		35,40	
31,00								
37,40								
Dosificación		Peso (g)		Resistencia flexión (N/mm²)	1,44		1,45	
Yeso	520		1,48					
Agua	416		1,43					
XPSm	-		Resistencia compresión (N/mm²)	2,53	2,54	2,55		
XPSg	-			2,46	2,68			
XPSf	-			2,54	2,55			
EPS	10,4		Adherencia superficial (N/mm²)	0,38		0,40		
Dispersión	-			0,48				
Fibra polipropileno	-			0,40				
Caracterización estado húmedo				0,37				
Relación a/y	m ₃	150g	0,75	0,37		42,20		
	m ₄	200g		41,90				
	Ø	162mm		41,80				
Tiempo de fraguado	T _{if}	4,50	4,50	Absorción de agua por capilaridad (mm/min)		42,90		
	T ₀	0		42,90				

Serie 7				Denominación:100Y+80A+3EPS
Resultados ensayos		Probetas		Media																	
				Densidad (g/cm³)	97,28		0,38																		
					101,00																				
					93,56																				
<table><tr><th>Dosificación</th><th>Peso (g)</th></tr><tr><td>Yeso</td><td>500</td></tr><tr><td>Agua</td><td>400</td></tr><tr><td>XPSm</td><td>-</td></tr><tr><td>XPSg</td><td>-</td></tr><tr><td>XPSf</td><td>-</td></tr><tr><td>EPS</td><td>15</td></tr><tr><td>Dispersión</td><td>-</td></tr><tr><td>Fibra polipropileno</td><td>-</td></tr></table>				Dosificación	Peso (g)	Yeso	500	Agua	400	XPSm	-	XPSg	-	XPSf	-	EPS	15	Dispersión	-	Fibra polipropileno	-	Dureza superficial (Shore C)	29,00		28,50
				Dosificación	Peso (g)																				
				Yeso	500																				
Agua	400																								
XPSm	-																								
XPSg	-																								
XPSf	-																								
EPS	15																								
Dispersión	-																								
Fibra polipropileno	-																								
27,00																									
29,50																									
<table><tr><th>Dosificación</th><th>Peso (g)</th></tr><tr><td>Yeso</td><td>500</td></tr><tr><td>Agua</td><td>400</td></tr><tr><td>XPSm</td><td>-</td></tr><tr><td>XPSg</td><td>-</td></tr><tr><td>XPSf</td><td>-</td></tr><tr><td>EPS</td><td>15</td></tr><tr><td>Dispersión</td><td>-</td></tr><tr><td>Fibra polipropileno</td><td>-</td></tr></table>				Dosificación	Peso (g)	Yeso	500	Agua	400	XPSm	-	XPSg	-	XPSf	-	EPS	15	Dispersión	-	Fibra polipropileno	-	Resistencia flexión (N/mm²)	0,96		0,96
				Dosificación	Peso (g)																				
				Yeso	500																				
Agua	400																								
XPSm	-																								
XPSg	-																								
XPSf	-																								
EPS	15																								
Dispersión	-																								
Fibra polipropileno	-																								
0,98																									
0,94																									
<table><tr><th>Dosificación</th><th>Peso (g)</th></tr><tr><td>Yeso</td><td>500</td></tr><tr><td>Agua</td><td>400</td></tr><tr><td>XPSm</td><td>-</td></tr><tr><td>XPSg</td><td>-</td></tr><tr><td>XPSf</td><td>-</td></tr><tr><td>EPS</td><td>15</td></tr><tr><td>Dispersión</td><td>-</td></tr><tr><td>Fibra polipropileno</td><td>-</td></tr></table>				Dosificación	Peso (g)	Yeso	500	Agua	400	XPSm	-	XPSg	-	XPSf	-	EPS	15	Dispersión	-	Fibra polipropileno	-	Resistencia compresión (N/mm²)	1,24	1,25	1,26
				Dosificación	Peso (g)																				
				Yeso	500																				
Agua	400																								
XPSm	-																								
XPSg	-																								
XPSf	-																								
EPS	15																								
Dispersión	-																								
Fibra polipropileno	-																								
1,17	1,39																								
1,25	1,26																								
<table><tr><th>Dosificación</th><th>Peso (g)</th></tr><tr><td>Yeso</td><td>500</td></tr><tr><td>Agua</td><td>400</td></tr><tr><td>XPSm</td><td>-</td></tr><tr><td>XPSg</td><td>-</td></tr><tr><td>XPSf</td><td>-</td></tr><tr><td>EPS</td><td>15</td></tr><tr><td>Dispersión</td><td>-</td></tr><tr><td>Fibra polipropileno</td><td>-</td></tr></table>				Dosificación	Peso (g)	Yeso	500	Agua	400	XPSm	-	XPSg	-	XPSf	-	EPS	15	Dispersión	-	Fibra polipropileno	-	Adherencia superficial (N/mm²)	0,36		0,38
				Dosificación	Peso (g)																				
				Yeso	500																				
				Agua	400																				
XPSm	-																								
XPSg	-																								
XPSf	-																								
EPS	15																								
Dispersión	-																								
Fibra polipropileno	-																								
0,46																									
0,38																									
0,35																									
<table><tr><th>Dosificación</th><th>Peso (g)</th></tr><tr><td>Yeso</td><td>500</td></tr><tr><td>Agua</td><td>400</td></tr><tr><td>XPSm</td><td>-</td></tr><tr><td>XPSg</td><td>-</td></tr><tr><td>XPSf</td><td>-</td></tr><tr><td>EPS</td><td>15</td></tr><tr><td>Dispersión</td><td>-</td></tr><tr><td>Fibra polipropileno</td><td>-</td></tr></table>				Dosificación	Peso (g)	Yeso	500	Agua	400	XPSm	-	XPSg	-	XPSf	-	EPS	15	Dispersión	-	Fibra polipropileno	-	Absorción de agua por capilaridad (mm/min)	39,80		40,10
				Dosificación	Peso (g)																				
				Yeso	500																				
Agua	400																								
XPSm	-																								
XPSg	-																								
XPSf	-																								
EPS	15																								
Dispersión	-																								
Fibra polipropileno	-																								
39,70																									
40,80																									

Serie 8				Denominación:100Y+80A+3XPSm+1FPP
Resultados ensayos		Probetas		Media
				Densidad (g/cm³)	0,82		0,84	
					0,86			
					0,84			
				Dureza superficial (Shore C)	57,35		57,3	
					57,25			
57,30								
Dosificación		Peso (g)		Resistencia flexión (N/mm²)	2,23		2,17	
Yeso	620		2,19					
Agua	496		2,08					
XPSm	18,6		Resistencia compresión (N/mm²)	2,79		2,91	2,79	
XPSg	-			2,62		2,87		
XPSf	-			2,77		2,78		
EPS	-		Adherencia superficial (N/mm²)					
Dispersión	-							
Fibra polipropileno	6,20							
Caracterización estado húmedo								
Relación a/y	m ₃			Absorción de agua por capilaridad (mm/min)				
	m ₄							
	Ø							
Tiempo de fraguado	T _{if}							
	T ₀							

Serie 8				Denominación:100Y+80A+3XPSm+2FPP
Resultados ensayos		Probetas		Media
				Densidad (g/cm³)	0,83		0,85	
					0,87			
					0,85			
Dureza superficial (Shore C)	59,25		59,2					
	59,15							
	59,20							
Dosificación		Peso (g)		Resistencia flexión (N/mm²)	2,25		2,26	
Yeso	630		2,25					
Agua	504		2,29					
XPSm	18,9		Resistencia compresión (N/mm²)	2,85		2,97	2,85	
XPSg	-			2,68		2,93		
XPSf	-			2,83		2,84		
EPS	-		Adherencia superficial (N/mm²)					
Dispersión	-							
Fibra polipropileno	12,6							
Caracterización estado húmedo								
Relación a/y	m ₃							
	m ₄							
	Ø							
Tiempo de fraguado	T _{if}		Absorción de agua por capilaridad (mm/min)					
	T ₀							

Serie 8				Denominación:100Y+80A+3XPSm+3FPP
Resultados ensayos	Probetas	Media
				Densidad (g/cm ³)	0,84	0,86
					0,88	
					0,86	
				Dureza superficial (Shore C)	60,05	60,00
					59,95	
					60,00	
Dosificación		Peso (g)		Resistencia flexión (N/mm ²)	2,38	2,38
Yeso		640			2,36	
Agua		512			2,41	
XPSm		19,2		Resistencia compresión (N/mm ²)	3,23	3,23
XPSg		-			3,35	
XPSf		-			3,06	
EPS		-		Adherencia superficial (N/mm ²)	3,21	3,22
Dispersión		-				
Fibra polipropileno		19,2				
Caracterización estado húmedo				Absorción de agua por capilaridad (mm/min)		
Relación a/y	m ₃					
	m ₄					
	Ø					
Tiempo de fraguado	T _{if}					
	T ₀					

Serie 8				Denominación:100Y+80A+4XPSm+1FPP
Resultados ensayos	Probetas	Media
				Densidad (g/cm ³)	0,71	0,73
					0,75	
					0,73	
				Dureza superficial (Shore C)	46,90	51,00
					55,00	
					51,10	
Dosificación		Peso (g)		Resistencia flexión (N/mm ²)	1,71	1,79
Yeso		540			1,85	
Agua		432			1,81	
XPSm		21,6		Resistencia compresión (N/mm ²)	2,51	2,51
XPSg		-			2,63	
XPSf		-			2,34	
EPS		-		Adherencia superficial (N/mm ²)	2,49	2,50
Dispersión		-				
Fibra polipropileno		5,4				
Caracterización estado húmedo				Absorción de agua por capilaridad (mm/min)		
Relación a/y	m ₃					
	m ₄					
	Ø					
Tiempo de fraguado	T _{if}					
	T ₀					

Serie 8				Denominación:100Y+80A+4XPSm+2FPP
Resultados ensayos		Probetas		Media
				Densidad (g/cm³)	0,76		0,78	
					0,80			
					0,78			
				Dureza superficial (Shore C)	57,22		57,17	
57,12								
57,17								
Dosificación		Peso (g)		Resistencia flexión (N/mm²)	1,82		1,82	
Yeso	580		1,80					
Agua	464		1,85					
XPSm	23,2		Resistencia compresión (N/mm²)	2,65	2,77	2,65		
XPSg	-			2,48	2,73			
XPSf	-			2,63	2,64			
EPS	-		Adherencia superficial (N/mm²)					
Dispersión	-							
Fibra polipropileno	11,6							
Caracterización estado húmedo								
Relación a/y	m ₃							
	m ₄							
	Ø							
Tiempo de fraguado	T _{if}		Absorción de agua por capilaridad (mm/min)					
	T ₀							

Serie 8				Denominación:100Y+80A+4XPSm+3FPP
Resultados ensayos		Probetas		Media
				Densidad (g/cm³)	0,80		0,82	
					0,84			
					0,82			
				Dureza superficial (Shore C)	58,05		58,00	
57,95								
58,00								
Dosificación		Peso (g)		Resistencia flexión (N/mm²)	1,90		1,90	
Yeso	610		1,88					
Agua	488		1,93					
XPSm	24,4		Resistencia compresión (N/mm²)	2,77	2,89	2,77		
XPSg	-			2,60	2,85			
XPSf	-			2,75	2,76			
EPS	-		Adherencia superficial (N/mm²)					
Dispersión	-							
Fibra polipropileno	18,3							
Caracterización estado húmedo								
Relación a/y	m ₃							
	m ₄							
	Ø							
Tiempo de fraguado	T _{if}		Absorción de agua por capilaridad (mm/min)					
	T ₀							

Serie 9				Denominación:100Y+80A+3XPSm+0,5D
Resultados ensayos		Probetas		Media
				Densidad (g/cm³)	0,82		0,84	
					0,86			
					0,84			
				Dureza superficial (Shore C)	60,05		60,00	
					59,95			
60,00								
Dosificación		Peso (g)		Resistencia flexión (N/mm²)	2,10		2,10	
Yeso	620		2,08					
Agua	496		2,13					
XPSm	18,6		Resistencia compresión (N/mm²)	2,80	2,92	2,80		
XPSg	-			2,63	2,88			
XPSf	-			2,78	2,79			
EPS	-		Adherencia superficial (N/mm²)					
Dispersión	3,1							
Fibra polipropileno	-							
Caracterización estado húmedo								
Relación a/y	m ₃							
	m ₄							
	Ø							
Tiempo de fraguado	T _{if}		Absorción de agua por capilaridad (mm/min)					
	T ₀							

Serie 9				Denominación:100Y+80A+4XPSm+0,5D
Resultados ensayos		Probetas		Media
				Densidad (g/cm³)	0,70		0,72	
					0,74			
					0,72			
<div>Dosificación</div> <div>Peso (g)</div> <div>Yeso540</div> <div>Agua432</div> <div>XPSm21,6</div> <div>XPSg-</div> <div>XPSf-</div> <div>EPS-</div> <div>Dispersión2,7</div> <div>Fibra polipropileno-</div>				Dureza superficial (Shore C)	48,05		48,00	
					47,95			
					48,00			
<div>Resistencia flexión (N/mm²)</div>				1,80		1,80		
				1,78				
				1,83				
<div>Resistencia compresión (N/mm²)</div>				2,51	2,63	2,51		
				2,34	2,59			
				2,49	2,50			
<div>Adherencia superficial (N/mm²)</div>								
<div>Caracterización estado húmedo</div> <div>Relación a/y</div> <div> m₃</div> <div> m₄</div> <div> Ø</div> <div>Tiempo de fraguado</div> <div> T_{if}</div> <div> T₀</div>				Absorción de agua por capilaridad (mm/min)				

Serie 10				Denominación:100Y+80A+3XPSm+0,5D+1FPP
Resultados ensayos		Probetas		Media
				Densidad (g/cm³)	0,81		0,83	
					0,85			
					0,83			
Dureza superficial (Shore C)	59,65		59,60					
	59,55							
	59,60							
Dosificación		Peso (g)		Resistencia flexión (N/mm²)	2,30		2,30	
Yeso	615		2,28					
Agua	492		2,33					
XPSm	18,45		Resistencia compresión (N/mm²)	3,40	3,52	3,40		
XPSg	-			3,23	3,48			
XPSf	-			3,38	3,39			
EPS	-		Adherencia superficial (N/mm²)					
Dispersión	3,08							
Fibra polipropileno	6,15							
Caracterización estado húmedo								
Relación a/y	m ₃							
	m ₄							
	Ø							
Tiempo de fraguado	T _{if}							
	T ₀							

Serie 10				Denominación:100Y+80A+3XPSm+0,5D+2FPP
Resultados ensayos		Probetas		Media
				Densidad (g/cm³)	0,82		0,84	
					0,82			
					0,88			
				Dureza superficial (Shore C)	60,24		60,20	
					60,16			
					60,20			
Dosificación		Peso (g)		Resistencia flexión (N/mm²)	2,53		2,51	
Yeso	500		2,52					
Agua	400		2,48					
XPSm	-		Resistencia compresión (N/mm²)	3,65	3,77	3,65		
XPSg	-			3,48	3,73			
XPSf	-			3,63	3,64			
EPS	15		Adherencia superficial (N/mm²)					
Dispersión	-							
Fibra polipropileno	-							
Caracterización estado húmedo								
Relación a/y	m ₃			Absorción de agua por capilaridad (mm/min)				
	m ₄							
	Ø							
Tiempo de fraguado	T _{if}							
	T ₀							

Serie 10				Denominación:100Y+80A+3XPSm+0,5D+3FPP
Resultados ensayos		Probetas		Media
				Densidad (g/cm³)	0,83		0,85	
					0,83			
					0,89			
				Dureza superficial (Shore C)	61,04		61,00	
60,96								
61,00								
Dosificación		Peso (g)		Resistencia flexión (N/mm²)	2,72		2,70	
Yeso	630		2,71					
Agua	504		2,67					
XPSm	18,9		Resistencia compresión (N/mm²)	3,80	3,92	3,80		
XPSg	-			3,63	3,88			
XPSf	-			3,78	3,79			
EPS	-		Adherencia superficial (N/mm²)					
Dispersión	3,15							
Fibra polipropileno	18,9							
Caracterización estado húmedo								
Relación a/y	m ₃							
	m ₄							
	Ø							
Tiempo de fraguado	T _{if}		Absorción de agua por capilaridad (mm/min)					
	T ₀							

Serie 10				Denominación:100Y+80A+4XPSm+0,5D+1FPP
Resultados ensayos		Probetas		Media
				Densidad (g/cm³)	0,72		0,74	
					0,72			
					0,78			
				Dureza superficial (Shore C)	50,04		50,00	
49,96								
50,00								
Dosificación		Peso (g)		Resistencia flexión (N/mm²)	1,93		1,91	
Yeso	550		1,92					
Agua	440		1,88					
XPSm	22		Resistencia compresión (N/mm²)	2,85	2,97	2,85		
XPSg	-			2,68	2,93			
XPSf	-			2,83	2,84			
EPS	-		Adherencia superficial (N/mm²)					
Dispersión	2,75							
Fibra polipropileno	5,50							
Caracterización estado húmedo								
Relación a/y	m ₃							
	m ₄							
	Ø							
Tiempo de fraguado	T _{if}		Absorción de agua por capilaridad (mm/min)					
	T ₀							

Serie 10				Denominación:100Y+80A+4XPSm+0,5D+2FPP
Resultados ensayos		Probetas		Media
				Densidad (g/cm³)	0,72		0,74	
					0,76			
					0,74			
				Dureza superficial (Shore C)	58,24		58,20	
					58,16			
					58,20			
Dosificación		Peso (g)		Resistencia flexión (N/mm²)	2,17		2,15	
Yeso	550		2,16					
Agua	440		2,12					
XPSm	22		Resistencia compresión (N/mm²)	2,99	3,11	2,99		
XPSg	-			2,82	3,07			
XPSf	-			2,97	2,98			
EPS	-		Adherencia superficial (N/mm²)					
Dispersión	2,75							
Fibra polipropileno	5,50							
Caracterización estado húmedo				Absorción de agua por capilaridad (mm/min)				
Relación a/y	m ₃							
	m ₄							
	Ø							
Tiempo de fraguado	T _{if}							
	T ₀							

Serie 10				Denominación:100Y+80A+4XPSm+0,5D+3FPP
Resultados ensayos		Probetas		Media
				Densidad (g/cm³)	0,75		0,77	
					0,79			
					0,77			
				Dureza superficial (Shore C)	60,14		60,10	
					60,06			
					60,10			
Dosificación		Peso (g)		Resistencia flexión (N/mm²)	2,29		2,27	
Yeso	570		2,28					
Agua	456		2,24					
XPSm	22,8		Resistencia compresión (N/mm²)	3,15		3,27	3,15	
XPSg	-			2,98		3,23		
XPSf	-			3,13		3,14		
EPS	-		Adherencia superficial (N/mm²)					
Dispersión	2,85							
Fibra polipropileno	17,1							
Caracterización estado húmedo								
Relación a/y	m ₃			Absorción de agua por capilaridad (mm/min)				
	m ₄							
	Ø							
Tiempo de fraguado	T _{if}							
	T ₀							

Compuesto	T ₁ (°C)	T ₂ (°C)	T ₃ (°C)	T ₄ (°C)	Λ (W/mK)	e (m)	S (m ²)	Λ' (W/mK)	e' (m)	S' (m ²)
REF 100Y+80A	65,76	64,78	36,38	26,36	0,03	0,02	0,06	0,128	0,03	0,06
100Y+80A+2XPSm	65,32	63,69	35,91	22,66	0,03	0,02	0,06	0,094	0,03	0,06
100Y+80A+3XPSm	64,03	62,01	36,47	23,52	0,03	0,02	0,06	0,089	0,03	0,06
100Y+80A+4XPSm	64,03	62,23	36,55	23,44	0,03	0,02	0,06	0,088	0,03	0,06
100Y+80A+1,5XPSm+0,5XPSf	65,02	61,80	32,00	18,10	0,03	0,02	0,06	0,096	0,03	0,06
100Y+80A+2,25XPSm+0,75XPSf	65,70	60,10	37,10	26,30	0,03	0,02	0,06	0,096	0,03	0,06
100Y+80A+3XPSm+1XPSf	65,31	61,10	37,20	25,20	0,03	0,02	0,06	0,090	0,03	0,06
100Y+80A+1XPSm+1XPSf	64,01	63,00	36,60	24,50	0,03	0,02	0,06	0,098	0,03	0,06
100Y+80A+1,5XPSm+1,5XPSf	64,03	62,20	36,01	23,50	0,03	0,02	0,06	0,094	0,03	0,06
100Y+80A+2XPSm+2XPSf	65,12	63,20	35,80	22,20	0,03	0,02	0,06	0,091	0,03	0,06
100Y+80A+2XPSg	64,23	60,90	35,70	23,44	0,03	0,02	0,06	0,092	0,03	0,06
100Y+80A+3XPSg	64,70	61,02	37,20	25,10	0,03	0,02	0,06	0,089	0,03	0,06
100Y+80A+4XPSg	65,15	63,60	37,61	24,30	0,03	0,02	0,06	0,088	0,03	0,06
100Y+80A+1,5XPSg+0,5XPSf	64,05	62,50	35,80	23,20	0,03	0,02	0,06	0,095	0,03	0,06
100Y+80A+2,25XPSg+0,75XPSf	65,15	63,89	36,30	22,50	0,03	0,02	0,06	0,090	0,03	0,06
100Y+80A+3XPSg+1XPSf	64,09	62,70	35,60	21,80	0,03	0,02	0,06	0,088	0,03	0,06
100Y+80A+1XPSg+1XPSf	65,01	63,80	35,80	22,60	0,03	0,02	0,06	0,095	0,03	0,06
100Y+80A+1,5XPSg+1,5XPSf	64,90	63,20	37,10	24,21	0,03	0,02	0,06	0,091	0,03	0,06
100Y+80A+2XPSg+2XPSf	64,89	62,90	37,90	25,44	0,03	0,02	0,06	0,090	0,03	0,06
100Y+80A+1EPS	64,29	63,15	33,30	21,89	0,03	0,02	0,06	0,118	0,03	0,06
100Y+80A+2EPS	65,01	64,01	33,20	20,60	0,03	0,02	0,06	0,110	0,03	0,06
100Y+80A+3EPS	65,10	63,50	36,80	24,90	0,03	0,02	0,06	0,101	0,03	0,06

Tabla 0-11 Resultados de conductividad térmica series 1-7

	Referencia			100Y+80A+2XPSg			100Y+80A+3XPSg			100Y+80A+4XPSg		
	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c
Frecuencia (Hz)	Coeficiente de absorción obtenido mediante tubo de Kundt											
100	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
125	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,002	0,000	0,007
160	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
200	0,003	0,001	0,005	0,010	0,008	0,012	0,003	0,001	0,005	0,013	0,011	0,015
250	0,066	0,056	0,097	0,073	0,063	0,104	0,066	0,056	0,097	0,073	0,063	0,104
315	0,087	0,085	0,089	0,090	0,088	0,092	0,090	0,088	0,092	0,093	0,091	0,095
400	0,031	0,030	0,029	0,038	0,037	0,036	0,031	0,030	0,029	0,044	0,043	0,042
500	0,018	0,003	0,018	0,025	0,010	0,025	0,025	0,010	0,025	0,028	0,013	0,028
630	0,042	0,038	0,040	0,042	0,038	0,040	0,049	0,045	0,047	0,055	0,051	0,053
800	0,044	0,043	0,042	0,044	0,043	0,042	0,051	0,050	0,049	0,054	0,053	0,052
1000	0,042	0,027	0,042	0,045	0,030	0,045	0,052	0,037	0,052	0,055	0,040	0,055
1250	0,031	0,029	0,030	0,034	0,032	0,033	0,048	0,046	0,047	0,041	0,039	0,040
1600	0,036	0,009	0,036	0,046	0,019	0,046	0,049	0,022	0,049	0,059	0,032	0,059
2000	0,033	0,048	0,039	0,036	0,051	0,042	0,043	0,058	0,049	0,056	0,071	0,062
2500	0,051	0,064	0,065	0,061	0,074	0,075	0,061	0,074	0,075	0,078	0,091	0,092
3150	0,084	0,083	0,082	0,081	0,080	0,079	0,091	0,090	0,089	0,104	0,103	0,102
4000	0,066	0,081	0,072	0,063	0,078	0,069	0,083	0,098	0,089	0,093	0,108	0,099
5000	0,081	0,074	0,085	0,071	0,064	0,075	0,081	0,074	0,085	0,091	0,084	0,095

Tabla 0-12 Coeficientes de absorción obtenidos mediante tubo de Kundt de la serie 4

	Referencia	100Y+80A+2XPSg	100Y+80A+3XPSg	100Y+80A+4XPSg
Frecuencia (Hz)	Coeficiente de absorción obtenido mediante tubo de Kundt			
100	0,000	0,000	0,000	0,000
125	0,000	0,000	0,000	0,003
160	0,000	0,000	0,000	0,000
200	0,003	0,010	0,003	0,013
250	0,073	0,080	0,073	0,080
315	0,087	0,090	0,090	0,093
400	0,030	0,037	0,030	0,043
500	0,013	0,020	0,020	0,023
630	0,040	0,040	0,047	0,053
800	0,043	0,043	0,050	0,053
1000	0,037	0,040	0,047	0,050
1250	0,030	0,033	0,047	0,040
1600	0,027	0,037	0,040	0,050
2000	0,040	0,043	0,050	0,063
2500	0,060	0,070	0,070	0,087
3150	0,083	0,080	0,090	0,103
4000	0,073	0,070	0,090	0,100
5000	0,080	0,07	0,08	0,09

Tabla 0-13 Medias de los coeficientes de absorción obtenidos mediante tubo de Kundt de la serie 4

	Referencia			100Y+80A+1EPS			100Y+80A+2EPS			100Y+80A+3EPS		
	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c
Frecuencia (Hz)	Coeficiente de absorción obtenido mediante tubo de Kundt											
100	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
125	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,030	0,000	0,000	0,000
160	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
200	0,003	0,001	0,005	0,010	0,008	0,012	0,010	0,008	0,012	0,000	0,000	0,000
250	0,066	0,056	0,097	0,073	0,063	0,104	0,073	0,063	0,104	0,073	0,063	0,104
315	0,087	0,085	0,089	0,090	0,088	0,092	0,090	0,088	0,092	0,090	0,088	0,092
400	0,031	0,030	0,029	0,041	0,040	0,039	0,031	0,030	0,029	0,031	0,030	0,029
500	0,018	0,003	0,018	0,025	0,010	0,025	0,025	0,010	0,025	0,025	0,010	0,025
630	0,042	0,038	0,040	0,042	0,038	0,040	0,042	0,038	0,040	0,042	0,038	0,040
800	0,044	0,043	0,042	0,041	0,040	0,039	0,041	0,040	0,039	0,051	0,050	0,049
1000	0,042	0,027	0,042	0,045	0,030	0,045	0,045	0,030	0,045	0,045	0,030	0,045
1250	0,031	0,029	0,030	0,031	0,029	0,030	0,041	0,039	0,040	0,031	0,029	0,030
1600	0,036	0,009	0,036	0,049	0,022	0,049	0,039	0,012	0,039	0,039	0,012	0,039
2000	0,033	0,048	0,039	0,043	0,058	0,049	0,033	0,048	0,039	0,033	0,048	0,039
2500	0,051	0,064	0,065	0,061	0,074	0,075	0,051	0,064	0,065	0,051	0,064	0,065
3150	0,084	0,083	0,082	0,081	0,080	0,079	0,081	0,080	0,079	0,091	0,090	0,089
4000	0,066	0,081	0,072	0,063	0,078	0,069	0,063	0,078	0,069	0,073	0,088	0,079
5000	0,081	0,074	0,085	0,071	0,064	0,075	0,071	0,064	0,075	0,081	0,074	0,085

Tabla 0-14 Coeficientes de absorción obtenidos mediante tubo de Kundt de la serie 7

	Referencia	100Y+80A+1EPS	100Y+80A+2EPS	100Y+80A+3EPS
Frecuencia (Hz)	Coeficiente de absorción obtenido mediante tubo de Kundt			
100	0,000	0,000	0,000	0,000
125	0,000	0,000	0,010	0,000
160	0,000	0,000	0,000	0,000
200	0,003	0,010	0,010	0,000
250	0,073	0,080	0,080	0,080
315	0,087	0,090	0,090	0,090
400	0,030	0,040	0,030	0,030
500	0,013	0,020	0,020	0,020
630	0,040	0,040	0,040	0,040
800	0,043	0,040	0,040	0,050
1000	0,037	0,040	0,040	0,040
1250	0,030	0,030	0,040	0,030
1600	0,027	0,040	0,030	0,030
2000	0,040	0,050	0,040	0,040
2500	0,060	0,070	0,060	0,060
3150	0,083	0,080	0,080	0,090
4000	0,073	0,070	0,070	0,080
5000	0,080	0,070	0,070	0,080

Tabla 0-15 Medias de los coeficientes de absorción obtenidos mediante tubo de Kundt de la serie 7

Compuesto	Probeta	Ciclo 1				Ciclo 2				Ciclo 3			
		Peso desecado (g)		Peso saturado (g)		Peso desecado (g)		Peso saturado (g)		Peso desecado (g)		Peso saturado (g)	
REF	1	312,3 2	312,3 2	396,6 8	396,6 3	141,9 5	138,5	196,4	196,5	65,55	65,5		
	2	310		399,0 9		136,6 3		196,4 2		67,96			
	3	314,6 4		394,1 2		136,9 2		196,6 8		62,99			
2XPSg	1	238,0 9	238,8 7	309,1 8	309,1 3	51,55	48,1	107,0 3	107,1 3	21,25	22,03		
	2	239,9		311,5 9		46,23		107,0 5		23,06			
	3	238,6 2		306,6 2		46,52		107,3 1		21,78			
3XPSg	1	195,7 2	196,5	267,3 5	267,3	13,68	10,23	68,17	68,27	3,37	3,47		
	2	197,5 3		269,7 6		8,36		68,19		3,39			
	3	196,2 5		264,7 9		8,65		68,45		3,65			
4XPSg	1	180,7 9	181,5 7	257,5 5	257,5	1,57	1,67						
	2	182,6		259,9 6		1,59							
	3	181,3 2		254,9 9		1,85							
1EPS	1	171,9 2	172,7	280,0 5	280	35,15	35,25	90,02	90,12				
	2	173,7 3		282,4 6		35,17		90,04					
	3	172,4 5		277,4 9		35,43		90,3					
2EPS	1	124,3 5	125,1 3	267,3 5	267,3	10,13	10,23						
	2	126,1 6		269,7 6		10,15							
	3	124,8 8		264,7 9		10,41							
3EPS	1	95,62	96,4	220,2 5	220,2	4,95	1,5						
	2	97,43		222,6 6		-0,37							
	3	96,15		217,6 9		-0,08							

Tabla 0-16 Resultados de durabilidad para las series 4 y 7

Aplicación	C. conductividad térmica (W/mK)		Efusividad térmica (W√s/m²K)		Calor específico (J/kgK)
100Y+80A	0,372	0,365	733,02	725,04	1.209,79
	0,361		720,93		
	0,361		721,17		
100Y+80A+3XPSm	0,236	0,236	584,92	584,88	1.058,14
	0,235		583,94		
	0,237		585,78		
100Y+80A+4XPSm	0,212	0,207	557,69	552,41	1.238,32
	0,205		549,77		
	0,205		549,78		

Figura 0-48 Comportamiento térmico compuestos óptimos mediante C-Therm TCi

ANEXO

5

ANÁLISIS ESTADÍSTICO CAPÍTULO 7

ANEXO 5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO CAPÍTULO 7

Para el análisis estadístico se ha realizado un diseño factorial $3^2 \times 2^1$ donde las variables de respuesta que se han analizado son: densidad, dureza superficial, resistencia a flexión, resistencia a compresión, adherencia superficial, absorción de agua por capilaridad y coeficiente de conductividad térmico. Y los factores que han intervenido en el estudio son: porcentaje del residuo (en tres niveles: 2, 3 y 4%), mezcla de granulometrías (en tres niveles: 100, 75 y 50%) y tamaño del residuo (en dos niveles: grueso y medio). Los cálculos se han llevado a cabo con el software *Statgraphics Centurion* y la muestra se puede ver en la siguiente tabla:

FACTORES			VARIABLES DEPENDIENTES						
%	Mezcla	Granulometría	Densidad	Dureza superficial	Resist. flexión	Resistencia compresión	Adherencia superficial	Absorción de agua	Conduc. térmica
2	100	m	0,85	62,17	2,16	3,26	0,68	32,00	0,094
3	100	m	0,84	56,10	2,07	2,78	0,50	30,29	0,090
4	100	m	0,73	45,00	1,68	2,46	0,41	25,20	0,088
2	75	m	0,86	52,93	2,33	4,01	0,58	34,00	0,096
3	75	m	0,80	50,80	2,10	2,99	0,48	32,10	0,096
4	75	m	0,69	28,80	1,45	1,65	0,40	30,25	0,090
2	50	m	0,87	57,53	2,51	3,85	0,60	38,52	0,098
3	50	m	0,82	55,00	2,38	3,16	0,48	33,50	0,094
4	50	m	0,74	32,37	1,58	1,71	0,40	31,20	0,091
2	100	g	0,84	57,33	2,21	3,06	0,60	31,87	0,092
3	100	g	0,82	50,10	1,99	2,76	0,45	29,33	0,089
4	100	g	0,73	44,03	1,54	1,84	0,35	23,60	0,089
2	75	g	0,84	57,20	2,37	3,68	0,55	34,15	0,095
3	75	g	0,79	53,07	2,06	2,77	0,40	33,20	0,090
4	75	g	0,69	33,93	1,33	1,47	0,32	29,50	0,088
2	50	g	0,91	57,67	2,80	3,96	0,57	37,50	0,095
3	50	g	0,84	47,20	2,01	2,68	0,41	32,20	0,091
4	50	g	0,74	32,37	1,58	1,71	0,34	28,45	0,090

Tabla 0-17 Muestra de datos análisis estadístico

Un modelo estadístico es una expresión simbólica en forma de igualdad o ecuación que se emplea en todos los diseños experimentales y en la regresión para indicar la relación entre los diferentes factores y la variable de respuesta (Peña Sánchez de Rivera, 1986). En el contexto del diseño experimental en el que se mueve este trabajo el modelo que explica la relación entre cada una de las variables de respuesta y los niveles de los factores viene dado en la expresión [23].

$$y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_k + (\alpha\beta)_{ij} + (\alpha\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\alpha\beta\gamma)_{ijk} + \text{error aleatorio} \quad [23]$$

Siendo,

y_{ijk} , el valor observado en la experimentación para una variable dependiente cuando el primer factor se encuentra en un nivel "i", el segundo factor en un nivel "j" y el tercer nivel en un nivel "k".

μ , la media general de la variable dependiente

α_i , el efecto producido por el porcentaje de agregado ligero para cada uno de sus “i” valores (2, 3 y 4)

β_j , el efecto producido por la mezcla de granulometrías del agregado ligero para cada uno de sus “j” valores (100, 75 y 50%)

γ_k , el efecto producido por la granulometría del agregado ligero para cada uno de sus “k” valores (grueso y medio)

$(\alpha\beta)_{ij}$, el efecto de la interacción del porcentaje de agregado ligero con la mezcla de granulometrías para cada una de las combinaciones de los “i” valores del porcentaje de agregado ligero con los “j” valores de la mezcla de granulometrías

$(\alpha\gamma)_{ik}$, el efecto de la interacción del porcentaje de agregado ligero con la granulometría para cada una de las combinaciones de los “i” valores del porcentaje de agregado ligero con los “k” valores de la granulometría

$(\beta\gamma)_{jk}$, el efecto de la interacción de la mezcla de granulometrías del agregado ligero con la granulometría para cada una de las combinaciones de los “j” valores de la mezcla de granulometrías con los “k” valores de la granulometría

$(\alpha\beta\gamma)_{ijk}$, el efecto de la interacción del porcentaje de agregado ligero con la mezcla de granulometrías y la granulometría para cada una de las combinaciones de los “i” valores del porcentaje de agregado ligero con los “j” valores de la mezcla de granulometrías y los “k” valores de la granulometría.

error aleatorio, que es la diferencia entre el valor observado para el factor y el valor previsto y que se supone que tiene un comportamiento N (0, σ^2).

Sin embargo, al hacer el análisis se ha considerado que la interacción $(\alpha\beta\gamma)_{ijk}$ es nula, por lo que el modelo real que analizamos viene dado en la expresión [24].

$$y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_k + (\alpha\beta)_{ij} + (\alpha\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + \text{error aleatorio} \quad [24]$$

Análisis de la varianza para cada una de las variables con los tres factores y sus interacciones

Del análisis de la varianza de la variable dependiente densidad con los tres factores (tabla 0-18) y en el rango de experimentación, se entiende que:

- Existe evidencia de que el porcentaje de residuo incorporado al compuesto afecta de forma estadísticamente significativa a la densidad, ya que su P-valor (0,0001) es menor que 0,05, con una confianza del 95%. Además esta significatividad se da para cada uno de los porcentajes, como puede verse en el gráfico de medias (véase figura 0-49).
- Existe evidencia de que mezcla de granulometrías afecta de forma estadísticamente significativa a la densidad, ya que su P-valor (0,0095) es menor que 0,05, con una confianza del 95%. Además, de nuevo esta significatividad se da para cada una de las mezclas de porcentajes analizadas, como puede verse en el gráfico de medias (véase figura 0-50).

- No existe evidencia de que el tamaño del residuo incorporado al compuesto afecte de forma estadísticamente significativa a la densidad, ya que su P-valor (1,0000) es mayor que 0,05, con una confianza del 95%. Lo que se confirma al observar el gráfico de medias (véase figura 0-51).

Adicionalmente, del análisis de las interacciones de nivel 2 entre los tres factores para la variable dependiente densidad y en el rango de experimentación, se entiende que:

- No existe evidencia de que exista ninguna dependencia entre los factores, ya que el P-valor de las interacciones es mucho mayor que 0,05 en todos los casos. Aunque al observar el gráfico de interacciones de los factores porcentaje y mezcla de granulometrías (véase figura 0-52) parece que la mezcla al 100% podría ser dependiente. En el caso de los factores porcentaje y granulometría no existe duda (véase figura 0-53), pero en el de los factores mezcla de granulometrías y granulometría no queda tan clara tampoco esta no dependencia (véase figura 0-54).

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFECTOS PRINCIPALES					
A:Porcentaje	0,0632333	2	0,0316167	223,18	0,0001
B:Mezcla	0,00523333	2	0,00261667	18,47	0,0095
C:Granulometria	0	1	0	0,00	1,0000
INTERACCIONES					
AB	0,00163333	4	0,000408333	2,88	0,1649
AC	0,0000333333	2	0,0000166667	0,12	0,8920
BC	0,0009	2	0,00045	3,18	0,1493
RESIDUOS ESTADÍST.	0,000566667	4	0,000141667		
TOTAL (CORREGIDO)	0,0716	17			

Tabla 0-18 Análisis de la varianza - anova multifactorial de la variable dependiente densidad

Figura 0-49 Gráfico de medias para la variable dependiente densidad y el factor porcentaje

Figura 0-50 Gráfico de medias para la variable densidad y el factor mezcla de granulometrías

Figura 0-51 Gráfico de medias para la variable densidad y el factor granulometría

Figura 0-52 Gráfico de interacciones para la variable dependiente densidad y los factores porcentaje y mezcla de granulometrías

Figura 0-53 Gráfico de interacciones para la variable dependiente densidad y los factores porcentaje y granulometría

Figura 0-54 Gráfico de interacciones para la variable dependiente densidad y los factores mezcla de granulometrías y granulometría

Del análisis de la varianza de la variable dependiente dureza superficial con los tres factores (véase tabla 0-19) y en el rango de experimentación, se entiende que:

- Existe evidencia de que el porcentaje de residuo incorporado al compuesto afecta de forma estadísticamente significativa a la dureza superficial, ya que su P-valor (0,0000) es menor que 0,05, con una confianza del 95%. Al observar el gráfico de medias (véase figura 0-55), parece que existe evidencia de que con cada uno de los porcentajes se obtienen durezas superficiales diferentes, siendo menor la dureza superficial cuanto mayor es el porcentaje de residuo incorporado.
- Existe evidencia de que la mezcla de granulometrías incorporada al compuesto afecta de forma estadísticamente significativa a la dureza superficial, ya que su P-valor (0,0029) es menor que 0,05, con una confianza del 95%. Al observar el gráfico de medias (véase figura 0-56), parece que existe evidencia de que con la mezcla al 100% se consiguen resultados de dureza superficial diferentes a las otras dos mezclas.
- No existe evidencia de que el tamaño del residuo incorporado al compuesto afecte de forma estadísticamente significativa a la dureza superficial, ya que su P-valor (0,9862) es mayor que 0,05, con una confianza del 95%. Lo que se confirma al observar el gráfico de medias (véase figura 0-57).

Adicionalmente, del análisis de las interacciones de nivel 2 entre los tres factores para la variable dependiente dureza superficial y en el rango de experimentación, se entiende que:

- Existe evidencia de que el cambio de porcentaje de residuo en la dureza superficial depende de la mezcla de distintas granulometrías, ya que su P-valor (0,0160) es menor que 0,05, con una confianza del 95%. Al observar el gráfico de interacciones (véase figura 0-58), se confirma esta dependencia.
- No existe evidencia de que el cambio de porcentaje de residuo en la dureza superficial dependa del tamaño del residuo, ya que su P-valor (0,0732) es mayor que 0,05, con una confianza del 95%. Lo que se confirma al observar el gráfico de interacciones (véase figura 0-59).
- Existe evidencia de que el cambio de que la mezcla de granulometrías en la dureza superficial depende de la granulometría, ya que su P-valor (0,0178) es menor que 0,05, con

una confianza del 95%. Al observar el gráfico de interacciones (véase figura 0-60), se confirma esta dependencia.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:Porcentaje	1483,37	2	741,684	368,58	0,0000
B:Mezcla	140,854	2	70,4271	35,00	0,0029
C:Granulometria	3,38	1	3,38	1,68	0,2647
INTERACCIONES					
AB	99,4697	4	24,8674	12,36	0,0160
AC	21,6919	2	10,8459	5,39	0,0732
BC	52,3434	2	26,1717	13,01	0,0178
RESIDUOS ESTADÍST.	8,04907	4	2,01227		
TOTAL (CORREGIDO)	1809,16	17			

Tabla 0-19 Análisis de la varianza - anova multifactorial de la variable dependiente dureza superficial

Figura 0-55 Gráfico de medias para la variable dependiente dureza superficial y el factor porcentaje de agregado

Figura 0-56 Gráfico de medias para la variable dependiente dureza superficial y el factor mezcla de granulometrías

Figura 0-57 Gráfico de medias para la variable dependiente dureza superficial y el factor granulometría

Figura 0-58 Gráfico de interacciones para la variable dependiente dureza superficial y los factores porcentaje de agregado y mezcla de granulometrías

Figura 0-59 Gráfico de interacciones para la variable dependiente dureza superficial y los factores porcentaje de agregado y granulometría

Figura 0-60 Gráfico de interacciones para la variable dependiente dureza superficial y los factores mezcla de granulometrías y granulometría

Del análisis de la varianza de la variable dependiente resistencia a flexión con los tres factores (véase tabla 0-20) y en el rango de experimentación, se entiende que:

- Existe evidencia de que el porcentaje de residuo incorporado al compuesto afecta de forma estadísticamente significativa a la resistencia a flexión, ya que su P-valor (0,0006) es menor que 0,05, con una confianza del 95%. Al observar el gráfico de medias (véase figura 0-61), parece que existe evidencia de que con cada uno de los porcentajes se obtienen resistencias

a flexión diferentes, siendo menor la resistencia a flexión cuanto mayor es el porcentaje de residuo incorporado.

- No existe evidencia de que la mezcla de granulometrías incorporada al compuesto afecte de forma estadísticamente significativa a la resistencia a flexión, ya que su P-valor (0,0674) es mayor que 0,05, con una confianza del 95%. Aunque al observar el gráfico de medias (véase figura 0-62) se puede observar que los compuestos con una mezcla del 50% parecen no ser iguales a los compuestos con las otras mezclas.
- No existe evidencia de que el tamaño del residuo incorporado al compuesto afecte de forma estadísticamente significativa a la resistencia a flexión, ya que su P-valor (0,5074) es mayor que 0,05, con una confianza del 95%. Lo que se confirma al observar el gráfico de medias (véase figura 0-63).

Adicionalmente, del análisis de las interacciones de nivel 2 entre los tres factores para la variable dependiente resistencia a flexión y en el rango de experimentación, se entiende que:

- No existe evidencia de que exista ninguna dependencia entre los factores, ya que el P-valor de las interacciones es mucho mayor que 0,05 en todos los casos.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:Porcentaje	2,3491	2	1,17455	81,68	0,0006
B:Mezcla	0,164033	2	0,0820167	5,70	0,0674
C:Granulometria	0,00760556	1	0,00760556	0,53	0,5074
INTERACCIONES					
AB	0,148967	4	0,0372417	2,59	0,1896
AC	0,0677444	2	0,0338722	2,36	0,2109
BC	0,000677778	2	0,000338889	0,02	0,9768
RESIDUOS ESTADÍST.	0,0575222	4	0,0143806		
TOTAL (CORREGIDO)	2,79565	17			

Tabla 0-20 Análisis de la varianza – anova multifactorial de la variable dependiente resistencia a flexión

Figura 0-61 Gráfico de medias para la variable dependiente resistencia a flexión y el factor porcentaje de agregado

Figura 0-62 Gráfico de medias para la variable dependiente resistencia a flexión y el factor mezcla de granulometrías

Figura 0-63 Gráfico de medias para la variable dependiente resistencia a flexión y el factor mezcla de granulometrías

Figura 0-64 Gráfico de interacciones para la variable dependiente resistencia a flexión y los factores porcentaje de agregado y mezcla de granulometrías

Figura 0-65 Gráfico de interacciones para la variable dependiente resistencia a flexión y los factores porcentaje de agregado y granulometría

Figura 0-66 Gráfico de interacciones para la variable dependiente resistencia a flexión y los factores mezcla de granulometrías y granulometría

Del análisis de la varianza de la variable dependiente resistencia a compresión con los tres factores (véase tabla 0-21) y en el rango de experimentación, se entiende que:

- Existe evidencia de que el porcentaje de residuo incorporado al compuesto afecta de forma estadísticamente significativa a la resistencia a compresión, ya que su P-valor (0,0003) es menor que 0,05, con una confianza del 95%. Al observar el gráfico de medias (véase figura 0-67), parece que existe evidencia de que con cada uno de los porcentajes se obtienen resistencias a compresión diferentes, siendo menor la resistencia a flexión cuanto mayor es el porcentaje de residuo incorporado.
- No existe evidencia de que la mezcla de granulometrías incorporada al compuesto afecte de forma estadísticamente significativa a la resistencia a compresión, ya que su P-valor (0,5309) es mayor que 0,05, con una confianza del 95%. Lo que se confirma al observar el gráfico de medias (véase figura 0-68).
- No existe evidencia de que el tamaño del residuo incorporado al compuesto afecte de forma estadísticamente significativa a la resistencia a compresión, ya que su P-valor (0,1012) es mayor que 0,05, con una confianza del 95%. Lo que se confirma al observar el gráfico de medias (véase figura 0-69).

Adicionalmente, del análisis de las interacciones de nivel 2 entre los tres factores para la variable dependiente resistencia a compresión y en el rango de experimentación, se entiende que:

- No existe evidencia de que exista ninguna dependencia entre los factores, ya que el P-valor de las interacciones es mucho mayor que 0,05 en todos los casos.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:Porcentaje	10,1196	2	5,0598	108,88	0,0003
B:Mezcla	0,0692333	2	0,0346167	0,74	0,5309
C:Granulometria	0,209089	1	0,209089	4,50	0,1012
INTERACCIONES					
AB	1,01627	4	0,254067	5,47	0,0643
AC	0,0133778	2	0,00668889	0,14	0,8702
BC	0,0201444	2	0,0100722	0,22	0,8140
RESIDUOS ESTADÍST.	0,185889	4	0,0464722		
TOTAL (CORREGIDO)	11,6336	17			

Tabla 0-21 Análisis de la varianza – anova multifactorial de la variable dependiente resistencia a compresión

Figura 0-67 Gráfico de medias para la variable dependiente resistencia a compresión y el factor porcentaje de agregado

Figura 0-68 Gráfico de medias para la variable dependiente resistencia a compresión y el factor mezcla de granulometrías

Figura 0-69 Gráfico de medias para la variable dependiente resistencia a compresión y el factor granulometría

Figura 0-70 Gráfico de interacciones para la variable dependiente resistencia a compresión y los factores porcentaje de agregado y mezcla de granulometrías

Figura 0-71 Gráfico de interacciones para la variable dependiente resistencia a compresión y los factores porcentaje de agregado y granulometría

Figura 0-72 Gráfico de interacciones para la variable dependiente resistencia a compresión y los factores mezcla de granulometrías y granulometría

Del análisis de la varianza de la variable dependiente adherencia superficial con los tres factores (véase tabla 0-22) y en el rango de experimentación, se entiende que:

- Existe evidencia de que el porcentaje de residuo incorporado al compuesto afecta de forma estadísticamente significativa a la adherencia superficial, ya que su P-valor (0,0000) es menor de 0,05, con una confianza del 95%. Lo que se confirma al observar el gráfico de medias (véase figura 0-73).
- Existe evidencia de que la mezcla de granulometrías incorporada al compuesto afecta de forma estadísticamente significativa a la adherencia superficial, ya que su P-valor (0,0238) es menor de 0,05, con una confianza del 95%. Lo que se confirma al observar el gráfico de medias (véase figura 0-74).
- Existe evidencia de que el tamaño del residuo incorporado al compuesto afecta de forma estadísticamente significativa a la adherencia superficial, ya que su P-valor (0,0015) es menor de 0,05, con una confianza del 95%. Lo que se confirma al observar el gráfico de medias (véase figura 0-75).

Adicionalmente, del análisis de las interacciones de nivel 2 entre los tres factores para la variable dependiente adherencia superficial y en el rango de experimentación, se entiende que:

- No existe evidencia de que exista ninguna dependencia entre los factores, ya que el P-valor de las interacciones es mucho mayor que 0,05 en todos los casos. Lo que se confirma al ver los gráficos de interacciones.

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:Porcentaje	0,157733	2	0,0788667	286,79	0,0000
B:Mezcla	0,00603333	2	0,00301667	10,97	0,0238
C:Granulometria	0,0162	1	0,0162	58,91	0,0015
INTERACCIONES					
AB	0,00183333	4	0,000458333	1,67	0,3164
AC	0,0004	2	0,0002	0,73	0,5378
BC	0,0001	2	0,00005	0,18	0,8403
RESIDUOS ESTADÍST.	0,0011	4	0,000275		
TOTAL (CORREGIDO)	0,1834	17			

Tabla 0-22 Análisis de la varianza – anova multifactorial de la variable dependiente adherencia superficial

Figura 0-73 Gráfico de medias para la variable dependiente adherencia superficial y el factor porcentaje de agregado

Figura 0-74 Gráfico de medias para la variable dependiente adherencia superficial y el factor mezcla de granulometrías

Figura 0-75 Gráfico de medias para la variable dependiente adherencia superficial y el factor granulometría

Figura 0-76 Gráfico de interacciones para la variable dependiente adherencia superficial y los factores porcentaje de agregado y mezcla de granulometrías

Figura 0-77 Gráfico de interacciones para la variable dependiente adherencia superficial y los factores porcentaje de agregado y granulometría

Figura 0-78 Gráfico de interacciones para la variable dependiente adherencia superficial y los factores mezcla de granulometrías y granulometría

Del análisis de la varianza de la variable dependiente absorción de agua por capilaridad con los tres factores (véase tabla 0-23) y en el rango de experimentación, se entiende que:

- Existe evidencia de que el porcentaje de residuo incorporado al compuesto afecta de forma estadísticamente significativa a la absorción de agua, ya que su P-valor (0,0000) es menor de 0,05, con una confianza del 95%. Al observar el gráfico de medias (véase figura 0-79), parece que existe evidencia de que con cada uno de los porcentajes se obtienen valores de absorción de agua diferentes, siendo menor la absorción de agua cuanto mayor es el porcentaje de residuo incorporado.
- Existe evidencia de que la mezcla de granulometrías incorporada al compuesto afecta de forma estadísticamente significativa a la absorción de agua, ya que su P-valor (0,0000) es

menor de 0,05, con una confianza del 95%. Lo que se confirma al observar el gráfico de medias (véase figura 0-80).

- Existe evidencia de que el tamaño del residuo incorporado al compuesto afecta de forma estadísticamente significativa a la absorción de agua, ya que su P-valor (0,0074) es menor de 0,05, con una confianza del 95%. Lo que se confirma al observar el gráfico de medias (véase figura 0-81).

Adicionalmente, del análisis de las interacciones de nivel 2 entre los tres factores para la variable dependiente absorción de agua y en el rango de experimentación, se entiende que:

- Existe evidencia de que el cambio de porcentaje de residuo en la absorción de agua depende de la mezcla de distintas granulometrías, ya que su P-valor (0,0029) es menor que 0,05, con una confianza del 95%. Al observar el gráfico de interacciones (véase figura 0-82), se confirma esta dependencia.
- Existe evidencia de que el cambio de porcentaje de residuo en la absorción de agua depende de la granulometría, ya que su P-valor (0,0420) es menor que 0,05, con una confianza del 95%. Al observar el gráfico de interacciones (véase figura 0-83), se confirma esta dependencia.
- Existe evidencia de que las mezcla de distintas granulometrías en la absorción de agua depende de la granulometría, ya que su P-valor (0,0228) es menor que 0,05, con una confianza del 95%. Al observar el gráfico de interacciones (véase figura 0-84), se confirma esta dependencia.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:Porcentaje	132,963	2	66,4816	573,57	0,0000
B:Mezcla	74,9791	2	37,4895	323,44	0,0000
C:Granulometria	2,9282	1	2,9282	25,26	0,0074
INTERACCIONES					
AB	14,1712	4	3,5428	30,57	0,0029
AC	1,79773	2	0,898867	7,75	0,0420
BC	2,60363	2	1,30182	11,23	0,0228
RESIDUOS ESTADÍS.	0,463633	4	0,115908		
TOTAL (CORREGIDO)	229,907	17			

Tabla 0-23 Análisis de la varianza – anova multifactorial de la variable dependiente absorción de agua

Figura 0-79 Gráfico de medias para la variable dependiente absorción de agua y el factor porcentaje de agregado

Figura 0-80 Gráfico de medias para la variable dependiente absorción de agua y el factor mezcla de granulometrías

Figura 0-81 Gráfico de medias para la variable dependiente absorción de agua y el factor granulometría

Figura 0-82 Gráfico de interacciones para la variable dependiente absorción de agua y los factores porcentaje de agregado y mezcla de granulometrías

Figura 0-83 Gráfico de interacciones para la variable dependiente absorción de agua y los factores porcentaje de agregado y granulometría

Figura 0-84 Gráfico de interacciones para la variable dependiente absorción de agua y los factores mezcla de granulometrías y granulometría

Del análisis de la varianza de la variable dependiente conductividad térmica con los tres factores (véase tabla 0-24) y en el rango de experimentación, se entiende que:

- Existe evidencia de que el porcentaje de residuo incorporado al compuesto afecta de forma estadísticamente significativa a la conductividad térmica, ya que su P-valor (0,0027) es menor de 0,05, con una confianza del 95%. Lo que se confirma al observar el gráfico de medias (véase figura 0-85).
- Existe evidencia de que la mezcla de granulometrías incorporada al compuesto afecta de forma estadísticamente significativa a la conductividad térmica, ya que su P-valor (0,0284) es menor de 0,05, con una confianza del 95%. Lo que se confirma al observar el gráfico de medias (véase figura 0-86).
- Existe evidencia de que el tamaño del residuo incorporado al compuesto afecta de forma estadísticamente significativa a la absorción de agua, ya que su P-valor (0,0213) es menor de 0,05, con una confianza del 95%. Lo que se confirma al observar el gráfico de medias (véase figura 0-87).

Adicionalmente, del análisis de las interacciones de nivel 2 entre los tres factores para la variable dependiente conductividad térmica y en el rango de experimentación, se entiende que:

- No existe evidencia de que exista ninguna dependencia entre los factores, ya que el P-valor de las interacciones es mucho mayor que 0,05 en todos los casos. Lo que se confirma al ver los gráficos de interacciones.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFECTOS PRINCIPALES					
A:Porcentaje	0,0000973333	2	0,0000486667	36,50	0,0027
B:Mezcla	0,0000263333	2	0,0000131667	9,87	0,0284
C:Granulometria	0,000018	1	0,000018	13,50	0,0213
INTERACCIONES					
AB	0,00000533333	4	0,00000133333	1,00	0,5000
AC	0,00000533333	2	0,00000266666	2,00	0,2500
BC	0,00000433333	2	0,00000216666	1,62	0,3044
RESIDUOS ESTADÍST.	0,00000533333	4	0,00000133333		
TOTAL (CORREGIDO)	0,000162	17			

Tabla 0-24 Análisis de la varianza – anova multifactorial de la variable dependiente conductividad térmica

Figura 0-85 Gráfico de medias para la variable dependiente conductividad térmica y el factor porcentaje de agregado

Figura 0-86 Gráfico de medias para la variable dependiente conductividad térmica y el factor mezcla de granulometrías

Figura 0-87 Gráfico de medias para la variable dependiente conductividad térmica y el factor granulometría

Figura 0-88 Gráfico de interacciones para la variable dependiente conductividad térmica y los factores porcentaje de agregado y mezcla de granulometrías

Figura 0-89 Gráfico de interacciones para la variable dependiente conductividad térmica y los factores porcentaje de agregado y granulometría

Figura 0-90 Gráfico de interacciones para la variable dependiente conductividad térmica y los factores mezcla de granulometrías y granulometría

Diagnosis

Para que el estudio estadístico del análisis de la varianza sea válido y las conclusiones sean científicamente creíbles, el error tiene que ser una normal $N(0, \sigma^2)$. Esta comprobación se realiza comprobando la homocedasticidad y la normalidad a través de los residuos estadísticos de cada variable.

Como se puede ver en los siguientes gráficos, del análisis de los residuos estadísticos de la variable densidad frente a cada uno de los factores: porcentaje de residuo (véase figura 0-91), mezcla de granulometrías (véase figura 0-92) y granulometría (véase figura 0-93), se observa que en todos los casos se cumple la homocedasticidad.

Figura 0-91 Gráfico de residuos estadísticos para la variable dependiente densidad frente al factor porcentaje de agregado

Figura 0-92 Gráfico de residuos estadísticos para la variable dependiente densidad frente al factor mezcla de granulometrías

Figura 0-93 Gráfico de residuos estadísticos para la variable dependiente densidad frente al factor granulometría

Del análisis del gráfico de probabilidad normal para los residuos estadísticos de la variable densidad (véase figura 0-94) y del test de normalidad (véase tabla 0-25), se observa que también se cumple la normalidad con una confianza del 95%, ya que los residuos estadísticos se asemejan a una recta y los P-valores del test de normalidad son mayores que 0,05.

Figura 0-94 Gráfico de probabilidad normal para los residuos estadísticos de la variable dependiente densidad

Prueba	Estadístico	Valor-P
Chi-Cuadrado	7,33333	0,602458
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,975123	0,866276
Valor-Z para asimetría	0,0	1,0

Tabla 0-25 Test de normalidad para los residuos estadísticos de la variable dependiente densidad

Como se puede ver en los siguientes gráficos, del análisis de los residuos estadísticos de la variable dureza superficial frente a cada uno de los factores: porcentaje de residuo (véase figura 0-95), mezcla de granulometrías (véase figura 0-96) y granulometría (véase figura 0-97), se observa que en todos los casos se cumple la homocedasticidad.

Figura 0-95 Gráfico de residuos estadísticos para la variable dependiente dureza superficial frente al factor porcentaje de agregado

Figura 0-96 Gráfico de residuos estadísticos para la variable dependiente dureza superficial frente al factor mezcla de granulometrías

Figura 0-97 Gráfico de residuos estadísticos para la variable dependiente dureza superficial frente al factor granulometría

Del análisis del gráfico de probabilidad normal para los residuos estadísticos de la variable dureza superficial (véase figura 0-98) y del test de normalidad (véase tabla 0-26), se observa que también se cumple la normalidad con una confianza del 95%, ya que los residuos estadísticos se asemejan a una recta y los P-valores del test de normalidad son mayores que 0,05.

Figura 0-98 Gráfico de probabilidad normal para los residuos estadísticos de la variable dependiente dureza superficial

Prueba	Estadístico	Valor-P
Chi-Cuadrado	4,66667	0,862344
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,968449	0,751368
Valor-Z para asimetría	0,0	1,0

Tabla 0-26 Test de normalidad para los residuos estadísticos de la variable dependiente dureza superficial

Como se puede ver en los siguientes gráficos, del análisis de los residuos estadísticos de la variable resistencia a flexión frente a cada uno de los factores: porcentaje de residuo (véase figura 0-99), mezcla de granulometrías (véase figura 0-100) y granulometría (véase figura 0-101), se observa que en todos los casos se cumple la homocedasticidad.

Figura 0-99 Gráfico de residuos estadísticos para la variable dependiente resistencia a flexión frente al factor porcentaje de agregado

Figura 0-100 Gráfico de residuos estadísticos para la variable dependiente resistencia a flexión frente al factor mezcla de granulometrías

Figura 0-101 Gráfico de residuos estadísticos para la variable dependiente resistencia a flexión frente al factor granulometría

Del análisis del gráfico de probabilidad normal para los residuos estadísticos de la variable resistencia a flexión (véase figura 0-102) y del test de normalidad (véase tabla 0-27), se observa que también se cumple la normalidad con una confianza del 95%, ya que los residuos estadísticos se asemejan a una recta y los P-valores del test de normalidad son mayores que 0,05.

Figura 0-102 Gráfico de probabilidad normal para los residuos estadísticos de la variable dependiente resistencia a flexión

Prueba	Estadístico	Valor-P
Chi-Cuadrado	4,66667	0,862344
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,960725	0,967075
Valor-Z para asimetría	0,0	1,0

Tabla 0-27 Test de normalidad para los residuos estadísticos de la variable dependiente resistencia a flexión

Como se puede ver en los siguientes gráficos, del análisis de los residuos estadísticos de la variable resistencia a compresión frente a cada uno de los factores: porcentaje de residuo (véase figura 0-103), mezcla de granulometrías (véase figura 0-104) y granulometría (véase figura 0-105), se observa que en todos los casos se cumple la homocedasticidad.

Figura 0-103 Gráfico de residuos estadísticos para la variable dependiente resistencia a compresión frente al factor porcentaje de agregado

Figura 0-104 Gráfico de residuos estadísticos para la variable dependiente resistencia a compresión frente al factor mezcla de granulometrías

Figura 0-105 Gráfico de residuos estadísticos para la variable dependiente resistencia a compresión frente al factor granulometría

Del análisis del gráfico de probabilidad normal para los residuos estadísticos de la variable resistencia a compresión (véase figura 0-106) y del test de normalidad (véase tabla 0-28), se observa que también se cumple la normalidad con una confianza del 95%, ya que los residuos estadísticos se asemejan a una recta y los P-valores del test de normalidad son mayores que 0,05.

Figura 0-106 Gráfico de probabilidad normal para los residuos estadísticos de la variable dependiente resistencia a compresión

Prueba	Estadístico	Valor-P
Chi-Cuadrado	7,33333	0,862344
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,970681	0,475774
Valor-Z para asimetría	0,0	1,0

Tabla 0-28 Test de normalidad para los residuos estadísticos de la variable dependiente resistencia a compresión

Como se puede ver en los siguientes gráficos, del análisis de los residuos estadísticos de la variable adherencia superficial frente a cada uno de los factores: porcentaje de residuo (véase figura 0-107), mezcla de granulometrías (véase figura 0-108) y granulometría (véase figura 0-109), se observa que en todos los casos se cumple la homocedasticidad.

Figura 0-107 Gráfico de residuos estadísticos para la variable dependiente adherencia superficial frente al factor porcentaje de agregado

Figura 0-108 Gráfico de residuos estadísticos para la variable dependiente adherencia superficial frente al factor mezcla de granulometrías

Figura 0-109 Gráfico de residuos estadísticos para la variable dependiente adherencia superficial frente al factor granulometría

Del análisis del gráfico de probabilidad normal para los residuos estadísticos de la variable adherencia superficial (véase figura 0-110) y del test de normalidad (véase tabla 0-29) se observa que también se cumple la normalidad con una confianza del 95%, ya que los residuos estadísticos se asemejan a una recta y los P-valores del test de normalidad son mayores que 0,05.

Figura 0-110 Gráfico de probabilidad normal para los residuos estadísticos de la variable dependiente adherencia superficial

Prueba	Estadístico	Valor-P
Chi-Cuadrado	24,6667	0,062912
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,955246	0,510229
Valor-Z para asimetría	0,0	1,0

Tabla 0-29 Test de normalidad para los residuos estadísticos de la variable dependiente adherencia superficial

Como se puede ver en los siguientes gráficos, del análisis de los residuos estadísticos de la variable absorción de agua por capilaridad frente a cada uno de los factores: porcentaje de residuo (véase figura 0-111), mezcla de granulometrías (véase figura 0-112) y granulometría (véase figura 0-113), se observa que en todos los casos se cumple la homocedasticidad.

Figura 0-111 Gráfico de residuos estadísticos para la variable dependiente absorción de agua frente al factor porcentaje de agregado

Figura 0-112 Gráfico de residuos estadísticos para la variable dependiente absorción de agua frente al factor mezcla de granulometrías

Figura 0-113 Gráfico de residuos estadísticos para la variable dependiente absorción de agua frente al factor granulometría

Del análisis del gráfico de probabilidad normal para los residuos estadísticos de la variable absorción de agua (véase figura 0-114) y del test de normalidad (véase tabla 0-30) se observa que también se cumple la normalidad con una confianza del 95%, ya que los residuos estadísticos se asemejan a una recta y los P-valores del test de normalidad son mayores que 0,05.

Figura 0-114 Gráfico de probabilidad normal para los residuos estadísticos de la variable dependiente absorción de agua

Prueba	Estadístico	Valor-P
Chi-Cuadrado	12,6667	0,178278
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,947297	0,386503
Valor-Z para asimetría	0,0	1,0

Tabla 0-30 Test de normalidad para los residuos estadísticos de la variable dependiente absorción de agua

Como se puede ver en los siguientes gráficos, del análisis de los residuos estadísticos de la variable conductividad térmica frente a cada uno de los factores: porcentaje de residuo (véase figura 0-115), mezcla de granulometrías (véase figura 0-116) y granulometría (véase figura 0-117), se observa que en todos los casos se cumple la homocedasticidad.

Figura 0-115 Gráfico de residuos estadísticos para la variable dependiente conductividad térmica frente al factor porcentaje de agregado

Figura 0-116 Gráfico de residuos estadísticos para la variable dependiente conductividad térmica frente al factor mezcla de granulometrías

Figura 0-117 Gráfico de residuos estadísticos para la variable dependiente conductividad térmica frente al factor granulometría

Del análisis del gráfico de probabilidad normal para los residuos estadísticos de la variable conductividad térmica (véase figura 0-118) y del test de normalidad (véase tabla 0-31) se observa que también se cumple la normalidad con una confianza del 95%, ya que los residuos estadísticos se asemejan a una recta y los P-valores del test de normalidad son mayores que 0,05.

Figura 0-118 Gráfico de probabilidad normal para los residuos estadísticos de la variable dependiente conductividad térmica

Prueba	Estadístico	Valor-P
Chi-Cuadrado	3,33333	0,949602
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,98505	0,976935
Valor-Z para asimetría	0,0	1,0

Tabla 0-31 Test de normalidad para los residuos estadísticos de la variable dependiente conductividad térmica

ANEXO

6

RESULTADOS DE LA ENCUESTA

ANEXO 6. RESULTADOS DE LA ENCUESTA

ENCUESTADO 1

Dadas tres aplicaciones del yeso en la construcción y teniendo en cuenta que cada aplicación cumple los requisitos mínimos que exige la normativa. Valore del 0 al 100% la importancia adicional de las cuatro variables que se presentan para cada aplicación en relación con su estabilidad, resistencia y durabilidad, de forma que el total sume 100%.

Revestimiento de yeso sobre soporte rígido

Densidad en estado seco	10	%
Dureza superficial Shore C	70	%
Resistencia mecánica a flexión	5	%
Resistencia mecánica a compresión	15	%
TOTAL	100	%

Tabique de placas de yeso machihembradas de (600x600) mm con un espesor entre 50-150 mm

Densidad en estado seco	30	%
Dureza superficial Shore C	10	%
Resistencia mecánica a flexión	25	%
Resistencia mecánica a compresión	35	%
TOTAL	100	%

Falso techo de paneles de yeso de (600x600) con un espesor medio de 15 mm sobre subestructura metálica

Densidad en estado seco	10	%
Dureza superficial Shore C	30	%
Resistencia mecánica a flexión	40	%
Resistencia mecánica a compresión	20	%
TOTAL	100	%

Comentarios:

ENCUESTADO 2

Dadas tres aplicaciones del yeso en la construcción y teniendo en cuenta que cada aplicación cumple los requisitos mínimos que exige la normativa. Valore del 0 al 100% la importancia adicional de las cuatro variables que se presentan para cada aplicación en relación con su estabilidad, resistencia y durabilidad, de forma que el total sume 100%.

Revestimiento de yeso sobre soporte rígido

Densidad en estado seco	25	%
Dureza superficial Shore C	35	%
Resistencia mecánica a flexión	5	%
Resistencia mecánica a compresión	35	%
TOTAL	100	%

Tabique de placas de yeso machihembradas de (600x600) mm con un espesor entre 50-150 mm

Densidad en estado seco	20	%
Dureza superficial Shore C	20	%
Resistencia mecánica a flexión	25	%
Resistencia mecánica a compresión	35	%
TOTAL	100	%

Falso techo de paneles de yeso de (600x600) con un espesor medio de 15 mm sobre subestructura metálica

Densidad en estado seco	30	%
Dureza superficial Shore C	5	%
Resistencia mecánica a flexión	50	%
Resistencia mecánica a compresión	15	%
TOTAL	100	%

Comentarios:

ENCUESTADO 3

Dadas tres aplicaciones del yeso en la construcción y teniendo en cuenta que cada aplicación cumple los requisitos mínimos que exige la normativa. Valore del 0 al 100% la importancia adicional de las cuatro variables que se presentan para cada aplicación en relación con su estabilidad, resistencia y durabilidad, de forma que el total sume 100%.

Revestimiento de yeso sobre soporte rígido

Densidad en estado seco	30	%
Dureza superficial Shore C	30	%
Resistencia mecánica a flexión	20	%
Resistencia mecánica a compresión	20	%
TOTAL	100	%

Tabique de placas de yeso machihembradas de (600x600) mm con un espesor entre 50-150 mm

Densidad en estado seco	15	%
Dureza superficial Shore C	10	%
Resistencia mecánica a flexión	30	%
Resistencia mecánica a compresión	45	%
TOTAL	100	%

Falso techo de paneles de yeso de (600x600) con un espesor medio de 15 mm sobre subestructura metálica

Densidad en estado seco	15	%
Dureza superficial Shore C	5	%
Resistencia mecánica a flexión	70	%
Resistencia mecánica a compresión	10	%
TOTAL	100	%

Comentarios:

ENCUESTADO 4

Dadas tres aplicaciones del yeso en la construcción y teniendo en cuenta que cada aplicación cumple los requisitos mínimos que exige la normativa. Valore del 0 al 100% la importancia adicional de las cuatro variables que se presentan para cada aplicación en relación con su estabilidad, resistencia y durabilidad, de forma que el total sume 100%.

Revestimiento de yeso sobre soporte rígido

Densidad en estado seco	20	%
Dureza superficial Shore C	30	%
Resistencia mecánica a flexión	30	%
Resistencia mecánica a compresión	20	%
TOTAL	100	%

Tabique de placas de yeso machihembradas de (600x600) mm con un espesor entre 50-150 mm

Densidad en estado seco	35	%
Dureza superficial Shore C	25	%
Resistencia mecánica a flexión	20	%
Resistencia mecánica a compresión	20	%
TOTAL	100	%

Falso techo de paneles de yeso de (600x600) con un espesor medio de 15 mm sobre subestructura metálica

Densidad en estado seco	40	%
Dureza superficial Shore C	20	%
Resistencia mecánica a flexión	20	%
Resistencia mecánica a compresión	20	%
TOTAL	100	%

Comentarios:

ENCUESTADO 5

Dadas tres aplicaciones del yeso en la construcción y teniendo en cuenta que cada aplicación cumple los requisitos mínimos que exige la normativa. Valore del 0 al 100% la importancia adicional de las cuatro variables que se presentan para cada aplicación en relación con su estabilidad, resistencia y durabilidad, de forma que el total sume 100%.

Revestimiento de yeso sobre soporte rígido

Densidad en estado seco	25	%
Dureza superficial Shore C	30	%
Resistencia mecánica a flexión	15	%
Resistencia mecánica a compresión	30	%
TOTAL	100	%

Tabique de placas de yeso machihembradas de (600x600) mm con un espesor entre 50-150 mm

Densidad en estado seco	30	%
Dureza superficial Shore C	20	%
Resistencia mecánica a flexión	25	%
Resistencia mecánica a compresión	25	%
TOTAL	100	%

Falso techo de paneles de yeso de (600x600) con un espesor medio de 15 mm sobre subestructura metálica

Densidad en estado seco	15	%
Dureza superficial Shore C	15	%
Resistencia mecánica a flexión	70	%
Resistencia mecánica a compresión	0	%
TOTAL	100	%

Comentarios:

ENCUESTADO 6

Dadas tres aplicaciones del yeso en la construcción y teniendo en cuenta que cada aplicación cumple los requisitos mínimos que exige la normativa. Valore del 0 al 100% la importancia adicional de las cuatro variables que se presentan para cada aplicación en relación con su estabilidad, resistencia y durabilidad, de forma que el total sume 100%.

Revestimiento de yeso sobre soporte rígido

Densidad en estado seco	50	%
Dureza superficial Shore C	40	%
Resistencia mecánica a flexión	5	%
Resistencia mecánica a compresión	5	%
TOTAL	100	%

Tabique de placas de yeso machihembradas de (600x600) mm con un espesor entre 50-150 mm

Densidad en estado seco	35	%
Dureza superficial Shore C	30	%
Resistencia mecánica a flexión	10	%
Resistencia mecánica a compresión	25	%
TOTAL	100	%

Falso techo de paneles de yeso de (600x600) con un espesor medio de 15 mm sobre subestructura metálica

Densidad en estado seco	35	%
Dureza superficial Shore C	30	%
Resistencia mecánica a flexión	25	%
Resistencia mecánica a compresión	10	%
TOTAL	100	%

Comentarios:

ENCUESTADO 7

Dadas tres aplicaciones del yeso en la construcción y teniendo en cuenta que cada aplicación cumple los requisitos mínimos que exige la normativa. Valore del 0 al 100% la importancia adicional de las cuatro variables que se presentan para cada aplicación en relación con su estabilidad, resistencia y durabilidad, de forma que el total sume 100%.

Revestimiento de yeso sobre soporte rígido

Densidad en estado seco	50	%
Dureza superficial Shore C	50	%
Resistencia mecánica a flexión	0	%
Resistencia mecánica a compresión	0	%
TOTAL	100	%

Tabique de placas de yeso machihembradas de (600x600) mm con un espesor entre 50-150 mm

Densidad en estado seco	25	%
Dureza superficial Shore C	15	%
Resistencia mecánica a flexión	15	%
Resistencia mecánica a compresión	45	%
TOTAL	100	%

Falso techo de paneles de yeso de (600x600) con un espesor medio de 15 mm sobre subestructura metálica

Densidad en estado seco	30	%
Dureza superficial Shore C	15	%
Resistencia mecánica a flexión	40	%
Resistencia mecánica a compresión	15	%
TOTAL	100	%

Comentarios:

ENCUESTADO 8

Dadas tres aplicaciones del yeso en la construcción y teniendo en cuenta que cada aplicación cumple los requisitos mínimos que exige la normativa. Valore del 0 al 100% la importancia adicional de las cuatro variables que se presentan para cada aplicación en relación con su estabilidad, resistencia y durabilidad, de forma que el total sume 100%.

Revestimiento de yeso sobre soporte rígido

Densidad en estado seco	10	%
Dureza superficial Shore C	30	%
Resistencia mecánica a flexión	55	%
Resistencia mecánica a compresión	5	%
TOTAL	100	%

Tabique de placas de yeso machihembradas de (600x600) mm con un espesor entre 50-150 mm

Densidad en estado seco	10	%
Dureza superficial Shore C	35	%
Resistencia mecánica a flexión	50	%
Resistencia mecánica a compresión	5	%
TOTAL	100	%

Falso techo de paneles de yeso de (600x600) con un espesor medio de 15 mm sobre subestructura metálica

Densidad en estado seco	10	%
Dureza superficial Shore C	15	%
Resistencia mecánica a flexión	70	%
Resistencia mecánica a compresión	5	%
TOTAL	100	%

Comentarios:

ENCUESTADO 9

Dadas tres aplicaciones del yeso en la construcción y teniendo en cuenta que cada aplicación cumple los requisitos mínimos que exige la normativa. Valore del 0 al 100% la importancia adicional de las cuatro variables que se presentan para cada aplicación en relación con su estabilidad, resistencia y durabilidad, de forma que el total sume 100%.

Revestimiento de yeso sobre soporte rígido

Densidad en estado seco	20	%
Dureza superficial Shore C	40	%
Resistencia mecánica a flexión	20	%
Resistencia mecánica a compresión	20	%
TOTAL	100	%

Tabique de placas de yeso machihembradas de (600x600) mm con un espesor entre 50-150 mm

Densidad en estado seco	30	%
Dureza superficial Shore C	20	%
Resistencia mecánica a flexión	20	%
Resistencia mecánica a compresión	30	%
TOTAL	100	%

Falso techo de paneles de yeso de (600x600) con un espesor medio de 15 mm sobre subestructura metálica

Densidad en estado seco	20	%
Dureza superficial Shore C	10	%
Resistencia mecánica a flexión	60	%
Resistencia mecánica a compresión	10	%
TOTAL	100	%

Comentarios:

ENCUESTADO 10

Dadas tres aplicaciones del yeso en la construcción y teniendo en cuenta que cada aplicación cumple los requisitos mínimos que exige la normativa. Valore del 0 al 100% la importancia adicional de las cuatro variables que se presentan para cada aplicación en relación con su estabilidad, resistencia y durabilidad, de forma que el total sume 100%.

Revestimiento de yeso sobre soporte rígido

Densidad en estado seco	20	%
Dureza superficial Shore C	25	%
Resistencia mecánica a flexión	40	%
Resistencia mecánica a compresión	15	%
TOTAL	100	%

Tabique de placas de yeso machihembradas de (600x600) mm con un espesor entre 50-150 mm

Densidad en estado seco	35	%
Dureza superficial Shore C	15	%
Resistencia mecánica a flexión	10	%
Resistencia mecánica a compresión	40	%
TOTAL	100	%

Falso techo de paneles de yeso de (600x600) con un espesor medio de 15 mm sobre subestructura metálica

Densidad en estado seco	70	%
Dureza superficial Shore C	5	%
Resistencia mecánica a flexión	20	%
Resistencia mecánica a compresión	5	%
TOTAL	100	%

Comentarios:

ENCUESTADO 11

Dadas tres aplicaciones del yeso en la construcción y teniendo en cuenta que cada aplicación cumple los requisitos mínimos que exige la normativa. Valore del 0 al 100% la importancia adicional de las cuatro variables que se presentan para cada aplicación en relación con su estabilidad, resistencia y durabilidad, de forma que el total sume 100%.

Revestimiento de yeso sobre soporte rígido

Densidad en estado seco	15	%
Dureza superficial Shore C	65	%
Resistencia mecánica a flexión	5	%
Resistencia mecánica a compresión	15	%
TOTAL	100	%

Tabique de placas de yeso machihembradas de (600x600) mm con un espesor entre 50-150 mm

Densidad en estado seco	35	%
Dureza superficial Shore C	25	%
Resistencia mecánica a flexión	25	%
Resistencia mecánica a compresión	15	%
TOTAL	100	%

Falso techo de paneles de yeso de (600x600) con un espesor medio de 15 mm sobre subestructura metálica

Densidad en estado seco	25	%
Dureza superficial Shore C	30	%
Resistencia mecánica a flexión	30	%
Resistencia mecánica a compresión	15	%
TOTAL	100	%

Comentarios:

ENCUESTADO 12

Dadas tres aplicaciones del yeso en la construcción y teniendo en cuenta que cada aplicación cumple los requisitos mínimos que exige la normativa. Valore del 0 al 100% la importancia adicional de las cuatro variables que se presentan para cada aplicación en relación con su estabilidad, resistencia y durabilidad, de forma que el total sume 100%.

Revestimiento de yeso sobre soporte rígido

Densidad en estado seco	60	%
Dureza superficial Shore C	20	%
Resistencia mecánica a flexión	5	%
Resistencia mecánica a compresión	15	%
TOTAL	100	%

Tabique de placas de yeso machihembradas de (600x600) mm con un espesor entre 50-150 mm

Densidad en estado seco	20	%
Dureza superficial Shore C	15	%
Resistencia mecánica a flexión	20	%
Resistencia mecánica a compresión	45	%
TOTAL	100	%

Falso techo de paneles de yeso de (600x600) con un espesor medio de 15 mm sobre subestructura metálica

Densidad en estado seco	10	%
Dureza superficial Shore C	30	%
Resistencia mecánica a flexión	40	%
Resistencia mecánica a compresión	20	%
TOTAL	100	%

Comentarios:

ENCUESTADO 13

Dadas tres aplicaciones del yeso en la construcción y teniendo en cuenta que cada aplicación cumple los requisitos mínimos que exige la normativa. Valore del 0 al 100% la importancia adicional de las cuatro variables que se presentan para cada aplicación en relación con su estabilidad, resistencia y durabilidad, de forma que el total sume 100%.

Revestimiento de yeso sobre soporte rígido

Densidad en estado seco	25	%
Dureza superficial Shore C	40	%
Resistencia mecánica a flexión	20	%
Resistencia mecánica a compresión	15	%
TOTAL	100	%

Tabique de placas de yeso machihembradas de (600x600) mm con un espesor entre 50-150 mm

Densidad en estado seco	20	%
Dureza superficial Shore C	20	%
Resistencia mecánica a flexión	10	%
Resistencia mecánica a compresión	50	%
TOTAL	100	%

Falso techo de paneles de yeso de (600x600) con un espesor medio de 15 mm sobre subestructura metálica

Densidad en estado seco	15	%
Dureza superficial Shore C	20	%
Resistencia mecánica a flexión	25	%
Resistencia mecánica a compresión	40	%
TOTAL	100	%

Comentarios:

ENCUESTADO 14

Dadas tres aplicaciones del yeso en la construcción y teniendo en cuenta que cada aplicación cumple los requisitos mínimos que exige la normativa. Valore del 0 al 100% la importancia adicional de las cuatro variables que se presentan para cada aplicación en relación con su estabilidad, resistencia y durabilidad, de forma que el total sume 100%.

Revestimiento de yeso sobre soporte rígido

Densidad en estado seco	50	%
Dureza superficial Shore C	50	%
Resistencia mecánica a flexión	0	%
Resistencia mecánica a compresión	0	%
TOTAL	100	%

Tabique de placas de yeso machihembradas de (600x600) mm con un espesor entre 50-150 mm

Densidad en estado seco	10	%
Dureza superficial Shore C	30	%
Resistencia mecánica a flexión	25	%
Resistencia mecánica a compresión	35	%
TOTAL	100	%

Falso techo de paneles de yeso de (600x600) con un espesor medio de 15 mm sobre subestructura metálica

Densidad en estado seco	65	%
Dureza superficial Shore C	10	%
Resistencia mecánica a flexión	5	%
Resistencia mecánica a compresión	20	%
TOTAL	100	%

Comentarios: