



**UNIVERSIDAD DE BURGOS**

**TESIS DOCTORAL**

**Análisis de viabilidad  
energética de  
prefabricados de yeso eco-  
eficientes aligerados con  
residuos de poliuretano**

**Alba Rodrigo Bravo**

**Directora: Dra. Sara Gutiérrez González  
Codirectora: Dra. Verónica Calderón Carpintero**

**Burgos, octubre de 2023**



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

**INFORMAN:**

Que la presente memoria titulada **“Análisis de viabilidad energética de prefabricados de yeso eco-eficientes aligerados con residuos de poliuretano”** se ha realizado en el Departamento de Construcciones Arquitectónicas e Ingeniería de la Construcción y del Terreno de la Escuela Politécnica Superior de la Universidad de Burgos, bajo su dirección, por la Graduada en Arquitectura Técnica **Dña. Alba Rodrigo Bravo** y autorizan su presentación para que sea calificada como TESIS DOCTORAL.

Burgos, 19 de julio de 2023

Fdo.: Dña. Sara  
Gutiérrez González

Fdo.: Dña. Verónica  
Calderón Carpintero



A Alberto, mi apoyo incondicional

A mi familia y los amigos que son familia



## Agradecimientos

Son muchas las personas que han participado directa e indirectamente en la realización de la presente investigación, contribuyendo no sólo en mi crecimiento profesional sino también ampliamente en el personal.

Sara, gracias por tu tenacidad, paciencia, motivación y consejos. Gracias por creer en mí. Tu apoyo es inestimable, que suerte tenerte cerca.

Verónica, gracias por tu guía, conocimiento y experiencia. Tu generosidad no tiene límites.

A mis compañeros del Laboratorio de Materiales de Construcción y del Departamento de Construcciones Arquitectónicas e Ingeniería de la Construcción y del Terreno por su preocupación y ánimos, gracias.

Al Profesor D. Vasco Peixoto de Freitas de la Universidad de Oporto (Universidade do Porto), gracias por facilitarme la estancia de investigación y haber podido disfrutar de uno de los mejores veranos de mi vida. Un poquito de mi se quedó por las calles de mi querida "Cidade Invicta".

Por último, me gustaría mostrar mi agradecimiento a la Junta de Castilla y León y al Fondo Social Europeo por el contrato predoctoral concedido (Orden EDU/875/2021), al Consejo General de la Arquitectura de España por la financiación aportada para la consecución de esta tesis doctoral y a las empresas colaboradoras en la investigación.

Gracias porque sin todos vosotros, habría semilla, pero nunca flor.





La creciente consideración y sensibilización por el medioambiente de la sociedad, las empresas y los gobiernos han favorecido el impulso de medidas y estrategias dirigidas a reducir el impacto del ser humano en los espacios naturales y ecosistemas. Las acciones focalizadas en la disminución de la generación de residuos y de las emisiones lideran los acuerdos y políticas alcanzados en materia ambiental.

En el sector de la construcción, todos los esfuerzos se concentran en minimizar el consumo de recursos naturales y de energía por parte del parque inmobiliario. El desarrollo y fabricación de materiales de construcción sostenibles promueve la economía circular al incorporar agregados reciclados en su composición, que además, añaden valor a los productos. Estos materiales presentan propiedades mejoradas en términos de eficiencia energética.

La investigación llevada a cabo en la presente tesis doctoral tiene como objetivo ampliar la oferta de productos específicos de edificación con la aportación al mercado de un nuevo material de construcción sostenible. El estudio comprende desde la fase de investigación elemental, pasando por la etapa de industrialización basada en el conocimiento adquirido, hasta la puesta en mercado del producto innovador.

El producto analizado consiste en un prefabricado de techo a base escayola que incluye residuo de poliuretano reciclado, cuyo fin de vida alternativo es la disposición en vertedero. Su desarrollo conlleva la reducción de los niveles de explotación del recurso mineral del yeso, supone una alternativa para mejorar la economía circular de los residuos de poliuretano y disminuye la cantidad de desechos poliméricos en el medioambiente.

La metodología empleada se basa en la caracterización de las materias primas y de las pastas de yeso con residuo de poliuretano. Una vez determinada la mezcla idónea, se estudia la implementación de la investigación a nivel industrial y se procede con la fabricación en cadena de la placa de yeso con poliuretano reciclado. La fase de puesta en obra posterior permite la evaluación de la aptitud funcional. El desempeño ambiental y rendimiento económico del producto innovador se analiza a

través de las metodologías de Análisis de Ciclo de Vida y Análisis del Coste del Ciclo de Vida, respectivamente.

Los resultados obtenidos demuestran que es viable incorporar residuos de poliuretano como materia prima en las mezclas de yeso. De forma general, supone un descenso de la densidad, de las prestaciones mecánicas, de la conductividad térmica y del principio de fraguado.

Su fabricación a nivel industrial es posible y únicamente conlleva la adaptación del tramo inicial de la línea de producción para la incorporación del poliuretano reciclado en forma de materia prima. El nuevo modelo presenta una disminución sustancial del peso y de la conductividad térmica con respecto a la placa de yeso estándar.

La puesta en obra se realiza de forma satisfactoria en tres edificios piloto, con un total de 900 m<sup>2</sup> de placa de yeso con residuo de poliuretano instalados.

En cuanto al análisis ambiental, el nuevo prefabricado incorpora material reciclado, consume menos de yeso y agua, y reduce las emisiones de CO<sub>2</sub> y la demanda de energía con respecto al modelo tradicional. Fruto de esta evaluación es la obtención de la afirmación ambiental autodeclarada (Etiquetado Ambiental Tipo II). De la evaluación financiera, se concluye que la inclusión de poliuretano reciclado en el producto reduce ligeramente su coste de ciclo de vida.

Por último, la economía circular del producto ecológico queda probada al incluirlo en una nueva mezcla de yeso.

#### Palabras clave:

Placa de escayola de techo, residuo de poliuretano, fabricación industrial, Análisis de Ciclo de Vida (ACV), Análisis del Coste del Ciclo de Vida (CCV), puesta en obra.

## Abstract

The growing consideration and awareness of the environment by society, companies and governments has favoured the promotion of measures and strategies aimed at reducing the impact of human beings on natural spaces and ecosystems. Actions focused on reducing waste generation and emissions are at the forefront of the agreements and policies reached in environmental matters.

In the construction sector, all efforts are focused on minimising the consumption of natural resources and energy by the building stock. The development and manufacture of sustainable building materials promotes the circular economy by incorporating recycled aggregates in their composition, which also add value to the products. These materials have improved properties in terms of energy efficiency.

The research carried out in this doctoral thesis aims to expand the range of specific construction products by bringing a new sustainable building material to the market. The study covers from the basic research phase, through the industrialisation stage based on the knowledge acquired, to the marketing of the innovative product.

The product analysed consists of a plaster precast that includes recycled polyurethane waste, which alternative end of life is landfill disposal. Its development leads to a reduction in the levels of exploitation of the mineral resource of gypsum, it represents an alternative to improve the circular economy of polyurethane waste and it reduces the amount of polymer waste in the environment.

The methodology used is based on the characterisation of raw materials and gypsum pastes with polyurethane waste. Once the ideal mixture has been determined, the implementation of the research at industrial level is studied and the plaster ceiling tile with recycled polyurethane is manufactured. The assessment of the functional suitability is carried out with the placement on site of the product. The environmental and economic performance of the innovative material is analysed using Life Cycle Assessment and Life Cycle Cost methodologies, respectively.

The results obtained show that it is feasible to incorporate polyurethane waste as a raw material in gypsum mixtures. In general, it leads to a decrease in density, mechanical performance, thermal conductivity and setting time.

Industrial production is possible and it only involves adapting the initial section of the production line to incorporate recycled polyurethane as raw material. The new model shows a substantial reduction in weight and thermal conductivity compared to standard gypsum ceiling tile.

Placement on site is successfully completed in three pilot buildings, with a total of 900 m<sup>2</sup> of new gypsum ceiling tiles with polyurethane waste installed.

In terms of environmental assessment, the new precast incorporates recycled material, it consumes less gypsum and water, and it reduces CO<sub>2</sub> emissions and energy demand with regard to the traditional model. As a result of this evaluation, the self-declared environmental statement (Environmental Labelling Type II) was obtained. From the financial assessment, it is concluded that the inclusion of recycled polyurethane in the product slightly reduces its life cycle cost.

Finally, the circular economy of the green product is proven by its inclusion in a new gypsum mix.

**Keywords:**

Gypsum ceiling tile, polyurethane waste, industrial manufacturing, Life Cycle Assessment (LCA), Life Cycle Cost (LCA), placement.

<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. Sostenibilidad .....</b>	<b>3</b>
1.1.1. El sector de la construcción.....	5
1.1.2. El sector de los polímeros.....	11
1.1.3. Evaluación de la sostenibilidad.....	13
<b>1.2. El yeso en el sector de la construcción.....</b>	<b>15</b>
1.2.1. Antecedentes.....	15
1.2.2. Fabricación del yeso .....	16
1.2.3. Clasificación, propiedades y usos.....	17
<b>1.3. El poliuretano .....</b>	<b>18</b>
1.3.1. Antecedentes.....	18
1.3.2. Gestión del residuo de poliuretano .....	19
<b>1.4. Proyecto europeo Life-Repolyuse .....</b>	<b>20</b>
<b>1.5. Introducción de la investigación .....</b>	<b>20</b>
<b>CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE.....</b>	<b>23</b>
<b>2.1. Residuos poliméricos incorporados en mezclas de yeso .....</b>	<b>23</b>
2.1.1. Residuo de polipropileno (PP) .....	24
2.1.2. Residuo de polietileno (PE).....	24
2.1.3. Residuo de poliestireno extruido (XPS) y expandido (EPS) .....	24
2.1.4. Residuo de poliamida.....	25
2.1.5. Residuo de policarbonato .....	26
2.1.6. Residuo de caucho .....	26
<b>2.2. Residuo de poliuretano incorporado en materiales de construcción .....</b>	<b>27</b>
2.2.1. Residuo de poliuretano incorporado en betún....	27
2.2.2. Residuo de poliuretano incorporado en hormigón .....	28
2.2.3. Residuo de poliuretano incorporado en mortero de cemento.....	29
2.2.4. Residuo de poliuretano incorporado en mortero de yeso .....	30
<b>2.3. Prefabricados con residuos poliméricos .....</b>	<b>31</b>

2.3.1. Prefabricado de cemento con residuo de poliuretano.....	31
2.3.2. Prefabricados de yeso con residuo de poliuretano .....	32
2.3.3. Prefabricados de yeso con otros tipos de residuos poliméricos.....	32
<b>2.4. Análisis de la sostenibilidad de materiales de construcción con residuos poliméricos.....</b>	<b>34</b>
<b>CAPÍTULO 3. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>37</b>
<b>CAPÍTULO 4. OBJETIVOS.....</b>	<b>41</b>
4.1. Objetivo principal .....	41
4.2. Objetivos específicos .....	41
<b>CAPÍTULO 5. METODOLOGÍA .....</b>	<b>45</b>
5.1. Plan de trabajo.....	45
5.2. Caracterización.....	47
5.2.1. Caracterización física .....	48
5.2.1.1. Densidad aparente .....	48
5.2.1.2. Densidad real .....	50
5.2.1.3. Granulometría por difracción láser .....	51
5.2.1.4. Adsorción física de gases.....	52
5.2.1.5. Conductividad térmica .....	54
5.2.1.6. Colorimetría .....	57
5.2.1.7. Viscosidad aparente.....	58
5.2.2. Caracterización mecánica .....	59
5.2.2.1. Resistencia a flexión .....	59
5.2.2.2. Resistencia a compresión .....	62
5.2.2.3. Dureza Shore C .....	63
5.2.2.4. Adherencia.....	64
5.2.2.5. Deformación bajo carga .....	66
5.2.3. Caracterización química.....	66
5.2.3.1. Análisis elemental (CHNS) .....	67
5.2.3.2. Lixiviación .....	68
5.2.3.3. Principio de fraguado .....	69



6.2.4.1. Absorción de agua por inmersión .....	116
6.2.5. Caracterización térmica .....	116
6.2.5.1. Termogravimetría (TGA) .....	117
6.2.6. Fichas técnicas.....	117
6.2.7. Conclusiones .....	126
<b>6.3. Fibra de vidrio .....</b>	<b>127</b>
<b>6.4. Aditivo .....</b>	<b>127</b>
6.4.1. Densidad real .....	128
6.4.2. Viscosidad aparente .....	128
<b>6.5. Agua .....</b>	<b>128</b>
<b>CAPÍTULO 7. FABRICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE MEZCLAS DE YESO CON RESIDUO DE POLIURETANO.....</b>	<b>133</b>
<b>7.1. Fabricación.....</b>	<b>134</b>
<b>7.2. Diseño de dosificaciones .....</b>	<b>136</b>
<b>7.3. Caracterización de las mezclas de yeso con residuo de poliuretano .....</b>	<b>137</b>
7.3.1. Caracterización física .....	140
7.3.1.1. Densidad aparente en estado fresco y en estado endurecido .....	140
7.3.1.2. Adsorción física de gases.....	142
7.3.1.3. Conductividad térmica .....	146
7.3.1.4. Colorimetría .....	149
7.3.2. Caracterización mecánica .....	151
7.3.2.1. Resistencia a flexión .....	151
7.3.2.2. Resistencia a compresión .....	153
7.3.2.3. Dureza Shore C .....	154
7.3.2.4. Adherencia.....	155
7.3.3. Caracterización química.....	158
7.3.3.1. Principio de fraguado .....	158
7.3.4. Caracterización microscópica.....	159
7.3.4.1. Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) .....	159
7.3.4.2. Tomografía Axial Computarizada (TAC)	164
7.3.5. Caracterización higroscópica.....	166
7.3.5.1. Acumulación de agua .....	167



7.3.5.2. Absorción de agua por inmersión .....	168
7.3.5.3. Absorción de agua por capilaridad .....	169
7.3.5.4. Permeabilidad al vapor de agua .....	172
7.3.5.5. Curva de adsorción higroscópica .....	174
7.3.6. Caracterización térmica .....	180
7.3.6.1. Termogravimetría (TGA) .....	180
7.3.6.2. Reacción al fuego. Ensayos de no combustibilidad y calor bruto de combustión .....	184
7.3.7. Conclusiones .....	186

## **CAPÍTULO 8. INDUSTRIALIZACIÓN DE PLACAS DE YESO CON RESIDUO DE POLIURETANO ..... 193**

### **8.1. Implementación a nivel industrial..... 193**

8.1.1. Adaptación de la planta para el procesado del residuo de poliuretano.....	193
8.1.2. Modificaciones en la línea de producción .....	195

### **8.2. Fabricación..... 200**

### **8.3. Caracterización de la placa de yeso con residuo de poliuretano..... 204**

8.3.1. Caracterización .....	204
8.3.1.1. Densidad aparente en estado endurecido .....	206
8.3.1.2. Conductividad térmica .....	206
8.3.1.3. Resistencia a flexión .....	206
8.3.1.4. Dureza Shore C .....	206
8.3.1.5. Deformación bajo carga .....	207
8.3.1.6. Análisis Elemental (CHNS) .....	207
8.3.1.7. Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) .....	208
8.3.1.8. Tomografía Axial Computarizada (TAC) .....	209
8.3.1.9. Absorción de agua por inmersión .....	209
8.3.1.10. Termogravimetría (TGA) .....	210
8.3.1.11. Reacción al fuego. Ensayo de no combustibilidad y calor bruto de combustión .....	211
8.3.1.12. Absorción acústica .....	211
8.3.2. Ficha técnica del producto .....	212

8.3.3. Marcado CE .....	213
8.3.4. Análisis comparativo entre la placa de yeso con residuo de poliuretano y la placa de yeso estándar .....	214
8.3.5. Conclusiones .....	217
<b>8.4. Políticas medioambientales, protocolo y guía de aplicación de la gestión del residuo de poliuretano para su valorización .....</b>	<b>217</b>
8.4.1. Políticas medioambientales de aplicación en la gestión del residuo de poliuretano .....	217
8.4.2. Protocolo para la gestión del residuo de poliuretano en las instalaciones del generador del residuo .....	220
8.4.3. Guía de aplicación para la integración del residuo de poliuretano en prefabricados de yeso a nivel industrial.....	224
<b>8.5. Conclusiones .....</b>	<b>226</b>
<b>CAPÍTULO 9. PUESTA EN OBRA.....</b>	<b>229</b>
9.1. Puesta en obra en Burgos (España).....	231
9.2. Puesta en obra en Álava (España) .....	235
9.3. Puesta en obra en Coventry (Reino Unido).....	241
9.4. Resultados del proceso de monitorización.....	243
9.5. Conclusiones .....	247
<b>CAPÍTULO 10. DESARROLLO SOSTENIBLE. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA Y ANÁLISIS DEL COSTE DEL CICLO DE VIDA.....</b>	<b>251</b>
<b>10.1. Análisis de Ciclo de Vida (ACV).....</b>	<b>251</b>
10.1.1. Metodología .....	252
10.1.2. Análisis de ciclo de vida de la fase experimental .....	254
10.1.2.1. Definición del objetivo y el alcance del estudio .....	254
10.1.2.2. Análisis del inventario (ICV) .....	256
10.1.2.3. Evaluación del impacto de ciclo de vida (EICV) .....	256
10.1.2.4. Interpretación .....	257

10.1.2.5. Análisis de sensibilidad .....	261
10.1.3. Análisis de ciclo de vida de la fase industrial..	263
10.1.3.1. Definición del objetivo y el alcance del estudio .....	263
10.1.3.2. Análisis del inventario (ICV) .....	265
10.1.3.3. Evaluación del impacto de ciclo de vida (EICV) .....	270
10.1.3.4. Interpretación .....	271
10.1.4. Etiquetas ecológicas y declaraciones ambientales .....	273
10.1.4.1. Afirmación ambiental autodeclarada (Etiquetado Ambiental Tipo II) .....	274
<b>10.2. Análisis del Coste del Ciclo de Vida (CCV) .....</b>	<b>275</b>
10.2.1. Metodología .....	276
10.2.2. Análisis de ciclo de vida de costes de la fase industrial.....	277
10.2.2.1. Definición del objetivo y el alcance del estudio .....	278
10.2.2.2. Análisis del inventario (ICV) .....	278
10.2.2.3. Evaluación del impacto de ciclo de vida (EICV) .....	280
10.2.2.4. Interpretación .....	281
10.2.2.5. Análisis de sensibilidad.....	285
<b>10.3. Evaluación de la Ecoeficiencia (EE) .....</b>	<b>287</b>
10.3.1. Metodología .....	287
10.3.2. Análisis de ecoeficiencia de la fase industrial ..	288
<b>10.4. Conclusiones.....</b>	<b>291</b>
<b>CAPÍTULO 11. ECONOMÍA CIRCULAR. VALORIZACIÓN DE LAS PLACAS DE YESO CON RESIDUO DE POLIURETANO .....</b>	<b>295</b>
<b>11.1. Procedimiento de reciclaje.....</b>	<b>300</b>
<b>11.2. Caracterización de materias primas.....</b>	<b>301</b>
11.2.1. Residuo de placa de yeso con residuo de poliuretano.....	302
11.2.2. Aditivo .....	303
<b>11.3. Diseño de dosificaciones.....</b>	<b>304</b>

<b>11.4. Fabricación .....</b>	<b>307</b>
<b>11.5. Caracterización de mezclas de yeso con residuo de placa.....</b>	<b>308</b>
11.5.1. Caracterización física.....	308
11.5.2. Caracterización mecánica.....	311
<b>11.6. Conclusiones.....</b>	<b>312</b>
<b>CAPÍTULO 12. CONCLUSIONES .....</b>	<b>317</b>
<b>CONCLUSIONS.....</b>	<b>320</b>
<b>CAPÍTULO 13. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>325</b>
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>329</b>
<b>PRODUCCIÓN CIENTÍFICA.....</b>	<b>349</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>353</b>

# Introducción

01



## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

La crisis energética sumada a la crisis climática es uno de los mayores desafíos a los que nos enfrentamos como sociedad. El calentamiento global y la falta de recursos, especialmente energéticos, requieren de la colaboración y el compromiso urgente de instituciones, empresas y sociedad civil para paliar los efectos adversos, en gran parte incentivados por la acción del ser humano.

La innovación y la ciencia resultan esenciales en la búsqueda de alternativas eficaces y sostenibles que permitan una mejor adaptación a los cambios ya experimentados, y desarrollen iniciativas novedosas que fomenten un futuro sostenible y resiliente.

### 1.1. Sostenibilidad

El término de desarrollo sostenible se utiliza por primera vez y de forma oficial en el Informe Brundtland de 1987 de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) y se define como aquel que *“satisface las necesidades del presente sin comprometer las necesidades de futuras generaciones”*<sup>1</sup>. En 1992, los estados pertenecientes a la ONU firman la Declaración de Río sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo en la que cuestiona el modelo de producción y consumo utilizado y aboga por una transformación del concepto de desarrollo en el que no sólo se tengan en cuenta aspectos económicos, sino también ambientales y sociales<sup>2</sup>. Además, en esta cumbre se establece la Agenda 21, germen de los 8 Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM) creados por la ONU en el año 2000. En el año 2015, estos objetivos fueron revisados dando lugar a la presente Agenda 2030, en la que se recogen 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) con 169 metas en total. En ellos se hace un llamamiento a empresas, países, etc., para acentuar los esfuerzos desde un abordaje tridimensional de las cuestiones sociales, económicas y medioambientales<sup>3</sup>.

---

<sup>1</sup> Naciones Unidas. (1987). Report Brundtland.

<sup>2</sup> Naciones Unidas. (1993). Informe de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo. Río de Janeiro, 3 al 14 de junio de 1992.

<sup>3</sup> Naciones Unidas. (2022, febrero). Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. <https://sdgs.un.org/2030agenda>

Los esfuerzos por mitigar los impactos ambientales derivados de la actividad económica mundial se intensifican y dan a lugar a nuevas políticas de acción global. En el año 2016 entra en vigor el Acuerdo de París, pacto internacional mediante el cual, diversos países se comprometen a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, tan nocivas para el cambio climático, con el propósito de evitar que la temperatura media del planeta supere en más de 2 °C los niveles pre-industriales<sup>4</sup>. Este hito resulta esencial para el cumplimiento de los ODS y supone el punto de partida de otras medidas en materia de reducción de emisiones.

A nivel europeo, se ponen en marcha numerosas iniciativas como el Nuevo Plan de Acción de Economía Circular desarrollado en el año 2020<sup>5</sup>. Con esta política se pretende transformar el modelo económico lineal actual basado en la extracción, producción, consumo y desecho en un modelo de economía circular (Figura 1.1). Este último sistema se caracteriza por promocionar la valorización y reciclaje de los residuos, alargando su vida útil, optimizando su valor y evitando la pérdida de recursos que suponen otros procesos de gestión de los desechos. Además, conlleva una reducción drástica en la explotación y consumo de recursos naturales limitados, evitando su agotamiento.



Figura 1.1. Modelo de economía lineal y modelo de economía circular

<sup>4</sup> Naciones Unidas. (2015). Paris Agreement.

<sup>5</sup> Comisión Europea. (2023, julio). Environment – Circular Economy Action Plan. [https://environment.ec.europa.eu/strategy/circular-economy-action-plan\\_en](https://environment.ec.europa.eu/strategy/circular-economy-action-plan_en)



En ese mismo año, la Unión Europea (UE) lanza el desafío “European Green Deal”, una estrategia ambiental a largo plazo que pretende reducir a cero las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) para el año 2050. Se instauran hitos intermedios que permiten evaluar el nivel de progreso obtenido, los cuales establecen una disminución del 20 % en las emisiones para el año 2020 y del 55 % para el año 2030, en relación a los niveles registrados en 1990. El propósito último de esta iniciativa es promover una urgente transición hacia una economía y sociedad neutrales climáticamente y solidarias con el cambio climático<sup>6</sup>. Los GEI están íntimamente relacionados con el aumento de la temperatura global. Superar la barrera de los 2 °C establecida en el Acuerdo de París, tendría consecuencias indeseables para el medio ambiente y el ser humano.

Los datos conocidos hasta la fecha indican que la temperatura media global en el año 2019 se ha incrementado en 1,1 puntos con respecto a la registrada en la etapa pre-industrial, en gran parte motivada las emisiones de efecto invernadero (dióxido de carbono, metano, óxido nítrico, etc.). La concentración de CO<sub>2</sub> ha aumentado en casi un 50 % desde mediados del siglo XVIII<sup>7</sup>.

Los esfuerzos realizados para reducir los GEI en estos últimos años han dado sus frutos, reduciéndose en un 31 % en el año 2020 con respecto a 1990. Sin embargo, a pesar de estos esfuerzos, los pronósticos para el año 2030 no son tan positivos ya que se estima un recorte de sólo el 41 % de las emisiones, por lo que no se alcanzaría el valor establecido<sup>8</sup>.

### 1.1.1. El sector de la construcción

La construcción representa uno de los sectores económicos más significativos, constituye el 13 % del producto interior bruto (PIB) global en

---

<sup>6</sup> Comisión Europea. (2023, julio). Climate Action - 2050 long-term strategy. [https://climate.ec.europa.eu/eu-action/climate-strategies-targets/2050-long-term-strategy\\_en](https://climate.ec.europa.eu/eu-action/climate-strategies-targets/2050-long-term-strategy_en)

<sup>7</sup> Comisión Europea. (2023, julio). Climate Action – Causes of climate change. [https://climate.ec.europa.eu/climate-change/causes-climate-change\\_en](https://climate.ec.europa.eu/climate-change/causes-climate-change_en)

<sup>8</sup> Parlamento Europeo. (2023, julio). Progreso de la UE hacia sus objetivos de cambio climático para 2020 (infografía). <https://www.europarl.europa.eu/news/es/headlines/society/20180706STO07407/progreso-de-la-ue-hacia-sus-objetivos-de-cambio-climatico-para-2020-infografia>

el año 2020, y se espera un crecimiento de 0,5 puntos para el año 2030<sup>9</sup>. En cuanto a la Unión Europea, los datos son más moderados, éste supone el 9 % del PIB<sup>10</sup> y el 5 % en el ámbito nacional<sup>11</sup>.

A la vez que crece su tamaño, aumenta su impacto en el medio ambiente. En el año 2021, se recupera el nivel de la actividad mundial pre-pandemia, y los datos obtenidos muestran un aumento de las inversiones del 52 %, la superficie edificada crece en un 11 %, el consumo energético se reduce en menos de un 1 % y las emisiones disminuyen un 7 % con respecto a los registros del año 2015<sup>12</sup>.

Los edificios son responsables del 36 % de las emisiones de dióxido de carbono, del agotamiento del 50 % de los recursos naturales extraídos y consumen entorno al 40 % del total de energía demandado a nivel europeo<sup>13</sup>. La etapa de uso de las edificaciones supone un consumo en torno al 80 % del total; entre un 5 y un 12 % se asocia a las etapas de construcción y renovación, y el porcentaje restante se relaciona con otras fases, como la extracción de materias primas, la demolición y el fin de vida<sup>14,15</sup>.

En el año 2020, se producen un total de 2.135 millones de toneladas de residuos en la UE, es decir, 4,8 toneladas de residuos por habitante. El

---

<sup>9</sup> Marsh and GuyCarpenter. (2021). Future of Construction - A Global Forecast for Construction to 2030.

<sup>10</sup> Comisión Europea. (2022, enero). Construction Sector. [https://ec.europa.eu/growth/sectors/construction\\_en](https://ec.europa.eu/growth/sectors/construction_en)

<sup>11</sup> Idealista. (2023, julio). El sector constructor, de ser uno de los reyes de la economía a tocar mínimos históricos. <https://www.idealista.com/news/finanzas/economia/2022/09/15/799095-el-peso-de-la-construccion-en-la-economia-espanola-toca-minimos-historicos>

<sup>12</sup> Naciones Unidas. (2022). Informe sobre la situación mundial de los edificios y la construcción en 2022.

<sup>13</sup> Niu, Y., Rasi, K., Hughes, M., Halme, M. & Fink, G. (2021). Prolonging life cycles of construction materials and combating climate change by cascading: The case of reusing timber in Finland. *Resources, Conservation and Recycling*, 170 (105555). <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105555>

<sup>14</sup> Jang, M., Hong, T. & Ji, C. (2015). Hybrid LCA model for assessing the embodied environmental impacts of buildings in South Korea. *Environmental Impact Assessment Review*, 50, 143-155. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2014.09.010>

<sup>15</sup> Comisión Europea. (2023, julio). Buildings and construction. [https://single-market-economy.ec.europa.eu/industry/sustainability/buildings-and-construction\\_en](https://single-market-economy.ec.europa.eu/industry/sustainability/buildings-and-construction_en)

60 % de los desechos se someten a procesos de recuperación (40 % reciclado, 13 % relleno y 7 % recuperación de energía), el 32 % se deposita en vertedero y el 8 % restante se elimina de otros modos<sup>16</sup>. Los residuos de construcción y demolición (RCDs) suponen un tercio del total generado en el espacio europeo, siendo los más abundantes<sup>17</sup> (Figura 1.2).

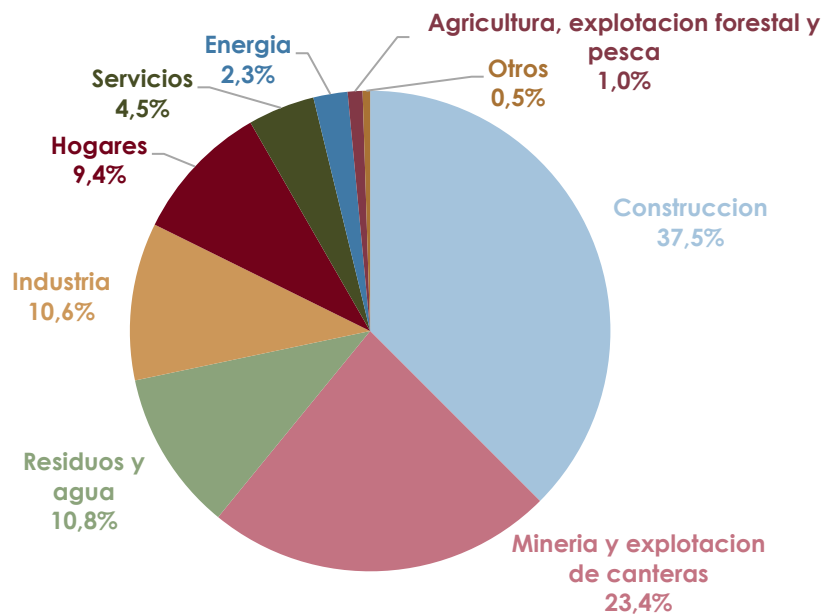


Figura 1.2. Porcentaje de residuos generados según sector económico en la UE en el año 2020

Los RCDs no sólo proceden de obras de edificación, también se engloban las obras de carácter civil e infraestructuras. Los RCDs están constituidos por gran variedad de materiales como hormigón, cerámicos, madera, vidrio, yeso, etc. La gestión más habitual de este tipo de residuos consiste en su deposición en vertedero, dado que la mezcla de productos que presenta, dificulta cualquier otro tipo de tratamiento, como la valorización o el reciclaje.

<sup>16</sup> Eurostat. (2023, julio). Waste Statistics. [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Waste\\_statistics#Total\\_waste\\_generation](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Waste_statistics#Total_waste_generation)

<sup>17</sup> Comisión Europea. (2023, julio). Residuos de construcción y demolición. [https://environment.ec.europa.eu/topics/waste-and-recycling/construction-and-demolition-waste\\_en](https://environment.ec.europa.eu/topics/waste-and-recycling/construction-and-demolition-waste_en)

El sector de la construcción tiene implicación en varios de los ODS, en algunos, de una manera directa, y en otros de forma transversal (Figura 1.3).



Figura 1.3. Los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Agenda 2030

El ODS-3 “Salud y bienestar” contempla la necesidad de que una vivienda sostenible garantice el confort y salubridad en su interior. La correcta evacuación de las aguas sucias del edificio, así como la eficiente gestión de los recursos hídricos, se incluyen entre las metas del ODS-6 “Agua limpia y saneamiento”. El ODS-7 “Energía asequible y no contaminante” insta a proveer de energía a la población, y a promover la eficiencia energética y la utilización de energías renovables en las construcciones. El ODS-8 “Trabajo decente y crecimiento económico” se relaciona con la alta siniestralidad en cuanto a accidentes de trabajo del sector de la construcción, y respalda las prácticas que fomentan condiciones laborales justas y dignas. Además, este sector emplea gran cantidad de mano de obra, debido a la escasez de avances tecnológicos, aspecto relacionado también con el ODS-9 “Industria, innovación e infraestructura”. El ODS-11 “Ciudades y comunidades sostenibles” pretende la sinergia entre la construcción y la sostenibilidad de cara a la creación de un entorno y urbanismo más respetuoso con la vivienda inclusiva, y al acceso de toda la población. EL ODS-12 “Producción y consumo responsables” es de aplicación en la fase de construcción con el empleo de materiales sostenibles y reciclables y

durante la fase uso, garantizando un consumo bajo de recurso, especialmente energéticos. El ODS-13 “Acción por el clima” presta especial atención al cambio climático muy favorecido por las emisiones de gases, de los que el parque inmobiliario es responsable en gran medida.

La gran influencia del parque inmobiliario en la crisis climática y energética, es una realidad que debe abordarse desde diferentes perspectivas. Dada su elevada implicación en las medidas generales, promovidas por la Unión Europea, y a nivel mundial, se crea un paquete de medidas específico para este sector. Las rutas de acción establecidas, y de las que urge su avance y cumplimiento, están enfocadas a mejorar la sostenibilidad en cuestiones medioambientales, de las que el sector de la construcción y la eficiencia energética de las edificaciones son partícipes<sup>18</sup>.

El proyecto “New European Bauhaus” es un movimiento que busca intervenir en la fase de diseño del sector de la construcción, entre otros, para lograr la consecución del “European Green Deal”<sup>19</sup>. Entre las propuestas, se encuentra la búsqueda de un modelo de vivienda atractivo, sostenible e inclusivo.

Otra de las acciones aboga por prolongar la vida útil de los inmuebles existentes, ya que resulta la medida más eficaz para evitar el consumo de los recursos en el sector. La iniciativa “Renovation wave” surge para mejorar la eficiencia energética de los activos inmobiliarios existentes, interviniendo de forma que se garantice su durabilidad y adaptabilidad, y fomentando la economía circular y la optimización de los materiales<sup>20</sup>.

En esta línea de trabajo hacia la sostenibilidad, eficiencia y circularidad de los recursos, surge una iniciativa dirigida específicamente

---

<sup>18</sup> Comisión Europea. (2023). Transition pathway for construction.

<sup>19</sup> Comisión Europea. (2022, febrero). European Green Deal: Commission proposes transformation of EU economy and society to meet climate ambitions. [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip\\_21\\_3541](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_21_3541)

<sup>20</sup> Comisión Europea. (2023, julio). Energy – Renovation wave. [https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/renovation-wave\\_en](https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/renovation-wave_en)

a los productos entre los que se encuentran los materiales de construcción. Esta estrategia pretende promocionar a aquellos que tengan en cuenta criterios medioambientales, de forma que se favorezca su eco-diseño y etiquetado energético. La introducción de criterios medioambientales en la fase de diseño, conlleva una mejora de la competencia industrial, y la focalización de los esfuerzos en el desarrollo de productos de innovación<sup>21</sup>.

Los principios de economía circular, de aplicación en el sector de la construcción, son recogidos en un informe de forma que, sirva de guía de aplicación para cada actor o participante en el ciclo de vida de un edificio<sup>22</sup>.

Siguiendo con la renovación de las políticas del parque inmobiliario, el Reglamento de Productos de Construcción y la Directiva de Eficiencia Energética de los Edificios se encuentran en proceso de revisión y actualización.

En consecuencia, las nuevas políticas en materia de medio ambiente de aplicación en el sector de la construcción pretenden reducir su huella ecológica y cumplir los compromisos generales dado su gran potencial y rango de mejora. Se incentiva una construcción más sostenible, eficiente y respetuosa con la naturaleza, que incorpore materiales ecológicos con una elevada tasa de reciclabilidad. Se pretende la mejora y optimización de la eficiencia energética de las edificaciones durante su fase de uso, proviniéndolas de una eficaz envolvente térmica en la fase de diseño y construcción, y el empleo de equipos de climatización de alto rendimiento basados en energías renovables. Se implementan principios de circularidad en el ciclo de vida del edificio y una adecuada gestión de los residuos de construcción y demolición (RCDs), reduciendo y procurando su máxima valorización.

El desarrollo de materiales de construcción sostenibles es una de las nuevas rutas de innovación e investigación que mayor interés e inversión atraen. Estos productos contribuyen fundamentalmente a mejorar el eje medioambiental del desarrollo sostenible. Su desarrollo fomenta la incorporación en su composición de residuos reciclados, lo que reporta

---

<sup>21</sup> Comisión Europea. (2023, julio). Sustainability. [https://single-market-economy.ec.europa.eu/industry/sustainability\\_en](https://single-market-economy.ec.europa.eu/industry/sustainability_en)

<sup>22</sup> Comisión Europea. (2020). Circular Economy - Principles for buildings design.

beneficios relacionados con la reducción en la explotación de recursos naturales y en las emisiones de CO<sub>2</sub>. Los desechos, generalmente aportan un valor añadido que se ve reflejado en las prestaciones del nuevo material innovador.

### 1.1.2. El sector de los polímeros

La fabricación mundial acumulada de polímeros se estima en 9.500 millones de toneladas, de las cuales, más de la mitad han sido elaboradas en lo que llevamos de siglo XXI<sup>23,24</sup>. El sector de los polímeros ha experimentado un crecimiento del 230 % desde el año 1950, debido a la elevada demanda de este tipo de productos en los últimos años<sup>25</sup>. En la actualidad, los productos elaborados con polímeros, están muy presentes en nuestra economía, y sustituyen a los que tradicionalmente se fabricaban con otros materiales como madera, metal, vidrio, etc.

La producción de polímeros se acerca a los 400 millones de toneladas en el mundo en 2021<sup>26</sup>. Grandes potencias mundiales como China, Estados Unidos y Canadá acumulan más de la mitad de su fabricación, mientras que otras regiones como Japón o Latinoamérica apenas suponen el 5 % cada uno.

Los polímeros más demandados son el polipropileno (PP), el polietileno de baja densidad (PE-LD/-LDD) y el policloruro de vinilo (PVC), entre los tres representan el 43 %. Les sigue el polietileno de media/alta densidad (PE-HD/-MD), el poliestireno (PS) y el poliuretano (PUR) (Figura 1.4)<sup>27</sup>. Todos ellos se consideran termoplásticos, excepto el poliuretano que pertenece al grupo de los termoestables.

---

<sup>23</sup> Plastic Soup Foundation. (2022, enero). Plastic Facts and Figures. <https://www.plasticsoupfoundation.org/en/plastic-facts-and-figures/#productie>

<sup>24</sup> Hannah Ritchie, & Max Roser. (2018). Plastic Pollution. <https://ourworldindata.org/plastic-pollution#citation>

<sup>25</sup> Ellen Macarthur Foundation. (2016). Rethinking the future of plastics 2016.

<sup>26</sup> Plastics Europe. (2022). Plastics - the Facts 2022.

<sup>27</sup> Plastics Europe. (2021). Plastics - the Facts 2021. An analysis of European plastics production, demand and waste data.

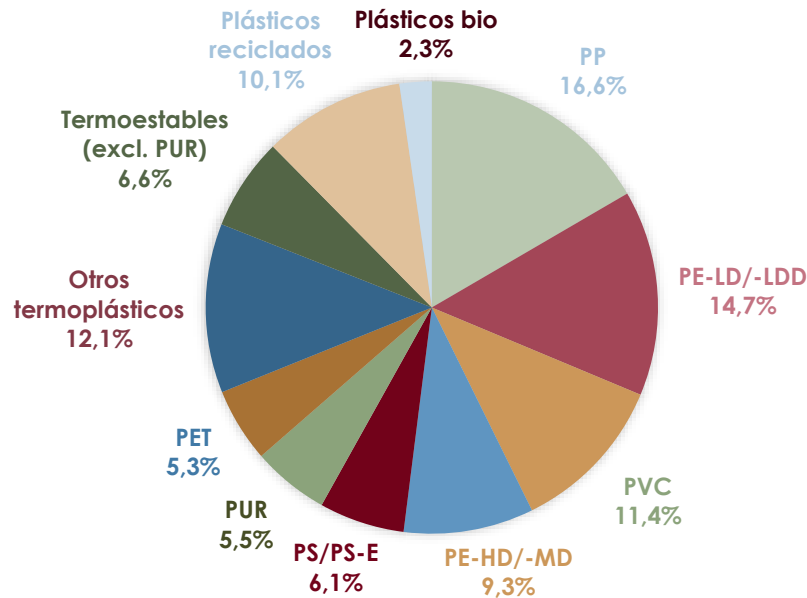


Figura 1.4. Producción de polímeros a nivel europeo según tipología (2021)

El volumen de desechos de tipo polimérico crece prácticamente a la misma velocidad que su producción, entorno al 50 % de los polímeros se transforma en residuo en menos de un mes<sup>28</sup>. La cantidad de residuos poliméricos generados al año se cifra en 250 millones de toneladas. Únicamente, el 35 % de éstos siguen un modelo de economía circular, mientras que el resto siguen otros modelos de gestión como la disposición en vertedero, incineración, etc<sup>29</sup>.

Son numerosas las investigaciones que estudian la influencia de la contaminación por desechos poliméricos en el medio ambiente y en los ecosistemas, provocando graves riesgos en la naturaleza y en la salud de los seres humanos<sup>30</sup>.

<sup>28</sup> Heinrich Böll Foundation. (2019). Plastic atlas 2019: Facts and figures about the world of synthetic polymers (second edition). Heinrich Böll Foundation.

<sup>29</sup> The Conference Board. (2021). Plastic Solid Waste Management.

<sup>30</sup> Johansen, M. R., Christensen, T. B., Ramos, T. M., & Syberg, K. (2022). A review of the plastic value chain from a circular economy perspective. In *Journal of Environmental Management* (Vol. 302). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113975>



El modelo de economía lineal, en el que gran parte de los residuos se desechan, está alcanzando sus límites, los recursos naturales son finitos y los impactos de la contaminación graves. Es por ello, que la UE asume el reto de forma prioritaria y aprueba un plan de acción estratégico, con el objetivo de eliminar la contaminación polimérica y acelerar la circularidad de su economía<sup>31,32</sup>. En paralelo se crea la Alianza por los Plásticos Circulares que pretende aumentar la cantidad de plásticos reciclados hasta los 10 millones de toneladas para el año 2025<sup>33</sup>.

Entre las alternativas sostenibles para mejorar la economía circular del sector polimérico se encuentra la valorización y reciclado de los productos de tipo polimérico en materiales de construcción, lo que les otorga un valor añadido y mejora sus indicadores de sostenibilidad<sup>34</sup>.

### 1.1.3. Evaluación de la sostenibilidad

La consumación de todas las estrategias, iniciativas, acuerdos y políticas en materia de desarrollo sostenible implica un gran esfuerzo social y económico, que precisa de una férrea colaboración y sinergia entre los actores principales.

El análisis de la sostenibilidad, desde un punto de vista cuantitativo, resulta fundamental, de forma que, los resultados obtenidos ayuden en la toma de decisiones hacia alternativas más sostenibles y respetuosas con el medioambiente, la economía y la sociedad.

A este respecto, surgen metodologías de análisis eficaces y fiables que ayudan a gestionar el potencial, esfuerzo e inversión en la dirección adecuada. La perspectiva tridimensional del desarrollo sostenible conlleva una triple evaluación de cada uno de sus pilares (medioambiente, economía y sociedad) de forma individualizada. El

---

<sup>31</sup> Comisión Europea. (2022, septiembre). Plastics. [https://environment.ec.europa.eu/topics/plastics\\_en](https://environment.ec.europa.eu/topics/plastics_en)

<sup>32</sup> Comisión Europea. (2022, diciembre). Plastics strategy. [https://environment.ec.europa.eu/strategy/plastics-strategy\\_en](https://environment.ec.europa.eu/strategy/plastics-strategy_en)

<sup>33</sup> Comisión Europea. (2023, julio). Circular Plastics Alliance. [https://single-market-economy.ec.europa.eu/industry/strategy/industrial-alliances/circular-plastics-alliance\\_en](https://single-market-economy.ec.europa.eu/industry/strategy/industrial-alliances/circular-plastics-alliance_en)

<sup>34</sup> Calderón, V., Gutiérrez-González, S., Gadea, J., Rodríguez, Á., & Junco, C. (2018). Construction Applications of Polyurethane Foam Wastes. Recycling of Polyurethane Foams, 115–125. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-51133-9.00010-3>

grado de sostenibilidad global del producto o servicio analizado se obtiene por combinación de éstos, y para conocer su desempeño es preciso llevar a cabo un análisis comparativo (Figura 1.5).

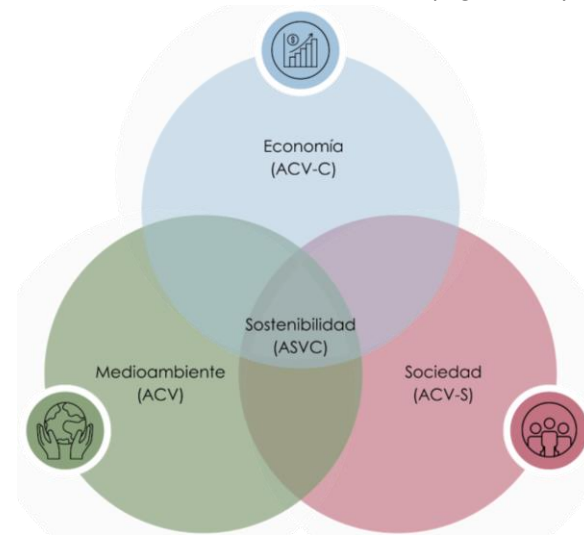


Figura 1.5. Evaluación de la sostenibilidad

La metodología con la que se lleva a cabo la evaluación de la sostenibilidad se conoce como Análisis de Sostenibilidad de Ciclo de Vida (ASCV) o Life Cycle Sustainability Assessment (LCSA). Éste resulta de la combinación de los indicadores obtenidos en la evaluación de los aspectos medioambientales, económicos y sociales (Ecuación 1.1)<sup>35</sup>.

$$\text{ASCV} = \text{ACV} + \text{CCV} + \text{ACV-S} \quad (\text{Ecuación 1.1})$$

La metodología empleada para analizar el impacto ambiental se conoce como Análisis de Ciclo de Vida (ACV) o “Life Cycle Assessment” (LCA) en inglés. El rendimiento económico se evalúa con ayuda de la herramienta de Análisis de Ciclo del Coste del Vida (CCV) o “Life Cycle Cost” (LCC) en inglés. En cuanto al aspecto social, éste se estudia mediante el Análisis de Ciclo de Vida Social (ACV-S) o “Social Life Cycle Assessment” (sLCA). Estos métodos coinciden en el estudio de los flujos de entrada y salida del sistema que tienen impacto en los pilares fundamentales de la sostenibilidad. La evaluación se realiza

<sup>35</sup> Kloepffer, W. (2008). Life cycle sustainability assessment of products. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 13(2), 89-95. <https://doi.org/10.1065/lca2008.02.376>

considerando todas fases del ciclo de vida, desde la extracción de las materias primas hasta el tratamiento de final de vida.

Existen diferentes metodologías que relacionan varios aspectos entre sí, como la Evaluación de la Ecoeficiencia (EE), que compara el rendimiento ecológico y el económico<sup>36</sup>.

De entre todas las evaluaciones, el desempeño ambiental resulta de especial interés para la ciudadanía, dada la concienciación social y sensibilización entorno al medioambiente, las presiones políticas y la necesidad de transparencia y responsabilidad.

Para lograr un desarrollo fructífero de productos de construcción sostenibles, es preciso tener en consideración las implicaciones medioambientales a lo largo de todo el ciclo de vida. El método que evalúa y cuantifica el daño ambiental de un material es el ACV. Para la comercialización y puesta en mercado de los nuevos materiales desarrollados, es importante que sean competitivos económicamente, el CCV permite evaluar su rendimiento y compararlo con el de productos afines de uso habitual en el sector.

## 1.2. El yeso en el sector de la construcción

El yeso es un mineral común denominado piedra de yeso o aljez y se presenta en abundancia en la naturaleza. Es una roca sedimentaria cuya formación tiene lugar en capas de material dispuestos hace miles de años bajo acumulaciones de agua salada, quedando al descubierto con la evaporación del líquido.

Los yacimientos más grandes se localizan en Estados Unidos y en Europa, concretamente en Francia, Alemania, Italia, Polonia, España y Reino Unido<sup>37</sup>.

### 1.2.1. Antecedentes

El yeso hace su aparición en el sector de construcción hace miles de años. Es en la antigua Mesopotamia de donde se obtienen los

---

<sup>36</sup> Ehrenfeld, J. R. (2005). Eco-efficiency: Philosophy, theory, and tools. *Journal of Industrial Ecology*, 9(4), 6-8. <https://doi.org/10.1162/108819805775248070>

<sup>37</sup> Eurogypsum (2023, julio). Gypsum all around. <https://eurogypsum.org/the-gypsum-industry/use-of-gypsum-in-buildings/>

primeros registros datados en el año 7.000 a.C. Este mineral era empleado como revestimiento de paredes y suelos interiores, así como aglutinante en la elaboración de ladrillos.

En el antiguo Egipto se mezclaba con agua para el revestimiento del interior de las pirámides y el embalsamamiento de cuerpos.

El imperio romano evoluciona la fabricación y aplicación de la pasta, utilizándola en muros, molduras, decoración y escayola.

El uso del yeso en la construcción decae en la Edad Media y queda relegado a decoraciones y manuscritos, sin embargo, resurge en la época del Renacimiento en la que los artistas de la época recrean las técnicas romanas.

En el siglo XVIII, este mineral experimenta una fase de investigación y conocimiento con la incorporación de aditivos que culmina con la industrialización de la fabricación del yeso.

A finales del siglo XIX, el sector desarrolla e impulsa la creación de productos a base de yeso o escayola con ayuda de moldes dando lugar a los prefabricados de yeso.

Su abundancia, disponibilidad y bajo coste económico hacen que siga siendo un mineral altamente consumido en la construcción moderna<sup>38</sup>. En el año 2022, se demanda un total de 150 millones de toneladas a nivel global, un 43 % menos que en 2015 y 2016<sup>39</sup>. Pese a la tendencia mundial, la demanda de yeso en España aumenta situándose en 13,55 millones de toneladas en el año 2021<sup>40</sup>.

### 1.2.2. Fabricación del yeso

El yeso, en su estado natural, se compone de sulfato de calcio dihidratado ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), y presenta una red cristalina. Para su utilización en la construcción, la piedra de yeso es sometida a un proceso

---

<sup>38</sup> De Villanueva, L. (2004). Evolución histórica de la construcción con yeso. *Informes de La Construcción*, 56(493), 5–12.

<sup>39</sup> Statista. (2023, julio). Gypsum production worldwide from 2010 to 2022. <https://www.statista.com/statistics/1006964/global-gypsum-production/>

<sup>40</sup> Statista. (2023, julio). Production of gypsum in Spain from 2011 to 2020. <https://www.statista.com/statistics/1351654/gypsum-production-volume-spain/>

de cocción en el que se elimina el agua, dando lugar a sulfato de calcio hemihidrato ( $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ ). En ocasiones, dependiendo de la temperatura de calcinación, puede aparecer sulfato de calcio anhidro ( $\text{CaSO}_4$ ). Este hemihidrato se hidrata incorporando agua y dando lugar a la pasta de yeso de uso en edificación.

Se trata de un mineral de circuito cerrado de reciclado, es decir, los procesos de transformación de calcinación e hidratación, a los que es sometido para su uso y reutilización, pueden ser infinitos ya que su composición química permanece invariable.

### 1.2.3. Clasificación, propiedades y usos

En la actualidad, los yesos empleados en edificación se clasifican en conglomerantes a base de yeso, yesos para la construcción y yesos para aplicaciones especiales<sup>41</sup> (Figura 1.6).

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

Figura 1.6. Tipos de conglomerantes a base de yeso y yesos para la construcción

Los diferentes conglomerantes se diferencian en la proporción de yeso y de cal que incluyen y en si incorporan o no aditivos o agregados.

<sup>41</sup> Asociación Española de Normalización (AENOR). (2008). UNE-EN 13279-1 Yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción. Parte 1: Definiciones y especificaciones.

La escayola está formada por yeso con un índice de pureza superior al 90 % y se emplea principalmente en la elaboración de prefabricados.

Las propiedades más destacadas del yeso son su versatilidad a la hora de crear diferentes diseños, la capacidad de regulación de la humedad relativa del espacio interior, el confort térmico y acústico y la resistencia frente al fuego. Por el contrario, es un material muy vulnerable a los efectos del agua por lo que su empleo en exteriores es muy limitado.

El yeso se utiliza principalmente en la elaboración de conglomerantes o pastas (guarnecidos y enlucidos de yeso) y en elementos prefabricados (paneles, placas, bloques, molduras, etc.).

### **1.3. El poliuretano**

El poliuretano es un tipo de polímero termoestable que se obtiene por combinación de un polioliol (alcohol) con un isocianato.

Existen múltiples tipos de poliuretano, las espumas representan el 70 % del total fabricado (espumas flexibles o espumas rígidas) y el resto son elastómeros, adhesivos y recubrimientos. Cada tipología tiene una formulación concreta en función de la proporción polioliol-isocianato y la incorporación de catalizadores y aditivos.

El poliuretano se emplea en la fabricación de colchones, aislamientos térmicos y acústicos, impermeabilizaciones, revestimientos, ruedas, pegamentos, refrigeración, etc.

#### **1.3.1. Antecedentes**

El poliuretano se descubre en el año 1937 fruto de la experimentación sobre la síntesis de polímeros. Su explotación a nivel industrial comienza en la segunda mitad del siglo XX.

Su versatilidad y amplia gama de aplicaciones lo convierten en un material de gran interés, experimentado un importante crecimiento de la industria del poliuretano en la década de 1970.

Las técnicas de elaboración del poliuretano mejoran con el progreso tecnológico dando lugar a una amplia tipología de poliuretanos.

En el año 2021 se producen un total de 21,5 millones de toneladas de poliuretano a nivel mundial de los cuales un 15 % se fabrican en el territorio europeo<sup>42</sup>. El poliuretano constituye el sexto polímero más demandado, siendo el sector de la construcción, el del automóvil y el de la electrónica sus principales destinos.

### 1.3.2. Gestión del residuo de poliuretano

Los últimos datos disponibles cifran la cantidad de residuos de poliuretano en 0,7 millones de toneladas en el año 2017<sup>43</sup>. Sus numerosas aplicaciones provocan el continuo crecimiento de la industria, lo que a su vez genera un aumento de los desechos de poliuretano en un 20 % al año<sup>44</sup>.

Entorno al 50 % de los residuos de poliuretano se gestionan mediante la disposición en vertedero, el cual constituye el sistema de tratamiento más habitual teniendo en cuenta el bajo rendimiento de otros métodos como la recuperación de energía por incineración, el reciclaje o la biodegradación<sup>45</sup>.

La problemática ambiental se agrava si tenemos en cuenta que las espumas son el tipo de poliuretano más demandado y, en consecuencia, el de mayor presencia en los residuos de poliuretano. El formato en espuma presenta una baja densidad y elevado volumen, lo que significa un gran consumo de terreno en el vertedero.

Se desarrollan múltiples técnicas para la valorización del residuo de poliuretano entre las que destaca el reciclado mecánico como una alternativa eficiente.

---

<sup>42</sup> Plastics Europe. (2022). Plastics - the Facts 2022.

<sup>43</sup> Gómez-Rojo, R., Alameda, L., Rodríguez, Á., Calderón, V., & Gutiérrez-González, S. (2019). Characterization of Polyurethane Foam Waste for Reuse in Eco-Efficient Building Materials. *Polymers*, 11(2), 359. <https://doi.org/10.3390/polym11020359>

<sup>44</sup> Chen, B., Dong, F., Yu, X., & Zheng, C. (2021). Evaluation of properties and micro-characteristics of waste Polyurethane/Styrene-butadiene-styrene composite modified asphalt. *Polymers*, 13(14). <https://doi.org/10.3390/polym13142249>

<sup>45</sup> Kemoná, A., & Piotrowska, M. (2020). Polyurethane Recycling and Disposal: Methods and Prospects. *Polymers*, 12(8), 1752. <https://doi.org/10.3390/polym12081752>

#### 1.4. Proyecto europeo Life-Repolyuse

El trabajo de investigación de la presente tesis doctoral se realiza en el marco del proyecto europeo Life-Repolyuse (REcovery of POLYurethane for reUSE in eco-efficient materials)<sup>46</sup>, financiado por el instrumento LIFE de la Unión Europea, y que aborda la problemática existente en cuanto al agotamiento de recursos naturales, la falta de materiales de construcción sostenibles y la gestión de residuos poliméricos, específicamente de poliuretano.

El objetivo principal es el desarrollo de un nuevo material de construcción ecológico que incorpora poliuretano reciclado.

El proyecto tiene una duración de 39 meses y cuenta con una financiación total de 1.289.434 €. Está coordinado por el Grupo de Investigación de Ingeniería de Edificación (GIIIE) y colaboran socios del ámbito empresarial vinculados al sector de la construcción, como es el caso de Tecsa, empresa constructora, y Yesyforma, fabricante nacional de placas de escayola para techo.

#### 1.5. Introducción de la investigación

El estudio desarrollado en la presente tesis doctoral comprende la fabricación a nivel industrial de una placa de techo de escayola con residuo de poliuretano, cuyo conocimiento se adquiere en la fase experimental previa realizada a nivel de laboratorio. El producto innovador se dispone en diferentes edificios piloto con el propósito de evaluar su funcionalidad e idoneidad de cara a su lanzamiento al mercado. Además, se incluye la evaluación de su rendimiento ambiental y desempeño económico.

---

<sup>46</sup> Life-Repolyuse. (2022, enero). <https://life-repolyuse.com/>



**Estado del arte**

**02**



## CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE

De la problemática existente en los sectores de la construcción y de los polímeros surgen diferentes rutas de investigación cuyo propósito es la búsqueda de propuestas más sostenibles en concordancia con las políticas medioambientales europeas.

Se incluye la descripción de los últimos avances e investigaciones realizados hasta el momento. Los temas de interés son la incorporación de polímeros reciclados en productos de construcción, el desarrollo de prefabricados de yeso con residuos poliméricos en su composición y la evaluación de la sostenibilidad de las mezclas de yeso con polímeros reciclados.

El empleo de residuos de diferentes procedencias en matrices de materiales de construcción implica, a grandes rasgos, la reducción del consumo de materias primas y el alargamiento de la vida útil de estos desechos.

Generalmente, los eco-materiales son más sostenibles y respetuosos con el medio ambiente que los productos tradicionales, siempre y cuando los procesos de valorización y reciclaje de los residuos no supongan un mayor impacto que su sistema de gestión habitual. La metodología de análisis de ciclo de vida se emplea para evaluar de forma numérica y corroborar el mejor desempeño ambiental.

### 2.1. Residuos poliméricos incorporados en mezclas de yeso

La gran cantidad de residuos poliméricos generados en las últimas décadas, procedentes de la industria y de la fase de post-consumo, impactan de forma negativa en el medioambiente y en el desarrollo de la vida.

La comunidad científica responde al desafío de mejorar la gestión de los residuos poliméricos con la búsqueda de alternativas dirigidas a paliar sus efectos perjudiciales al mismo tiempo que se trabaja en la sensibilización y concienciación sobre la jerarquía de los residuos (rediseñar, reducir, reutilizar, reparar, renovar, recuperar y reciclar).

En los últimos años, son numerosas las investigaciones que se centran en la incorporación de polímeros reciclados, a modo de

agregados, en nuevos materiales de construcción. Su reaprovechamiento en forma de recurso proporciona un valor añadido al producto final.

### **2.1.1. Residuo de polipropileno (PP)**

Recientes estudios han evaluado el comportamiento de una matriz de yeso y fibras de polipropileno procedentes de toallitas húmedas recicladas no degradables, la mejora significativa de las propiedades mecánicas fue el resultado más notable<sup>47</sup>.

### **2.1.2. Residuo de polietileno (PE)**

El estudio de la incorporación de residuo de polietileno procedente de redes de pesca en matrices de yeso demostró un comportamiento similar al de otras fibras sintéticas de bajo modulo, destacando la ductilidad que proporcionó al material tras su fractura<sup>48</sup>.

### **2.1.3. Residuo de poliestireno extruido (XPS) y expandido (EPS)**

El Grupo de Investigación de Tecnología Edificatoria y Medio Ambiente (GITECA) de la Universidad Politécnica de Madrid desarrolló una línea de trabajo sobre yesos aligerados con residuo de poliestireno extruido (XPS) procedente de RCDs. Los resultados mostraron un mejor rendimiento térmico y una reducción de la densidad y de las prestaciones mecánicas<sup>49</sup>. En consecuencia, se estudió la incorporación de fibras y aditivos a dicha matriz, lo que resultó finalmente en una mejora

---

<sup>47</sup> Romero-Gómez, M. I., Pedreño-Rojas, M. A., Pérez-Gálvez, F., & Rubio-de-Hita, P. (2021). Characterization of gypsum composites with polypropylene fibers from non-degradable wet wipes. *Journal of Building Engineering*, 34, 101874. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101874>

<sup>48</sup> Bertelsen, I. M. G., & Ottosen, L. M. (2021). Recycling of Waste Polyethylene Fishing Nets as Fibre Reinforcement in Gypsum-based Materials. *Fibers and Polymers*. <https://doi.org/10.1007/s12221-021-9760-3>

<sup>49</sup> San-Antonio-González, A., Del Río Merino, M., Viñas Arrebola, C., & Villoria-Sáez, P. (2015). Lightweight material made with gypsum and extruded polystyrene waste with enhanced thermal behaviour. *Construction and Building Materials*, 93, 57–63. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2015.05.040>

del comportamiento mecánico<sup>50</sup>. La incorporación de residuos cerámicos junto con XPS en una matriz de yeso redujo la absorción de agua por capilaridad y mejoró la dureza superficial y la adherencia<sup>51</sup>.

Otra de las rutas analizadas por GITECA estudiaba la viabilidad de agregar residuo de poliestireno extruido (XPS) y residuo de poliestireno expandido (EPS) en compuestos de yeso. Los mejores resultados se observaron en aquellos que contenían mezcla de ambos desechos<sup>52</sup>. La conductividad térmica se redujo con respecto a la del material de referencia, la mezcla de yeso con EPS reciclado obtuvo el menor valor, seguida del compuesto con residuo del XPS<sup>53</sup>.

#### 2.1.4. Residuo de poliamida

S. Gutiérrez-González estudió el comportamiento de agregados de residuos de poliamida en mezclas de yeso. Los resultados mostraron un descenso de la densidad y de las propiedades mecánicas y un aumento de la permeabilidad y de la resistencia térmica. La poliamida reciclada contribuyó de forma directa en la fluidez de la pasta<sup>54,55</sup>.

---

<sup>50</sup> San-Antonio-González, A., Del Río Merino, M., Viñas Arrebola, C., & Villoria-Sáez, P. (2015). Lightweight material made with gypsum and EPS waste with enhanced mechanical strength. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943)

<sup>51</sup> del Río Merino, M., Santa Cruz Astorqui, J., Villoria Sáez, P., Santos Jiménez, R., & González Cortina, M. (2018). Eco plaster mortars with addition of waste for high hardness coatings. *Construction and Building Materials*, 158, 649–656. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2017.10.037>

<sup>52</sup> del Río Merino, M., Villoria Sáez, P., Longobardi, I., Santa Cruz Astorqui, J., & Porras-Amores, C. (2019). Redesigning lightweight gypsum with mixes of polystyrene waste from construction and demolition waste. *Journal of Cleaner Production*, 220, 144–151. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2019.02.132>

<sup>53</sup> Porras-Amores, C., Astorqui, J. S. C., Del Río Merino, M., Villoria-Sáez, P., & Arrebola, C. V. (2019). Thermal behavior of traditional lightweight gypsum with construction and demolition waste materials. *Dyna (Spain)*, 94(4). <https://doi.org/10.6036/8983>

<sup>54</sup> Gutiérrez-González, S., Gadea, J., Rodríguez, A., Blanco-Varela, M. T., & Calderón, V. (2012). Compatibility between gypsum and polyamide powder waste to produce lightweight plaster with enhanced thermal properties. *Construction and Building Materials*, 34, 179–185. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2012.02.061>

<sup>55</sup> Gutiérrez-González, S., Alonso, M. M., Gadea, J., Rodríguez, A., & Calderón, V. (2013). Rheological behaviour of gypsum plaster pastes with polyamide powder

### 2.1.5. Residuo de policarbonato

Se han desarrollado nuevas iniciativas de reciclaje como el uso de residuo de policarbonato procedente de CDs y DVDs en mezclas de yeso. Los resultados notificaron un descenso de la densidad y de la conductividad térmica a medida que aumentaba la presencia de policarbonato. Los valores obtenidos en los ensayos de resistencias a flexión y compresión eran favorables para una dosificación de residuo del 5-10% y una granulometría inferior a 4 mm<sup>56</sup>.

### 2.1.6. Residuo de caucho

Varias investigaciones han analizado la incorporación de caucho procedente del aislamiento de tuberías en mezclas de yeso. Se apreció la viabilidad del nuevo material caracterizado por su baja densidad<sup>57</sup>.

Otros estudios analizaron el residuo de caucho procedente de neumáticos reciclados, cuyos resultados confirmaron la disminución de la densidad del producto y la mejora de las propiedades tanto térmicas como acústicas<sup>58,59</sup>. Con el propósito de mejorar su rendimiento mecánico, se incorporó el caucho reciclado en forma de fibra<sup>60</sup>, sin

---

wastes. *Construction and Building Materials*, 38, 407–412. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2012.08.034>

<sup>56</sup> Pedreño-Rojas, M. A., Rodríguez-Liñán, C., Flores-Colen, I., & de Brito, J. (2020). Use of polycarbonate waste as aggregate in recycled gypsum plasters. *Materials*, 13(14). <https://doi.org/10.3390/ma13143042>

<sup>57</sup> Jiménez Rivero, A., De Guzmán Báez, A., & Navarro, J. G. (2014). New composite gypsum plaster – ground waste rubber coming from pipe foam insulation. *Construction and Building Materials*, 55, 146–152. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2014.01.027>

<sup>58</sup> Serna, Á., Del Río, M., Palomo, J. G., & González, M. (2012). Improvement of gypsum plaster strain capacity by the addition of rubber particles from recycled tyres. *Construction and Building Materials*, 35, 633–641. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2012.04.093>

<sup>59</sup> López-Zaldívar, O., Lozano-Díez, R., Herrero del Cura, S., Mayor-Lobo, P., & Hernández-Olivares, F. (2017). Effects of water absorption on the microstructure of plaster with end-of-life fire rubber mortars. *Construction and Building Materials*, 150, 558–567. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2017.06.014>

<sup>60</sup> Lozano-Díez, R. V., López-Zaldívar, O., Herrero-Del-Cura, S., Mayor-Lobo, P., & Hernández-Olivares, F. (2019). Influence of the addition of rubber fibers from end-

embargo, los resultados no fueron los esperados. En consecuencia, se estudió la incorporación de fibras de carbono a la matriz inicial de yeso y caucho reciclado, lo que sí mejoró significativamente el desempeño mecánico<sup>61</sup>.

## 2.2. Residuo de poliuretano incorporado en materiales de construcción

El poliuretano es un material empleado con frecuencia en el sector de la construcción en labores de aislamiento, impermeabilización, sellante, etc.

No obstante, en esta sección se incluyen las investigaciones que analizan su incorporación en forma de residuo, una vez finalizado su ciclo de vida.

### 2.2.1. Residuo de poliuretano incorporado en betún

Los asfaltos modificados con polímeros han demostrado que mejoran el rendimiento de los pavimentos asfálticos tradicionales<sup>62</sup>. Aquellos que contienen poliuretano mostraron un mejor comportamiento frente al deshielo y anti hielo, así como, buenas propiedades mecánicas, estabilidad, durabilidad y resistencia a la fatiga<sup>63</sup>.

Recientes investigaciones estudiaron la incorporación de polímeros reciclados en este tipo de productos. Los primeros resultados obtenidos demostraron la idoneidad de calentar dicho polímero previo a la mezcla, también notificaron una reducción de la densidad y de la deformación

---

of-life tires on plaster mortars. Study of mechanical, thermal and acoustic properties. *Dyna (Spain)*, 94(4), 460–464. <https://doi.org/10.6036/9020>

<sup>61</sup> Lozano-Díez, R. V., López-Zaldívar, Ó., Herrero-Del-Cura, S., Mayor-Lobo, P., & Hernández-Olivares, F. (2021). Mechanical behavior of plaster composites based on rubber particles from end-of-Life tires reinforced with carbon fibers. *Materials*. <https://doi.org/10.3390/ma14143979>

<sup>62</sup> Becker, Y., Méndez, M. P., & Rodríguez, Y. (2001). Polymer modified asphalt | Asfaltos modificados con polímeros. *Vision Tecnológica*, 9(1), 39–50.

<sup>63</sup> Cong, L., Yang, F., Guo, G., Ren, M., Shi, J., & Tan, L. (2019). The use of polyurethane for asphalt pavement engineering applications: A state-of-the-art review. *Construction and Building Materials*, 225, 1012–1025. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2019.07.213>

del conjunto<sup>64</sup>. Por otro lado, se concluyó que los betunes que incorporaban un 4% de residuo obtenían los mejores resultados en cuanto a la reducción de la deformación y aumento de la estabilidad, sin embargo, se observó un mayor número de huecos, lo que podría dar lugar a un peor envejecimiento<sup>65</sup>.

### 2.2.2. Residuo de poliuretano incorporado en hormigón

En cuanto a la incorporación de poliuretano reciclado en compuestos de hormigón, las primeras investigaciones confirmaron que se trata de una solución viable. El poliuretano influyó en el producto final reduciendo su densidad, conductividad térmica y resistencia mecánica y aumentando su porosidad y retracción por secado<sup>66,67</sup>.

Investigaciones posteriores confirmaron la mejora en el comportamiento térmico de bloques de hormigón con residuo de poliuretano en forma de pellet<sup>68</sup>.

---

<sup>64</sup> Gutiérrez-González, S., Calderón, V., Rodríguez, A., Gadea, J., Junco, C., & Santamaría-Vicario, I. (2017). Characterization of Hot Bituminous-Asphalt Mixtures with Recycled Polyurethane Foam. *The Open Construction and Building Technology Journal*, 11(1), 343–349. <https://doi.org/10.2174/1874836801711010343>

<sup>65</sup> Salas, M. Á., Pérez-Acebo, H., Calderón, V., & Gonzalo-Orden, H. (2018). Bitumen modified with recycled polyurethane foam for employment in hot mix asphalt. *Ingeniería e Investigación*, 38(1), 60–66. <https://doi.org/10.15446/ing.investig.v38n1.65631>

<sup>66</sup> Ben Fraj, A., Kismi, M., & Mounanga, P. (2010). Valorization of coarse rigid polyurethane foam waste in lightweight aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 24(6), 1069–1077. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2009.11.010>

<sup>67</sup> Wang, G., Liu, Y. Q., & Cui, Y. (2012). Performance Studies of Lightweight Concrete Mixtures Made with Rigid Polyurethane Foam Wastes. *Applied Mechanics and Materials*, 204–208, 4007–4010. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.204-208.4007>

<sup>68</sup> González Díaz, E., Jaizme Vega, E., Jubera Pérez, J., Torres Betancort, M. E., & Sánchez Fajardo, V. (2019). Incorporation of the polyurethane pellet waste for the improvement of the thermal insulation of nonstructural concrete blocks. *Dyna (Spain)*, 94(4). <https://doi.org/10.6036/8985>



### 2.2.3. Residuo de poliuretano incorporado en mortero de cemento

Estudios preliminares observaron un prometedor comportamiento térmico de los morteros de cemento con residuos de poliuretano<sup>69</sup>, esta pasta aligerada se caracterizaba por tener una menor densidad y un rendimiento mecánico aceptable<sup>70</sup>.

El Grupo de Investigación de Ingeniería de Edificación (GIE) de la Universidad de Burgos estudió el diseño de diversos materiales de construcción en cuya matriz se incorporaban residuos poliméricos en sustitución de arena, entre los que se analizó el residuo de poliuretano. Las investigaciones concluyeron que el material resultante era comparable con un mortero aligerado tradicional y con una durabilidad similar a las de las muestras de referencia<sup>71</sup>.

C. Junco evaluó los morteros de cemento con poliuretano reciclado, abarcando desde su obtención, hasta su caracterización y puesta en obra<sup>72</sup>. El ensayo de resistencia a fatiga demostró la capacidad de estos morteros de soportar ciclos de carga y descarga similares a los que soportaban los morteros de albañilería<sup>73</sup>.

---

<sup>69</sup> Corinaldesi, V., Mazzoli, A., & Moriconi, G. (2011). Mechanical behaviour and thermal conductivity of mortars containing waste rubber particles. *Materials & Design*, 32(3), 1646–1650. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.10.013>

<sup>70</sup> Kismi, M., & Mounanga, P. (2012). Comparison of short and long-term performances of lightweight aggregate mortars made with polyurethane foam waste and expanded polystyrene beads. *Comparaison performantielle à court et à long termes de mortiers légers à base de déchets de mousse de polyuréthane rigide et de billes de polystyrène expansé*. EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20120201019>

<sup>71</sup> Junco, C. (2012). Morteros aligerados con residuos de espumas rígidas de poliuretano. Obtención, caracterización y puesta en obra. Tesis Doctoral, Universidad de Burgos.

<sup>72</sup> Junco, C., Gadea, J., Rodríguez, A., Gutiérrez-González, S., & Calderón, V. (2012). Durability of lightweight masonry mortars made with white recycled polyurethane foam. *Cement and Concrete Composites*, 34(10), 1174–1179. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2012.07.006>

<sup>73</sup> Junco, C., Rodríguez, A., Calderón, V., Muñoz-Rupérez, C., & Gutiérrez-González, S. (2018). Fatigue durability test of mortars incorporating polyurethane foam wastes. *Construction and Building Materials*, 190, 373–381. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.09.161>

R. Arroyo buscó mejorar los morteros aligerados con residuo de poliuretano incorporando en su matriz gérmenes de afwillita y/o aditivos iónicos surfactantes<sup>74</sup>.

Diferentes combinaciones de residuos poliméricos, entre los que se encuentra el poliuretano, se incorporaron en matrices de mortero de cemento. De forma general, se notificó la disminución de la densidad y resistencias mecánicas, y un aumento de la resistencia térmica y de la absorción de agua, todo ello relacionado con el aumento de la porosidad que el poliuretano proporcionó a la mezcla<sup>75,76</sup>.

#### **2.2.4. Residuo de poliuretano incorporado en mezclas de yeso**

Las primeras investigaciones concluyeron que la introducción de poliuretano reciclado en mezclas de yeso suponía un descenso de la densidad y del desempeño mecánico y un aumento de la resistencia térmica<sup>77</sup>. Un segundo estudio concluía que el residuo de poliuretano precisaba de una mayor relación agua-conglomerante, relacionado con un de fraguado de la pasta más tardío. La permeabilidad al valor y la absorción de agua por inmersión y por capilaridad aumentaban<sup>78</sup>.

Otros investigadores compararon diferentes compuestos de yeso con agregados ligeros, entre los que se encontraba el residuo de

---

<sup>74</sup> Arroyo R. (2017). Addition of new polymer-based and mineral-based fillers in mortars. Influence of polyurethane and afwillite on the microstructure and final properties. Tesis Doctoral, Universidad de Burgos.

<sup>75</sup> Gregorová, V., Štefunková, Z., & Ledererová, M. (2020). Experimental Study of the Recycled plastic aggregate lightweight composites based on different kinds of binder. *Key Engineering Materials*, 868, 32–38. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.868.32>

<sup>76</sup> Dima, C., Bădănoiu, A., & Nicoară, A. I. (2020). Properties of cement-based composites with chopped electrical cables and polyurethane wastes. *UPB Scientific Bulletin, Series B: Chemistry and Materials Science*, 82(4 Series A), 63–72.

<sup>77</sup> Gutiérrez-González, S., Gadea, J., Rodríguez, A., Junco, C., & Calderón, V. (2012). Lightweight plaster materials with enhanced thermal properties made with polyurethane foam wastes. *Construction and Building Materials*, 28(1), 653–658. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.10.055>

<sup>78</sup> Santamaría Vicario, I., Alameda Cuenca-Romero, L., Gutiérrez González, S., Calderón Carpintero, V., & Rodríguez Saiz, Á. (2020). Design and characterization of gypsum mortars dosed with polyurethane foam waste PFW. *Materials*, 13(7). <https://doi.org/10.3390/ma13071497>

espuma de poliuretano, el cual mostró el mejor comportamiento térmico, sin embargo, se observó una baja resistencia mecánica, aunque suficiente para su uso en construcción, y una baja adherencia<sup>79</sup>.

### 2.3. Prefabricados con residuos poliméricos

La presente tesis doctoral desarrolla un material de construcción alternativo que consiste en un prefabricado de yeso en cuya matriz se incorpora residuo de poliuretano.

Se incluye una búsqueda bibliográfica acerca de la incorporación de poliuretano reciclado como agregado en diferentes prefabricados.

#### 2.3.1. Prefabricado de cemento con residuo de poliuretano

Otras investigaciones evaluaron positivamente el comportamiento de un panel prefabricado de cemento ecológico que incorpora residuos de escoria y residuos de espuma de poliuretano al mismo tiempo, procedentes de la fabricación de cámaras frigoríficas<sup>80</sup>.

Los bloques prefabricados de cemento con residuo de poliuretano corroboraron que aumentar el porcentaje de residuo en la mezcla supuso un descenso progresivo de la densidad y un aumento de la resistencia térmica<sup>81</sup>, además mostraron un buen comportamiento frente al fuego y las propiedades mecánicas se mantenían gracias a la incorporación de aditivos<sup>82</sup>.

---

<sup>79</sup> Tian, X., Liu, D., & Zhao, F. (2020). Preparation and properties of solid waste based lightweight plastering gypsum. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 768(2). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/768/2/022048>

<sup>80</sup> Briones-Llorente, R., Calderón, V., Gutiérrez-González, S., Montero, E., & Rodríguez, Á. (2019). Testing of the integrated energy behavior of sustainable improved mortar panels with recycled additives by means of energy simulation. *Sustainability (Switzerland)*, 11(11). <https://doi.org/10.3390/su11113117>

<sup>81</sup> Briga-Sá, A., Neiva, V., Leitão, D., Miranda, T., & Cristelo, N. (2021). Thermal Performance of Compressed Blocks Made from Construction and Polyurethane Foam Waste. In *RILEM Bookseries* (Vol. 35, pp. 225–236). [https://doi.org/10.1007/978-3-030-76543-9\\_21](https://doi.org/10.1007/978-3-030-76543-9_21)

<sup>82</sup> Alameda Cuenca-Romero, L., Arroyo, R., Alonso, Á., Gutiérrez-González, S., & Calderón, V. (2022). Characterization properties and fire behaviour of cement

### 2.3.2. Prefabricados de yeso con residuo de poliuretano

L. Alameda, en su tesis doctoral, realizó un estudio detallado acerca de la incorporación de residuos industriales poliméricos (poliamida y poliuretano) en placas de yeso, previa selección de las dosificaciones más favorables. Además, se contempló la incorporación de fibras de polipropileno en las placas de yeso con el fin de mejorar las prestaciones mecánicas, se simuló la puesta en obra del material y se llevó a cabo un estudio económico y de reciclado del prefabricado. Los resultados confirmaron la viabilidad prestacional y comercial del producto que incorpora residuo de poliuretano, así como la posibilidad de reciclaje<sup>83,84</sup>.

### 2.3.3. Prefabricados de yeso con otros tipos de residuos poliméricos

A. Vidales-Barriguete investigó el comportamiento de un prefabricado tipo placa en cuya matriz se incorpora yeso y residuo polimérico de tipo termoestable y termoplástico procedente de cables. Los resultados obtenidos destacaron la elasticidad de las placas y la reducción de la conductividad térmica<sup>85</sup>, además la presencia de yeso, dado su carácter no inflamable, mejoró el comportamiento al fuego de los residuos poliméricos<sup>86</sup>.

---

blocks with recycled polyurethane roof wastes. *Journal of Building Engineering*, 50. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104075>

<sup>83</sup> Alameda L. (2015). Placas de yeso laminado aligeradas con residuos poliméricos reforzadas con fibras de polipropileno. Fabricación y puesta en obra. Tesis Doctoral, Universidad de Burgos.

<sup>84</sup> Alameda, L., Calderón, V., Junco, C., Rodríguez, A., Gadea, J., & Gutiérrez-González, S. (2016). Characterization of gypsum plasterboard with polyurethane foam waste reinforced with polypropylene fibers. *Materiales de Construcción*, 66(324). <https://doi.org/10.3989/mc.2016.06015>

<sup>85</sup> Vidales-Barriguete, A., Santa-Cruz-Astorqui, J., Piña-Ramírez, C., Kosior-Kazberuk, M., Kalinowska-Wichrowska, K., & Atanes-Sánchez, E. (2021). Study of the mechanical and physical behavior of gypsum boards with plastic cable waste aggregates and their application to construction panels. *Materials*, 14(9). <https://doi.org/10.3390/ma14092255>

<sup>86</sup> Vidales-Barriguete, A., Piña-Ramírez, C., Serrano-Somolinos, R., del Río-Merino, M., & Atanes-Sánchez, E. (2021). Behavior resulting from fire in plasterboard with

P. Villoria desarrolló un bloque de yeso con residuo cerámico y EPS en su composición. Su resistencia a compresión era superior a la de un bloque de yeso hueco tradicional y presentaba una menor densidad<sup>87</sup>. También se estudió la incorporación única de EPS reciclado, no obstante, la rigidez del producto no era la esperada<sup>88</sup>.

Otros estudios compararon una placa de yeso estándar con una placa de yeso que incorporaba residuos de poliestireno expandido (EPS) y fibra de celulosa. La nueva placa presentaba una mejora significativa del comportamiento térmico debido a la adición de EPS y de las prestaciones mecánicas, debido al agregado de fibra de celulosa<sup>89</sup>.

M. Pedreño-Rojas, en su investigación, empleó residuos de policarbonato, de diferentes tamaños, procedentes de CDs y DVDs en placas de yeso y concluyó que este desecho suponía una disminución en el peso en el prefabricado, que la resistencia a flexión mejoraba con la combinación de tamaños de residuo y que la conductividad térmica disminuía en relación a la cantidad de policarbonato<sup>90</sup>.

---

plastic cable waste aggregates. *Journal of Building Engineering*, 40, 102293. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102293>

<sup>87</sup> Villoria Sáez, P., del Río Merino, M., Sorrentino, M., Amores, C. P., Santa Cruz Astorqui, J., & Viñas Arrebola, C. (2020). Mechanical characterization of gypsum composites containing inert and insulation materials from construction and demolition waste and further application as a gypsum block. *Materials*, 13(1). <https://doi.org/10.3390/ma13010193>

<sup>88</sup> Santa Cruz Astorqui, J., Del Río Merino, M., Villoria Sáez, P., & Porras Amores, C. (2019). Analysis of the viability of prefabricated elements for partitions manufactured with plaster and eps from waste recycling. *Dyna (Spain)*, 94(4). <https://doi.org/10.6036/8984>

<sup>89</sup> de Oliveira, K. A., Oliveira, C. A. B., & Molina, J. C. (2021). Lightweight recycled gypsum with residues of expanded polystyrene and cellulose fiber to improve thermal properties of gypsum. *Materiales de Construcción*, 71(341). <https://doi.org/10.3989/MC.2021.07520>

<sup>90</sup> Pedreño-Rojas, M. A., Morales-Conde, M. J., Pérez-Gálvez, F., & Rubio-de-Hita, P. (2020). Reuse of CD and DVD wastes as reinforcement in gypsum plaster plates. *Materials*, 13(4). <https://doi.org/10.3390/ma13040989>

## 2.4. Análisis de la sostenibilidad de materiales de construcción con residuos poliméricos

El análisis de la sostenibilidad es un tema de reciente consideración, el número de referencias encontradas en la búsqueda bibliográfica es limitado.

Del estudio ambiental de diferentes agregados en pastas de yeso se concluyó que el residuo de poliuretano triturado presentaba el menor consumo de energía y de emisiones de CO<sub>2</sub>, no obstante, de entre los componentes considerados era el único clasificado como residuo<sup>91</sup>.

Investigaciones acerca del hormigón con residuo de poliuretano mostraron que éste era más respetuoso con el medioambiente que el hormigón tradicional y se redujo el depósito de residuos sólidos en vertedero<sup>92</sup>.

Por otra parte, se analizó el desempeño ambiental de mezclas de yeso con residuo de policarbonato, cuyo rendimiento era superior al de la muestra de referencia. El potencial de calentamiento global y la energía almacenada disminuyó a medida que aumentaba la proporción de material reciclado en la mezcla<sup>93</sup>.

Los únicos análisis de sostenibilidad de productos de yeso que incluyen residuos poliméricos o de componentes de estas mezclas se refieren al aspecto ambiental. Por esta razón, cobra aún más importancia y relevancia incluir la evaluación del desarrollo sostenible en la investigación realizada.

---

<sup>91</sup> Doleželová, M., Scheinherrová, L., Krejsová, J., Keppert, M., Černý, R., & Vimrová, A. (2021). Investigation of gypsum composites with different lightweight fillers. *Construction and Building Materials*, 297, 123791. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123791>

<sup>92</sup> Attanasio, A., Largo, A., Alvarez, I. L., Sonzogni, F., & Balaceanu, L. (2015). Sustainable aggregates from secondary materials for innovative lightweight concrete products. *Heron*, 60(1–2), 5–25.

<sup>93</sup> Pedreño-Rojas, M. A., Morales-Conde, M. J., Pérez-Gálvez, F., & Rubio-de-Hita, P. (2019). Influence of polycarbonate waste on gypsum composites: Mechanical and environmental study. *Journal of Cleaner Production*, 218(2019), 21–37. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.200>

# Justificación de la investigación

# 03





## CAPÍTULO 3. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

El tema seleccionado aborda el análisis y estudio de un nuevo material de construcción teniendo en cuenta la problemática climática y energética actual, así como las políticas medioambientales generales y de aplicación en el sector de la construcción.

El producto analizado consiste en una placa de escayola que incluye residuo de poliuretano en su composición y cuya función es la de revestimiento de techos suspendidos y desmontables en estancias interiores. Su desarrollo contribuye a la reducción de la explotación del mineral de yeso y al descenso de la cantidad de desechos poliméricos en vertederos.

Por otro lado, se estima una reducción de la huella ambiental del nuevo modelo con respecto al tradicional, motivada por la inclusión del residuo de poliuretano en sustitución de conglomerante.

Los prefabricados a base de yeso presentan ciertas ventajas frente a las pastas, entre las que destaca su posibilidad de montaje y desmontaje, al margen del resto de materiales de la obra, pudiéndose gestionar por separado en las etapas de demolición, lo que mejora su reciclabilidad.

El poliuretano reciclado, por su parte, proporciona al nuevo modelo ligereza y propiedades aislantes destacadas, de las que deriva un mejor confort térmico. En caso de que la placa pertenezca a la envolvente térmica del edificio, la eficiencia energética de éste podría verse beneficiada.

Las directrices ambientales europeas promocionan la vivienda sostenible, por lo que es preciso la creación de un mercado de materiales de construcción respetuosos con el medio ambiente y económicamente competitivos. La diferenciación de los productos ecológicos en el mercado resulta esencial y mejora su competitividad de cara a un consumidor cada vez más concienciado sobre la problemática ambiental.

La investigación desarrollada en la presente tesis doctoral pretende contribuir a la ampliación de la oferta de productos sostenibles de uso en

edificación con un prefabricado de yeso innovador resultado de una investigación responsable.

# Objetivos

04



## CAPÍTULO 4. OBJETIVOS

En esta investigación se pretende el fomento la economía circular a través de la cultura de reaprovechamiento y reutilización en la que los desechos constituyen nuevos recursos aptos para su incorporación en múltiples procesos industriales, evitando así su deposición en el medio ambiente. De forma específica, se pretende ampliar la oferta de materiales de construcción sostenibles disponibles en el mercado, mejorar los sistemas de gestión de residuos de tipo polimérico y reducir la explotación de recursos naturales limitados como el yeso o el agua.

Se detalla el propósito general, así como varias metas de menor envergadura agrupadas según la fase del plan de trabajo establecido.

### 4.1. Objetivo principal

El objetivo prioritario de esta investigación es **el estudio de la incorporación de residuo de poliuretano en mezclas de yeso para su implementación a nivel industrial** en la fabricación de placas de escayola de techo suspendido y desmontable.

Entre las medidas a llevar a cabo destacan la puesta en obra en edificaciones de diferente tipología y la evaluación del desempeño ambiental y económico.

### 4.2. Objetivos específicos

Los objetivos específicos se organizan en fases según el avance lógico de la investigación.

La **fase experimental** tiene como propósito determinar la mezcla a replicar a nivel industrial. Los objetivos específicos de esta etapa son:

- Caracterización de las materias primas.
- Fabricación de mezclas de yeso con poliuretano reciclado. Estudio de la incorporación de fibra de vidrio y aditivo. Caracterización de las propiedades físicas, mecánicas y químicas.
- Determinación de la dosificación adecuada.

- Caracterización de mezclas de yeso con el resto de residuos de poliuretano, según la proporción óptima establecida. Se evalúan las propiedades físicas, mecánicas, químicas, microscópicas, higroscópicas y térmicas. Se incluye un análisis ambiental.
- Selección de la mezcla para ser replicada a escala industrial.

La segunda etapa de la investigación comprende la **fase de industrialización** cuyo propósito es la fabricación de un nuevo prefabricado con poliuretano reciclado apto para comercializarse como un material de construcción sostenible. Los objetivos son:

- Estudio y adaptación de la actual línea de producción industrial para la incorporación de poliuretano reciclado como materia prima.
- Fabricación a nivel industrial de la placa de escayola con residuo de poliuretano según la mezcla y dosificación establecida en la fase experimental.
- Caracterización física, mecánica, química, microscópica, higroscópica, térmica y acústica del nuevo prefabricado.
- Obtención del marcado CE.

La tercera etapa del estudio comprende la **fase de puesta en obra**, cuyo fin es la instalación de las placas de escayola con poliuretano reciclado en edificios piloto y la monitorización de los espacios para evaluar su funcionalidad y aptitud.

La **fase de evaluación de la sostenibilidad** del nuevo producto busca analizar el desempeño ambiental, a través de la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV), y el rendimiento económico, a través de la metodología de Análisis del Coste del Ciclo de Vida (CCV). Se establece como prioridad la obtención de un etiquetado ecológico.

Por último, en la **fase de evaluación de la circularidad de la investigación** se analizan las alternativas de gestión posibles en la fase de fin de vida del nuevo modelo de prefabricado desarrollado.

# Metodología

05

the same time, the fact that the two countries have similar political systems and similar political culture may have contributed to the similar results.

It is interesting to note that the results of the present study are similar to those of the study by Wong and Chan (2001) on the political participation of Hong Kong citizens.

There are some limitations to the present study. First, the sample size is small. Second, the data are self-reported and may be subject to recall bias.

There are some implications for future research. First, it would be interesting to see if the results of the present study hold for other countries.

Second, it would be interesting to see if the results of the present study hold for other political systems.

Third, it would be interesting to see if the results of the present study hold for other political cultures.

Fourth, it would be interesting to see if the results of the present study hold for other political systems and political cultures.

Fifth, it would be interesting to see if the results of the present study hold for other political systems and political cultures.

Sixth, it would be interesting to see if the results of the present study hold for other political systems and political cultures.

Seventh, it would be interesting to see if the results of the present study hold for other political systems and political cultures.

Eighth, it would be interesting to see if the results of the present study hold for other political systems and political cultures.

Ninth, it would be interesting to see if the results of the present study hold for other political systems and political cultures.

Tenth, it would be interesting to see if the results of the present study hold for other political systems and political cultures.

Eleventh, it would be interesting to see if the results of the present study hold for other political systems and political cultures.

Twelfth, it would be interesting to see if the results of the present study hold for other political systems and political cultures.

Thirteenth, it would be interesting to see if the results of the present study hold for other political systems and political cultures.

Fourteenth, it would be interesting to see if the results of the present study hold for other political systems and political cultures.

Fifteenth, it would be interesting to see if the results of the present study hold for other political systems and political cultures.

Sixteenth, it would be interesting to see if the results of the present study hold for other political systems and political cultures.

Seventeenth, it would be interesting to see if the results of the present study hold for other political systems and political cultures.

Eighteenth, it would be interesting to see if the results of the present study hold for other political systems and political cultures.

Nineteenth, it would be interesting to see if the results of the present study hold for other political systems and political cultures.

Twentieth, it would be interesting to see if the results of the present study hold for other political systems and political cultures.



## CAPÍTULO 5. METODOLOGÍA

En este apartado se describen el procedimiento seguido para el desarrollo de esta investigación y la metodología empleada en la caracterización y análisis de los diferentes materiales.

### 5.1. Plan de trabajo

El programa de trabajo se organiza según las fases establecidas para la consecución de los objetivos de la investigación (Figura 5.1).

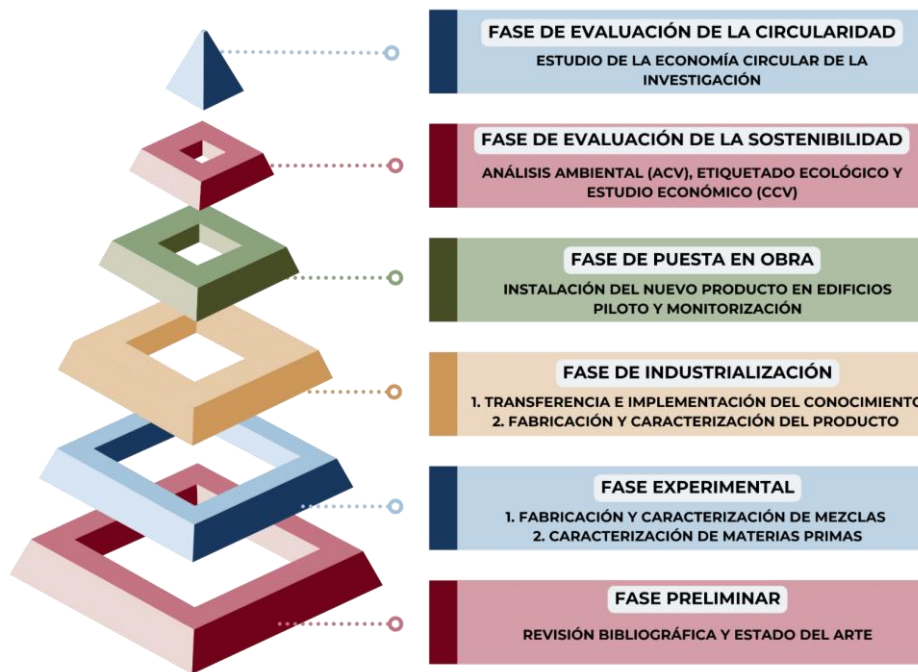


Figura 5.1. Esquema del plan de trabajo

En una **fase preliminar** se procede con el análisis del marco teórico y de la bibliografía al respecto de la situación ambiental actual, con especial atención al sector de la construcción y al de los polímeros, analizando las diferentes posibilidades y campos de actuación.

El análisis del estado del arte proporciona la información y conocimiento necesarios acerca del progreso realizado hasta la fecha en el desarrollo de productos de construcción sostenibles que incorporan residuos poliméricos.

Una vez justificado el área de acción y establecidos los objetivos, se procede con la **fase experimental** que se divide en dos subetapas.

La primera subetapa consiste en la caracterización de las materias primas empleadas en la investigación. Los materiales analizados son escayola, diferentes tipos de residuo de poliuretano, fibra de vidrio, aditivo y agua.

La segunda subetapa comprende la fabricación de múltiples dosificaciones de yeso con diferentes poliuretanos reciclados. Se analizan las propiedades de las mezclas elaboradas con el fin de determinar aquella con mejor rendimiento global para su replicación a nivel industrial.

El estudio continúa con la **fase de industrialización** que nuevamente se divide en dos subetapas.

Esta fase comienza con la transferencia e implementación del conocimiento adquirido en la fase experimental al proceso de fabricación del producto a escala industrial. Comprende las adaptaciones necesarias en la planta para la elaboración nuevo del prefabricado.

Posteriormente, se procede con la fabricación y evaluación de las prestaciones de la nueva placa de escayola con residuo de poliuretano.

Una tercera etapa comprende la **fase de puesta en obra**. Se pretende la instalación del nuevo modelo de prefabricado en varias edificaciones piloto, analizando y monitorizando su funcionalidad y aptitud.

En la **fase de evaluación de la sostenibilidad del producto** se lleva a cabo un análisis ambiental, a través de la metodología de ACV, con el propósito de obtener un etiquetado ecológico. La evaluación del desempeño económico se realiza con la metodología de CCV.

Por último, la **fase de evaluación de la circularidad** estudia las alternativas de reciclaje de la nueva tecnología desarrollada con el propósito de fomentar la economía circular de la investigación una vez haya alcanzado éste el final de su vida útil.

## 5.2. Caracterización

En este apartado se describen los ensayos dirigidos a determinar las diferentes propiedades de los materiales en estudio.

En la Tabla 5.1 se especifican los ensayos realizados en las materias primas, las mezclas y el prefabricado en forma de placa. Los ensayos se agrupan por tipologías según la naturaleza de la propiedad a analizar.

	Materias primas	Mezclas	Placa
<b>Caracterización física</b>			
Densidad aparente	X	X	X
Densidad real	X	-	-
Granulometría por difracción láser	X	-	-
Adsorción física de gases	-	X	-
Conductividad térmica	-	X	X
Colorimetría	-	X	-
Viscosidad aparente	X	-	-
<b>Caracterización mecánica</b>			
Resistencia a flexión	-	X	X
Resistencia a compresión	-	X	-
Dureza Shore C	-	X	X
Adherencia	-	X	-
Deformación bajo carga	-	-	X
<b>Caracterización química</b>			
Análisis elemental (CHNS)	X	-	X
Lixiviación	X	-	-
Principio de fraguado	-	X	-
<b>Caracterización microscópica</b>			
M. Electrónica de Barrido (MEB)	X	X	X
Tomografía Axial Comput. (TAC)	X	X	X
<b>Caracterización higroscópica</b>			
Acumulación de agua	-	X	-
Absorción de agua por inmersión	X	X	X
Absorción de agua por capilaridad	-	X	-
Permeabilidad vapor	-	X	-
Curva de adsorción higroscópica	-	X	-
<b>Caracterización térmica</b>			
Termogravimetría (TGA)	X	X	X
Reacción al fuego	-	X	X
<b>Caracterización acústica</b>			
Absorción acústica	-	-	X

Tabla 5.1. Esquema de los ensayos realizados en la caracterización de materias primas, mezclas y prefabricados en forma de placa

El análisis de las materias primas se desarrolla en el Capítulo 6 e incluye la caracterización física, química, microscópica, higroscópica y térmica.

Las mezclas de yeso con residuo de poliuretano se estudian en el Capítulo 7 y se evalúan las propiedades físicas, mecánicas, químicas, microscópicas, higroscópicas y térmicas de las diferentes dosificaciones.

El estudio de la placa de yeso con residuo de poliuretano fabricada a nivel industrial se describe en el Capítulo 8. Se incluye la caracterización física, mecánica, química, microscópica, higroscópica, térmica y acústica de este nuevo prefabricado.

### 5.2.1. Caracterización física

Se incluyen los ensayos dirigidos a determinar las propiedades físicas de los materiales objetos de estudio, siendo éstas la densidad aparente, la densidad real, la granulometría, la microporosidad y mesoporosidad, la conductividad térmica y la colorimetría.

#### 5.2.1.1. Densidad aparente

La densidad aparente es la relación entre la masa y el volumen aparente de un material (Ecuación 5.1). Su determinación varía según la naturaleza y geometría del producto a analizar. En esta investigación se han seguido las indicaciones recogidas en las normas UNE-EN 1097-3<sup>94</sup> y UNE-EN ISO 29470<sup>95</sup>, la primera de ellas relativa a áridos y la segunda a productos aislante térmicos para aplicaciones en la edificación.

$$\begin{array}{ccc} \rho_b = \frac{m_d}{V_b} & \rho_b = \frac{m_d}{V_s} & \rho_b = \frac{m_{c2} - m_{c1}}{V_b} \\ \text{a)} & \text{b)} & \text{c)} \end{array} \quad (\text{Ecuación 5.1})$$

---

<sup>94</sup> Asociación Española de Normalización (AENOR). (1998). 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.

<sup>95</sup> Asociación Española de Normalización (AENOR). (2021). UNE-EN ISO 29470 Productos aislantes térmicos para aplicaciones en la edificación. Determinación de la densidad aparente (ISO 29470:2020).

Donde:

$\rho_b$ : es la densidad aparente de la muestra ( $\text{Kg}/\text{m}^3$ );

$m_d$ : es la masa de la muestra seca ( $\text{Kg}$ );

$m_{c1}$ : es la masa inicial de la muestra triturada y seca ( $\text{Kg}$ );

$m_{c2}$ : es la masa final de la muestra triturada y seca ( $\text{Kg}$ );

$V_b$ : es el volumen aparente de la muestra ( $\text{m}^3$ );

$V_s$ : es el volumen del líquido desplazado por la masa ( $\text{m}^3$ );

El procedimiento operatorio habitual para determinar la densidad aparente de los residuos de poliuretano sin procesar y de las mezclas de yeso con polímero consiste en determinar su masa, con ayuda de una báscula, y su volumen, midiendo sus dimensiones brutas utilizando un calibre (Figura 5.2.a y b, y(Ecuación 5.1).a). La densidad aparente de los residuos poliméricos con geometría irregular se calcula empleando la balanza hidrostática (Figura 5.2.c y(Ecuación 5.1.b).

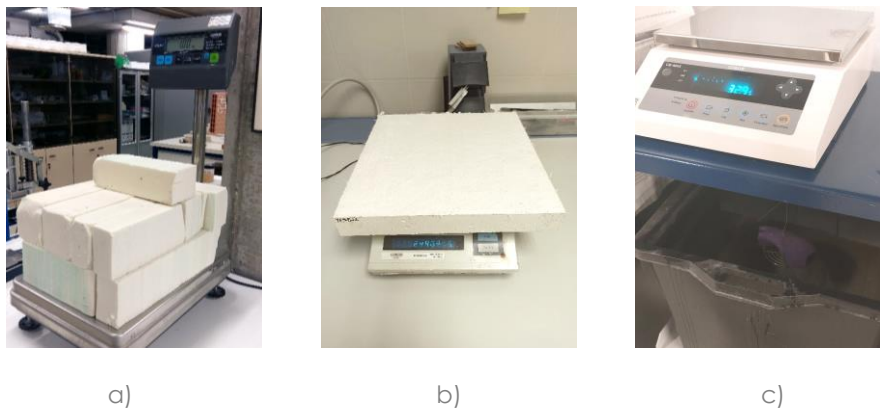


Figura 5.2. Procedimiento para determinar la densidad aparente de productos con geometría definida

Para determinar la densidad aparente de productos en polvo es preciso disponer de un recipiente de volumen conocido, en este caso se toma como referencia un recipiente de 1 litro de capacidad. En cuanto al peso de la muestra, se obtiene calculando la diferencia de peso entre el recipiente lleno con un litro de residuo y el mismo vacío (Figura 5.3 y (Ecuación 5.1.c).



Figura 5.3. Procedimiento para determinar la densidad aparente de productos en polvo

Esta metodología se aplica en las materias primas (yeso y residuos de poliuretano) tanto en su estado de recepción como tras el proceso de trituración, en las mezclas de yeso con polímero y en el prefabricado de yeso con residuo de poliuretano.

#### 5.2.1.2. Densidad real

La densidad real es la relación que existe entre la masa de la muestra seca y el volumen de la parte sólida, entendida ésta como la diferencia entre el volumen aparente y el volumen de huecos (poros abiertos y cerrados). Para su cálculo se adaptan las indicaciones relativas al método del picnómetro recogidas en la norma UNE-EN 1936<sup>96</sup>, en la que se tratan varios métodos de ensayo para piedra natural. La densidad real se calcula teniendo en cuenta la relación entre la masa de la muestra seca y triturada y el volumen de líquido desplazado (Ecuación 5.2).

$$\rho_r = \frac{m_e}{m_e + m_2 - m_1} \times \rho_{rh} \quad (\text{Ecuación 5.2})$$

Donde:

$\rho_r$ : es la densidad real de la muestra ( $\text{Kg}/\text{m}^3$ );

$m_e$ : es la masa de la muestra triturada y seca (g);

---

<sup>96</sup> Asociación Española de Normalización (AENOR). (2006). UNE-EN 1936 Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la densidad real y aparente y de la porosidad abierta y total.

$m_1$ : es la masa del picnómetro con alcohol isopropílico y residuo triturado (g);

$m_2$ : es la masa del picnómetro con alcohol isopropílico(g);

$\rho_{rh}$ : es la densidad del alcohol isopropílico ( $\text{Kg}/\text{m}^3$ ).

El procedimiento de ensayo consiste en triturar la sustancia a analizar hasta lograr un tamaño de partícula tal que pase por el tamiz de 0,063 mm. Se selecciona una muestra triturada y seca de 10 gramos ( $m_e$ ), se introduce en el picnómetro junto con alcohol isopropílico hasta llenarlo y se pesa el conjunto ( $m_1$ ). Por último, se vacía y limpia el equipo, se llena únicamente con alcohol isopropílico y se pesa ( $m_2$ ) (Figura 5.4).



Figura 5.4. Procedimiento para determinar la densidad real a través del método del picnómetro

Esta técnica se emplea en la escayola y en los residuos de poliuretano triturados que contempla el presente trabajo de investigación.

### 5.2.1.3. Granulometría por difracción láser

La granulometría por difracción láser permite conocer la distribución de los diferentes tamaños de partícula del material analizado.

El equipamiento utilizado es un analizador Beckman Coulter LS 13 320 (Figura 5.5), capaz de examinar el tamaño de partícula de muestras desagregadas en un rango de 0,04 a 2.000  $\mu\text{m}$ . Esta tecnología forma parte del equipamiento del CENIEH en Burgos.

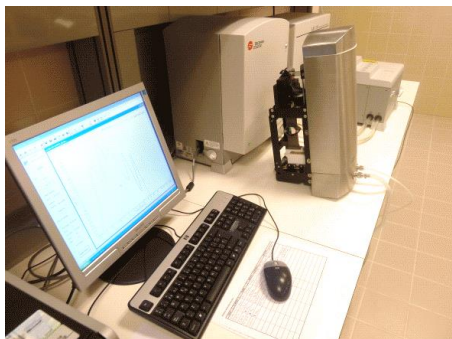


Figura 5.5. Equipo de difracción láser Beckman Coulter LS 13 320

El procedimiento de ensayo consiste en hacer pasar un rayo láser a través de la sustancia pulverizada y suspendida en alcohol isopropílico de forma que el láser se difracta creando un patrón de luz de difracción en función del tamaño de las partículas.

El conglomerante a base de yeso y los residuos de poliuretano, previamente triturados y tamizados, son las materias primas sobre las que se lleva a cabo este análisis.

#### 5.2.1.4. Adsorción física de gases

La adsorción física es una técnica que permite conocer el área BET y la distribución del tamaño y el volumen de poros de un material. El rango de trabajo del equipo limita el estudio a los microporos (< 2 nm) y mesoporos (2-50 nm).

El equipamiento empleado para la realización de este ensayo es el equipo de isotermas de adsorción Micromeritics ASAP 2420, el cual permite evaluar materiales con un rango de tamaño de poro de 0,5 a 500 nm y áreas superficiales de 0,2 a 1.500 m<sup>2</sup>·g<sup>-1</sup> (Figura 5.6). El ensayo se realiza en el laboratorio de la Unidad de Apoyo a la Investigación del Instituto de Catálisis y Petroleoquímico del CSIC en Madrid.





Figura 5.6. Equipo de adsorción física Micromeritics ASAP 2420

La parte sólida a analizar se conoce como adsorbente y el fluido que se adsorbe como adsorbato, que en este caso es nitrógeno. El procedimiento operatorio consiste en desgasificar previamente las muestras en vacío a 200 °C durante 16 horas. Posteriormente, se deposita una capa de adsorbato sobre el adsorbente, el grosor de esta capa aumenta a medida que se incrementa la presión de equilibrio hacia la presión de saturación del fluido. Durante la realización del ensayo y a diferentes presiones se van obteniendo los siguientes datos:

- El área BET, entendido como tal al desarrollo superficial del sólido por unidad de masa y cuyo cálculo se basa en el método BET. La medición se realiza en el intervalo 0,05-0,23  $P/P_0$  para el material de referencia y en el 0,05-0,30  $P/P_0$  para las mezclas con poliuretano. El área de microporo y el área superficial externa se determina aplicando la ecuación de Harkins y Jura para un espesor de la capa de nitrógeno de entre 0,5-0,6 nm.
- La isoterma de adsorción-desorción, que relaciona el volumen de moléculas de gas adsorbidas o desorbidas con el incremento o descenso de presión a temperatura constante.
- El volumen total de poros por unidad de masa, que se determina directamente cuantificando el volumen de adsorbato en el interior de adsorbente.
- La distribución del tamaño poros, determinado según el método BJH.
- El área de microporo, que se estima siguiendo el método de la curva-t.

Esta metodología se emplea en la caracterización de las diferentes mezclas de yeso y polímero.

### 5.2.1.5. Conductividad térmica

La conductividad térmica es una propiedad física que determina la capacidad intrínseca de un material para conducir del calor. Se obtiene siguiendo las indicaciones recogidas en las normas UNE-EN 12664<sup>97</sup> y UNE-EN 12667<sup>98</sup> y se determina estableciendo una relación constante y uniforme de la densidad del flujo de calor y aplicando las Ecuaciones 5.3 y 5.4.

$$R = \frac{T_1 - T_2}{f \cdot e_h} \quad (\text{Ecuación 5.3})$$

Donde:

R: es la resistencia térmica (m<sup>2</sup>K/W);

T<sub>1</sub>: es la medida de la temperatura en el lado caliente de la muestra (K);

T<sub>2</sub>: es la medida de la temperatura en el lado frío de la muestra (K);

f: es el factor de calibración del medidor de flujo de calor (W/(mV · m<sup>2</sup>);

e<sub>h</sub>: es la salida del medidor de flujo de calor (mV).

$$\lambda = \frac{d}{R} \quad (\text{Ecuación 5.4})$$

Donde:

λ: es la conductividad térmica (W/mK);

---

<sup>97</sup> Asociación Española de Normalización (AENOR). (2001). UNE-EN 12664 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 secos y húmedos de baja y media resistencia térmica.

<sup>98</sup> Asociación Española de Normalización (AENOR). (2002). UNE-EN 12667 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.

$d$ : es la media del espesor de la muestra (m);

$R$ : es la resistencia térmica ( $m^2K/W$ ).

Este ensayo se realiza en tres ocasiones con diferentes equipamientos sobre las mezclas y la placa de yeso con residuo de poliuretano.

#### Ensayo con equipo ISOMET 2114

El primero de ellos es un equipo de medición portátil de las propiedades de transferencia de calor llamado ISOMET 2114 (Figura 5.7). El ensayo se lleva cabo en las instalaciones de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Oporto (FEUP), donde se encuentra dicha tecnología.



Figura 5.7. Equipo y procedimiento de ensayo con ISOMET 2114

Este aparato mide la relación de la densidad de flujo de calor a través de la muestra analizando el diferencial de temperatura que atraviesa el material. Consta de una sonda de medición superficial que analiza la respuesta de temperatura del material según los impulsos de flujo de calor producidos por el calentamiento eléctrico de la resistencia ubicada en el interior de la sonda.

Esta técnica permite conocer otras propiedades térmicas como la difusividad térmica y la capacidad calorífica volumétrica, además de la conductividad térmica.

El procedimiento consiste en efectuar varias mediciones sobre la superficie de las probetas endurecidas colocando la sonda en la zona indicada.

Es un ensayo no destructivo, por lo que las mismas probetas son utilizadas para determinar la conductividad térmica del material con un segundo equipo de tipo placa caliente guardada.

#### Ensayo con equipo de placa caliente guardada (PCG) (UBU)

El equipamiento de placa cliente guardada está formado por tres placas de metal de forma cuadrada a las que se acoplan sensores de temperatura. Entre ellas se disponen dos probetas del producto a analizar. Este conjunto se introduce en la caja del equipo rodeado de lana de roca, de forma que las condiciones externas no afecten en la ejecución del ensayo (Figura 5.8). Esta dotación se localiza en los laboratorios de la Universidad de Burgos (UBU).



Figura 5.8. Equipo y procedimiento de ensayo de placa caliente guardada (UBU)

Previo a la realización de esta prueba, las probetas se introducen en la estufa para incrementar su temperatura y reducir los tiempos de ensayo.

#### Ensayo con equipo de placa caliente guardada (PCG) (FEUP)

Esta tecnología también cuenta con tres placas metálicas de forma cuadrada, las dos exteriores son frías mientras que la central es caliente. Las placas cuentan con sensores de temperatura y entre ellas se colocan dos muestras del material. El interior de la caja metálica se rellena de un aislamiento térmico conocido como vermiculita para que las condiciones de temperatura de la sala no influyan en la realización del ensayo (Figura 5.9). Este equipo pertenece al Laboratorio de Física de las Construcciones de la Universidad de Oporto (FEUP).



Figura 5.9. Equipo y procedimiento de ensayo de placa caliente guardada (FEUP)

Durante la ejecución del ensayo es preciso realizar varias mediciones ajustando la potencia hasta que la temperatura media entre las placas frías y la caliente sea constante y se ubique en torno a 10 °C. La relación de flujo de calor se obtiene a partir de la medición de la potencia suministrada por la unidad calefactora (placa central) a la sección medida.

En este caso, el acondicionamiento previo de las probetas consiste en proporcionar a las mismas de una envolvente hermética al vapor de agua revistiéndolas con film de plástico.

#### 5.2.1.6. Colorimetría

La colorimetría es el análisis y cuantificación numérica de la composición cromática de una superficie o material.

El equipamiento empleado para llevar a cabo este ensayo es un colorímetro de superficies "WSD-3A" (Figura 5.10.a)). Se trata de un

colorímetro de tipo espectral de alta precisión que sirve para medir la composición de color en términos cromáticos. El sistema óptico funciona en modo de reflexión.



Figura 5.10. Equipo y procedimiento de ensayo de colorimetría

El procedimiento operatorio consiste en situar el cabezal óptico sobre la probeta del material del cual se desea conocer el color (Figura 5.10.b)). El equipo procede al análisis de la colorimetría y muestra los resultados de forma numérica según los modelos de color XYZ y LAB, que posteriormente son transformados a HSL y RGB. Es un ensayo de tipo no destructivo.

El presente análisis se realiza sobre las mezclas de yeso con residuo de poliuretano en estado endurecido.

#### 5.2.1.7. Viscosidad aparente

La viscosidad es una propiedad física que hace referencia a la resistencia a fluir que presentan algunos líquidos debido al rozamiento entre sus partículas. Para determinar este parámetro se siguen las indicaciones recogidas en la norma UNE-EN ISO 2555<sup>99</sup>, relativa a la determinación de la viscosidad aparente en resinas en estado líquido o en emulsión o dispersión.

---

<sup>99</sup> Asociación Española de Normalización (AENOR). (2018). UNE-EN ISO 2555 Plásticos. Resinas en estado líquido o en emulsión o dispersión. Determinación de la viscosidad aparente por el método del viscosímetro rotacional de un solo cilindro (ISO 2555:2018).

El equipo empleado es un viscosímetro de rotación PCE-RVI 2 compuesto por un husillo de forma cilíndrica, un dispositivo de medición de torsión y un resorte (Figura 5.11).



Figura 5.11. Equipo y procedimiento de ensayo de viscosidad aparente

La viscosidad se determina considerando la resistencia mecánica que ejerce el fluido frente al movimiento de rotación a velocidad constante del cilindro.

El estudio de la viscosidad aparente se realiza sobre la materia prima relativa al aditivo.

## 5.2.2. Caracterización mecánica

Este apartado abarca los ensayos que se realizan para determinar las propiedades mecánicas de los materiales en estudio. Estas propiedades son la resistencia a flexión, la resistencia a compresión, la dureza Shore C y la adherencia.

### 5.2.2.1. Resistencia a flexión

La resistencia a flexión es la capacidad de un material de soportar cargas aplicadas en dirección perpendicular a su eje longitudinal.

Se incluye la descripción de dos ensayos de resistencia a flexión, ambos comparten el mismo principio, sin embargo, la metodología o el procedimiento de ensayo es diferente. El primero de ellos se emplea para determinar la resistencia a flexión de probetas prismáticas y el segundo es específico para placas de escayola para techos suspendidos.

### Resistencia a flexión de probetas prismáticas

Este ensayo se emplea para determinar el valor de la carga de flexión en el que se produce la fractura de la probeta objeto de estudio. La normativa de aplicación para las propiedades mecánicas de los yesos de construcción y de los conglomerantes a base de yeso es la UNE-EN 13279-2<sup>100</sup>. Para obtener la resistencia a flexión se aplica la Ecuación 5.5.

$$P_f = 0,00234 \times P \quad (\text{Ecuación 5.5})$$

Donde:

$P_f$ : es la resistencia a flexión (N/mm<sup>2</sup>);

$P$ : es la carga de rotura a flexión media de tres probetas (N).

Se utilizan dos equipos de carga diferentes, ya que se sustituyeron en el transcurso de los ensayos. El primero de ellos es una prensa modelo MEM 101/SDC de SUZPECAR con una capacidad de carga de hasta 200 KN (Figura 5.12.a)). El segundo equipo es otra prensa modelo ME 405/30 de SERVOSIS con una capacidad de carga de 30 T (294,2 KN) (Figura 5.12.b)). Ambos equipos están conectados a un equipo de control digital que monitoriza el proceso del ensayo. Forman parte del equipamiento de la Universidad de Burgos (UBU).



a)



b)

Figura 5.12. Equipos para determinar la resistencia a flexión según UNE-EN 13279-2

---

<sup>100</sup> Asociación Española de Normalización (AENOR). (2014). UNE-EN 13279-2 Yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción. Parte 2: Métodos de ensayo.



El procedimiento operatorio consiste en colocar la probeta en el dispositivo de flexión, apoyada sobre dos rodillos cuyos centros están separados 100 mm y aplicar la carga con otro rodillo central (Figura 5.13).

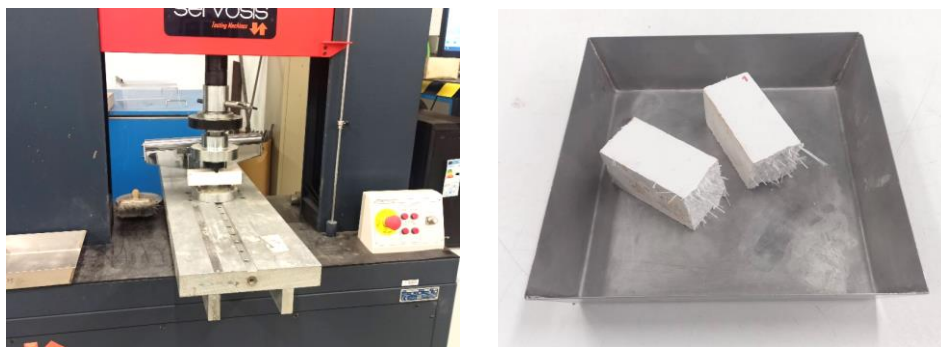


Figura 5.13. Procedimiento de ensayo para determinar la resistencia a flexión según UNE-EN 13279-2

Este ensayo se realiza sobre probetas prismáticas, de dimensiones 160 x 40 x 40 mm, de mezcla de yeso con polímero reciclado.

#### Resistencia a flexión de placas de escayola

La resistencia a flexión de una placa de escayola se determina analizando la capacidad de soportar una carga uniformemente repartida aplicada en el centro y paralela al eje transversal. El procedimiento específico a seguir se describe en la norma UNE-EN 14246<sup>101</sup>, en la cual se incluyen varios métodos de ensayo para placas de escayola para techos suspendidos.

Al tratarse de una placa para techos suspendidos desmontables con perfilera vista, el método de ensayo consiste en colocar un rodillo de carga de 6 Kg en el centro de la placa en su dirección transversal y paralela a los apoyos, tras 30 minutos de aplicación se retira la carga y se examina el estado general del prefabricado (Figura 5.14).

---

<sup>101</sup> Asociación Española de Normalización (AENOR). (2007). UNE-EN 14246 Placas de escayola para techos suspendidos. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo.



Figura 5.14. Procedimiento de ensayo para determinar la resistencia a flexión según UNE-EN 14246

Este ensayo se realiza sobre el prefabricado de placa de escayola con residuo de poliuretano.

#### 5.2.2.2. Resistencia a compresión

La resistencia a compresión es la capacidad de un material de soportar cargas de aplastamiento en un área determinada. Este ensayo pretende determinar el valor de la carga de compresión en el que se produce la fractura de la probeta objeto de estudio. La normativa de aplicación para evaluar las propiedades mecánicas de los yesos de construcción y de los conglomerantes a base de yeso es la UNE-EN 13279-2<sup>102</sup>. La resistencia a compresión se determina según la Ecuación 5.6.

$$R_c = \frac{F_c}{1600} \quad (\text{Ecuación 5.6})$$

Donde:

$R_c$ : es la resistencia a compresión (N/mm<sup>2</sup>);

$F_c$ : es la carga de rotura a compresión media de seis probetas (N).

El equipamiento utilizado es el mismo que el del ensayo de resistencia a flexión, únicamente es preciso sustituir el accesorio de la superficie de apoyo de la probeta por el de compresión (Figura 5.15.a).

---

<sup>102</sup> Asociación Española de Normalización (AENOR). (2014). UNE-EN 13279-2 Yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción. Parte 2: Métodos de ensayo.



Figura 5.15. Equipo y procedimiento de ensayo para determinar la resistencia a compresión

Para llevar a cabo este ensayo se utilizan las mitades resultantes de las probetas sometidas al ensayo de resistencia a flexión. Éstas se colocan en la prensa de compresión con las caras laterales entre los planos de acero y se aplica la carga hasta la rotura de la muestra (Figura 5.15.b).

Las mezclas de yeso con residuo de poliuretano en estado endurecido son sometidas a este ensayo.

### 5.2.2.3. Dureza Shore C

La dureza Shore es la resistencia que presenta un material a la indentación, es decir, a la penetración. El procedimiento a seguir para llevar a cabo este ensayo, así como el equipamiento necesario, se describen en la norma UNE 102042<sup>103</sup>, en la que se incluyen este y otros métodos de ensayo específicos de yesos y escayolas de construcción.

El equipo utilizado es un durómetro de la marca BAXLO para la escala Shore C (Figura 5.16.a)). El rango de medición es de 0 a 100 unidades Shore C.

---

<sup>103</sup> Asociación Española de Normalización (AENOR). (2014). UNE 102042 Yesos y escayolas de construcción. Otros métodos de ensayo.

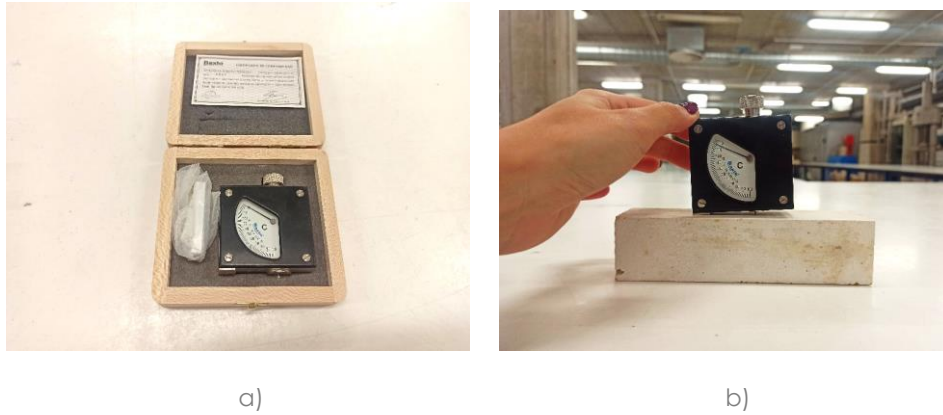


Figura 5.16. Equipo y procedimiento de ensayo para determinar la dureza Shore C

El procedimiento, de tipo no-destructivo, consiste en colocar el durómetro Shore C sobre la superficie de la probeta de forma que el resorte que contiene imprima una fuerza a un penetrómetro de forma troncocónica y este su vez la transmita al material objeto de ensayo (Figura 5.16.b)). La dureza del material se obtiene midiendo la huella o deformación en el punto de presión. Para una dureza de 100 unidades shore C, la fuerza que se aplica es de 44,5 N.

Esta metodología se aplica en probetas de mezcla de yeso con polímero de dimensiones 160 x 40 x 40 mm.

#### 5.2.2.4. Adherencia

La adherencia es la resistencia que presentan dos materiales a separarse que han sido unidos previamente. Se determina midiendo la carga de tracción máxima que soporta el material aplicado sobre un soporte. Para la realización del ensayo se sigue el procedimiento operatorio descrito en la norma UNE-EN 13279-2<sup>104</sup>, la cual detalla también el equipamiento necesario. La resistencia a la adhesión se determina según la (Ecuación 5.7).

$$R_u = \frac{F_u}{A} \quad \text{(Ecuación 5.7)}$$

<sup>104</sup> Asociación Española de Normalización (AENOR). (2014). UNE-EN 13279-2 Yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción. Parte 2: Métodos de ensayo.

Donde:

$R_u$ : es la resistencia de adherencia ( $N/mm^2$ );

$F_u$ : es la carga de rotura de adherencia (N);

$A$ : es el área de ensayo de la probeta cilíndrica ( $mm^2$ ).

El equipamiento necesario consiste en varios discos de metal de 50 mm de diámetro y un espesor no inferior a 10 mm, y un dispositivo de tracción con un manómetro de lectura.

Para la ejecución de este ensayo es preciso aplicar el material objeto de análisis sobre un soporte determinado y marcar con un útil probetas circulares de las mismas dimensiones que los discos de metal antes de que la pasta endurezca. Transcurridos 7 o 28 días, se pegan los discos de metal a las probetas y se aplica la carga de tracción (Figura 5.17).

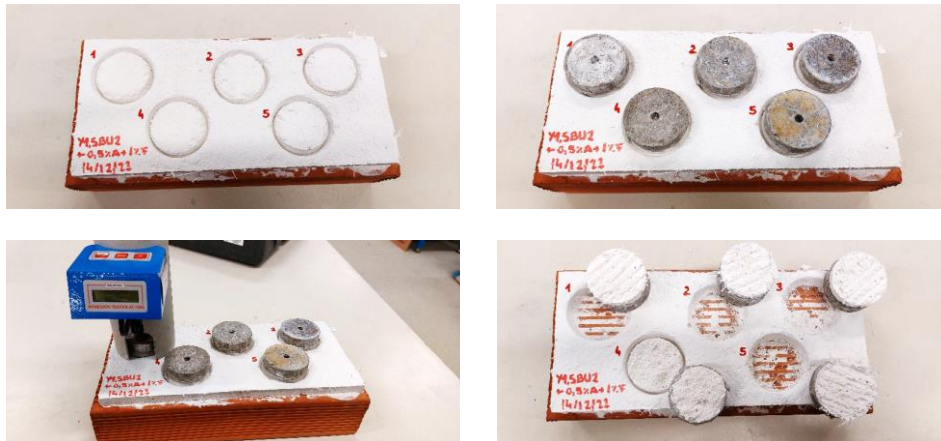


Figura 5.17. Equipo y procedimiento de ensayo para determinar la adherencia

Además del valor de la resistencia a la adhesión, es importante la forma de la rotura. Ésta puede producirse entre el material y el soporte, en la propia masa del material o en la propia masa del soporte. En los dos últimos casos el valor de la resistencia de adherencia es superior al determinado.

La resistencia de adhesión se calcula en las mezclas de yeso con residuo de poliuretano.

### 5.2.2.5. Deformación bajo carga

Se entiende por deformación bajo carga al cambio que experimentan un material en sus dimensiones por la aplicación de un esfuerzo. Se determina según las especificaciones recogidas en la norma UNE-EN 520:2005+A1<sup>105</sup> para placas de yeso laminado.

El procedimiento es el mismo que se emplea para determinar la carga de rotura a flexión. El ensayo consiste en someter la placa a una carga longitudinal de  $250 \pm 125$  N/min en el centro hasta rotura, registrando de forma continua la deformación en función de la carga aplicada (Figura 5.18).



Figura 5.18. Procedimiento de ensayo para determinar la deformación bajo carga

Este ensayo se realiza sobre la placa de escayola con residuo de poliuretano y la placa de escayola estándar con el propósito de comparar sus gráficas de deformación-carga.

### 5.2.3. Caracterización química

Se incluyen los ensayos dirigidos a determinar las características químicas de los materiales objetos de estudio. Éstos son el análisis elemental (CHNS), lixiviación y principio de fraguado.

---

<sup>105</sup> Asociación Española de Normalización (AENOR). (2010). UNE-EN 520:2005+A1 Placas de yeso laminado. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo.

### 5.2.3.1. Análisis elemental (CHNS)

El ensayo de análisis elemental (CHNS) permite determinar la cantidad de carbono (C), hidrógeno (H), nitrógeno (N) y azufre (S) de la muestra analizada. Puede llevarse a cabo en todo tipo de muestras orgánicas o inorgánicas, líquidas o sólidas y volátiles o no volátiles.

El equipo utilizado es el microanalizador elemental Orgánico Thermo Scientific Modelo FLASH 2000 y un detector TCD (Figura 5.19), que a su vez cuenta con un inductor automático con capacidad para 62 muestras. Este equipo forma parte del equipamiento de la Universidad de Burgos (UBU).

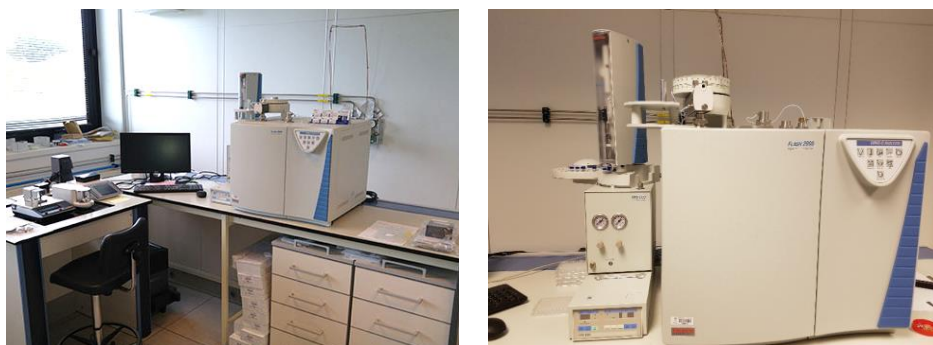


Figura 5.19. Equipo microanalizador elemental Orgánico Thermo Scientific Modelo FLASH 2000

La preparación de muestras exige que éstas se encuentren en estado seco y tengan un tamaño reducido, incluso un tratamiento previo de trituración.

El procedimiento para la realización del ensayo está totalmente automatizado y se basa en la combustión, a una temperatura de 900 °C y en una atmósfera pura de oxígeno, de las muestras introducidas en el equipo. Los elementos químicos anteriormente mencionados se transforman en gases simples ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  y  $\text{SO}_2$ ), los cuales se analizan en la columna cromatográfica y, una vez reducidos, se transfieren al detector de conductividad térmica para cuantificar el peso correspondiente a cada uno de los cuatro elementos químicos analizados. Los resultados se expresan en porcentaje, teniendo en cuenta el peso de cada elemento químico respecto del peso total de la muestra.

Diferentes muestras de residuos de poliuretano y de la placa de yeso con poliuretano fabricada a nivel industrial son analizadas con este método para conocer su composición en carbono, hidrógeno, nitrógeno y azufre.

### 5.2.3.2. Lixiviación

El proceso de lixiviación consiste en extraer una o varias sustancias de una matriz sólida, después de haber estado en contacto con un líquido. Para llevar a cabo este ensayo se siguen las indicaciones recogidas en la norma UNE-EN 12457-2<sup>106</sup>.

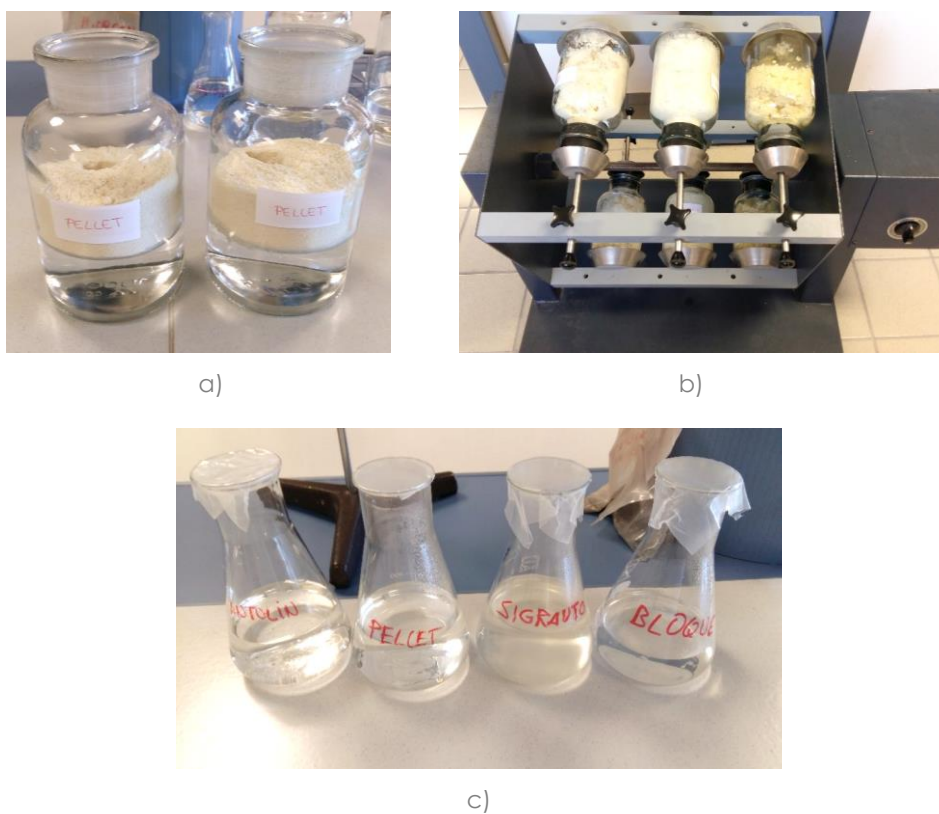


Figura 5.20. Procedimiento de ensayo de lixiviación

<sup>106</sup> Asociación Española de Normalización (AENOR). (2002). UNE-EN 12457-2 Caracterización de residuos. Lixiviación. Ensayo de conformidad para la lixiviación de residuos granulares y lodos. Parte 2: Ensayo por lotes de una etapa para una relación líquido-sólido de 10 l/kg para materiales con un tamaño de partícula inferior a 4 mm (con o sin reducción de tamaño).



El procedimiento de ensayo consiste en colocar las sustancias a analizar en una botella con agua destilada (Figura 5.20.a). Posteriormente, esta botella se coloca en un agitador durante un período de 24 horas (Figura 5.20.b). Una vez agitada y filtrada la muestra se obtiene el eluato o líquido a ensayar (Figura 5.20.c). De este líquido se obtienen diferentes datos como el pH, la conductividad eléctrica (CT), el contenido de sal y la cantidad de sólidos disueltos totales (SDT).

Este ensayo se realiza sobre diversas muestras de residuo polimérico triturado.

### 5.2.3.3. Principio de fraguado

El fraguado es el proceso por el cual una pasta fresca comienza a endurecer y a perder plasticidad. El ensayo de principio de fraguado evalúa el momento en que se inicia dicho proceso. En este caso, se realiza según el Método del cono de Vicat, específico para yesos premezclados que llevan aditivos y que se describe en la norma UNE-EN 13279-2<sup>107</sup>. El principio de fraguado se determina según la (Ecuación 5.8).

$$T_i = t_1 - t_0 \quad (\text{Ecuación 5.8})$$

Donde:

$T_i$ : es el tiempo de principio de fraguado (min);

$t_1$ : es el tiempo en el que la profundidad de penetración del cono dentro de la pasta de yeso llega a los  $22 \pm 2$  mm por encima de la placa de vidrio (min);

$t_0$ : es el momento en el que entran en contacto el yeso y el agua (min).

El equipo utilizado es el dispositivo de Vicat de la marca IBERTEST y forma parte del equipamiento de la Universidad de Burgos (UBU).

Para la realización de este ensayo, en primer lugar, se procede a la fabricación de la pasta de yeso según la relación agua/conglomerante determinada, tomando nota del tiempo en el que se pone en contacto

---

<sup>107</sup> Asociación Española de Normalización (AENOR). (2014). UNE-EN 13279-2 Yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción. Parte 2: Métodos de ensayo.

el agua con el conglomerante a base de yeso ( $t_0$ ). La mezcla se vierte en el molde, cuya parte más ancha debe estar en contacto con la placa de vidrio, y se coloca el cono sobre la superficie de la pasta soltando el dispositivo de Vicat. Se libera el dispositivo sucesivas veces, previa limpieza y secado, hasta que el cono penetra a una profundidad de  $22 \pm 2$  mm sobre la placa de vidrio ( $t_1$ ) (Figura 5.21).



Figura 5.21. Procedimiento de ensayo de principio de fraguado

Esta metodología se emplea en las pastas de yeso con poliuretano reciclado en estado fresco.

#### **5.2.4. Caracterización microscópica**

La Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) y Tomografía Axial (micro)Computarizada (TAC) son las técnicas empleadas para determinar las propiedades microscópicas de los materiales en estudio.

##### **5.2.4.1. Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)**

La tecnología de Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) permite conocer, observar y analizar la estructura microscópica de las sustancias analizadas.

A lo largo de la investigación se lleva a cabo el análisis de las muestras con dos equipos diferentes de microscopía electrónica de barrido. El primero de ellos es un microscopio FEI Quanta-600 (Figura 5.22.a), localizado en los laboratorios del CENIEH en Burgos mientras que el segundo es un microscopio JEOL JSM-6460LV, perteneciente al equipamiento de la Universidad de Burgos (Figura 5.22.b).



Figura 5.22. Equipos de microscopía electrónica de barrido

Ambos equipamientos posibilitan la visualización y caracterización de sustancias orgánicas e inorgánicas obteniendo imágenes de alta resolución a través de grandes lentes de aumentos. Pueden utilizarse en modo ambiental (ESEM) o creando una atmósfera de alto vacío en la que el equipo actúa como un microscopio electrónico de barrido tradicional (MEB). El primer método es un ensayo no destructivo y permite observar la muestra sin necesidad de que sea metalizada, sin embargo, en el segundo es preciso metalizar la muestra lo que lo convierte en una técnica destructiva.

Las muestras a analizar se precisan en su estado natural, es decir, sin haber sido previamente procesadas o trituradas ya que la estructura interna, especialmente la del poliuretano, se deforma.

Este test se realiza sobre la materia prima correspondiente al residuo de poliuretano, varias mezclas de yeso que incluyen dicho polímero y el prefabricado de yeso-PU elaborado a nivel industrial.

#### **5.2.4.2. Tomografía Axial Computarizada (TAC)**

La microtomografía computarizada es una técnica de imagen en la que se utilizan rayos X y que permite obtener una reconstrucción volumétrica virtual (3D) por secciones del producto analizado a partir de las radiografías obtenidas de un análisis tomográfico computarizado de 360°. Las secciones o radiografías son imágenes en 2D de alta resolución en las que se muestra la estructura interna de la muestra sin destruirla, por lo que se considera un ensayo no invasivo o no destructivo.

El equipamiento utilizado es el Phoenix V|Tome|X s 240 de GE Sensing and Inspections Technologies y un Micro CT 80 de Scanco Medical (Figura 5.23). Esta tecnología se localiza en los laboratorios del CENIEH en Burgos.



Figura 5.23. Equipo de tomografía micro-computarizada Phoenix V |Tome |X s 240 y Micro CT 80

Para el procesamiento de los datos y de las imágenes es preciso emplear softwares específicos. Las imágenes 2D y los modelos 3D obtenidos permiten observar la estructura interna de la sustancia y llevar a cabo evaluaciones anatómicas virtuales y análisis morfométricos.

Esta tecnología se emplea para conocer la composición interna de los residuos de poliuretano en su estado de recepción, las mezclas de yeso con polímero y la placa de yeso-PU. En los dos últimos casos también se analizan la distribución de las diferentes materias primas en la matriz y la presencia de poros.

### 5.2.5. Caracterización higroscópica

La higroscopicidad evalúa el grado de afinidad de un material con el agua en su estado líquido o gaseoso.

A continuación, se describen los ensayos llevados a cabo para determinar las propiedades higroscópicas de los materiales de estudio. Las características analizadas son la acumulación de agua, la absorción de agua por inmersión, la absorción de agua por capilaridad, la permeabilidad al vapor de agua y la curva higroscópica.

### 5.2.5.1. Acumulación de agua

La acumulación de agua se entiende como la capacidad que tiene un material de conservar el agua de la mezcla y liberarlo gradualmente. La determinación de este valor se realiza teniendo en cuenta el peso de las probetas al desmoldar un día después de su fabricación (densidad aparente en estado húmedo (EH)) y una vez transcurridos 7/28 días de su fabricación y previo secado en la estufa a 35-40°C hasta peso constante (densidad aparente en estado endurecido (EE)) (Ecuación 5.9).

$$R_w = \frac{\rho_b(EH) - \rho_b(EE)}{\rho_b(EE)} \times 100 \quad (\text{Ecuación 5.9})$$

Donde:

$R_w$ : es la acumulación de agua (%);

$\rho_b$  (EH): es la densidad aparente de la muestra en estado húmedo (Kg/m<sup>3</sup>);

$\rho_b$  (EE): es la densidad aparente de la muestra en estado endurecido (Kg/m<sup>3</sup>).

Este ensayo se lleva a cabo en las diferentes dosificaciones de mezclas de yeso con residuo de poliuretano.

### 5.2.5.2. Absorción de agua por inmersión

La absorción de agua por inmersión es la facilidad que presenta un material a la penetración de un líquido, en este caso agua, a través de sus poros. El ensayo se realiza según la norma UNE-EN 13755<sup>108</sup>, específica para determinar la absorción de agua a presión atmosférica en piedra natural. La absorción de agua por inmersión ( $A_b$ ) se calcula de manera porcentual teniendo en cuenta la masa en estado seco y la masa saturada en agua de la muestra (Ecuación 5.10).

$$A_b = \frac{m - m_0}{m_0} \times 100 \quad (\text{Ecuación 5.10})$$

---

<sup>108</sup> Asociación Española de Normalización (AENOR). (2008). UNE-EN 13755 Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la absorción de agua a presión atmosférica.

Donde:

$m$ : es la masa estable de la probeta en un ambiente dado (Kg);

$m_0$ : es la masa estable de la probeta secada en estufa previo a la realización del ensayo (Kg).

El test consiste en introducir las muestras secas y con masa constante, en un recipiente de agua durante 24 horas, de forma que queden totalmente sumergidas (Figura 5.24). Transcurrido el tiempo establecido, se pesa el material. Este procedimiento se repite hasta que el peso del material saturado sea constante.

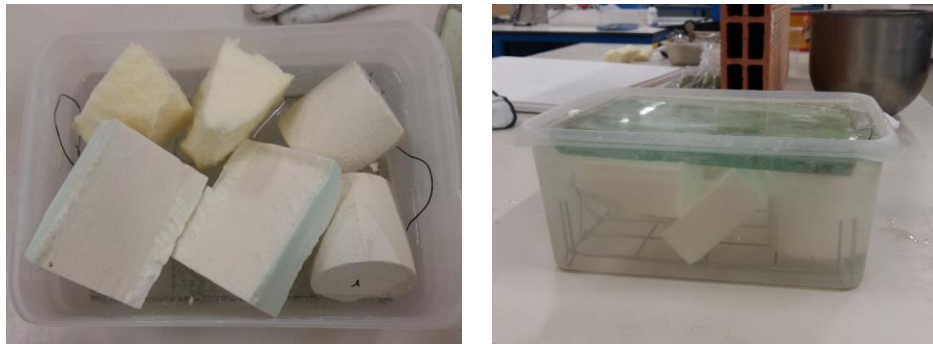


Figura 5.24. Ensayo de absorción de agua por inmersión

La determinación de la absorción de agua por inmersión se realiza en las diferentes muestras de residuo de poliuretano y en las pastas de yeso que contienen ducho polímero.

### 5.2.5.3. Absorción de agua por capilaridad

La absorción de agua por capilaridad es la resistencia que presenta un material al ascenso de un líquido a través de sus poros. Este ensayo se realiza según dos normativas distintas, con el mismo principio y metodologías o procedimientos de ensayo diferentes.

Ambos se llevan a cabo para determinar la absorción de agua por capilaridad de diferentes mezclas de yeso y poliuretano triturado.

Ensayo según la metodología descrita en la norma RILEM TC 25-PEM

Este ensayo se realiza siguiendo el método recogido en la normativa RILEM TC 25-PEM<sup>109</sup>, la cual establece el procedimiento de ensayo para determinar el coeficiente de absorción de agua por capilaridad de rocas. Este coeficiente se calcula según la (Ecuación 5.11).

$$C = \frac{(M_2 - M_1)}{\sqrt{t} \cdot h_2 \cdot 0,4 \cdot 10^{-4}} \quad \text{(Ecuación 5.11)}$$

Donde:

C: es el coeficiente de absorción de agua por capilaridad (Kg/(m<sup>2</sup>·min<sup>0,5</sup>));

M<sub>1</sub>: es el peso de la probeta en seco al inicio del ensayo (Kg);

M<sub>2</sub>: es el peso de la probeta transcurridos 10 minutos del inicio del ensayo (Kg);

h<sub>2</sub>: es la altura de la marca del agua en la probeta transcurridos 10 minutos del inicio del ensayo (cm);

t: es el tiempo de duración del ensayo (min).



Figura 5.25. Ensayo de absorción de agua por capilaridad según la norma RILEM TC 25-PEM

<sup>109</sup> RILEM TC 25-PEM. (1980). Recommended test to measure the deterioration of stone and to assess the effectiveness of treatment methods. *Materials and Structures*, 13(75), 175-253.

La metodología consiste en introducir varias probetas prismáticas secadas hasta masa constante en un tanque con agua de forma que estén sumergidas 2 mm como máximo. Dadas las características del material, se establece un tiempo de ensayo de 10 minutos tras los cuales se procede con el pesaje de las muestras, previa retirada del agua superficial, y con la medición de la altura de la marca de agua (Figura 5.25).

#### Ensayo según la metodología descrita en la norma UNE-EN 1015-18

La norma UNE-EN 1015-18<sup>110</sup> establece el método de ensayo para determinar el coeficiente de absorción de agua por capilaridad de la mezcla en estado endurecido. Este coeficiente se calcula por medio de la (Ecuación 5.12).

$$C = 0,1 \cdot (M_2 - M_1) \quad (\text{Ecuación 5.12})$$

Donde:

C: es el coeficiente de absorción de agua por capilaridad (Kg/(m<sup>2</sup>·min<sup>0,5</sup>));

M<sub>1</sub>: es el peso de la probeta transcurridos 10 minutos del inicio del ensayo (Kg);

M<sub>2</sub>: es el peso de la probeta transcurridos 90 minutos del inicio del ensayo (Kg).

El procedimiento consiste en introducir tres probetas prismáticas de cada material, previamente selladas por las cuatro caras mayores y secadas hasta masa constante, en una bandeja con agua de forma que no apoyen directamente en el fondo de la misma y estén sumergidas hasta una altura de entre 5 y 10 mm. Al tratarse de un mortero diferente a los de renovación, las muestras se pesan a los 10 y 90 minutos después de haber comenzado el ensayo, retirando previamente el agua superficial con un paño (Figura 5.26).

---

<sup>110</sup> Asociación Española de Normalización (AENOR). (2003). UNE-EN 1015-18 Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 18: Determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad del mortero endurecido.





Figura 5.26. Preparación de las muestras y ejecución del ensayo para determinar la absorción de agua por capilaridad según la norma UNE-EN 1015-18

Con el fin de poder trazar la curva de absorción de agua por capilaridad, se pesan las probetas en tiempos intermedios y posteriores a los especificados en la norma hasta que el aumento de peso debido a la absorción de agua se estabiliza.

#### 5.2.5.4. Permeabilidad al vapor de agua

La permeabilidad al vapor de agua es la facilidad o resistencia que presenta un material al paso de un flujo de vapor de agua a su través, sometiendo sus caras a unas condiciones determinadas de diferencia de presión y para un espesor concreto.

Esta propiedad se determina para dos condiciones de ensayo diferentes, tina seca y tina húmeda (Tabla 5.2). El ensayo según las condiciones de tina seca se realiza en los laboratorios de la Universidad de Oporto (FEUP) y según las indicaciones recogidas en la norma UNE-EN

ISO 12572<sup>111</sup>. La prueba de tina húmeda se realiza en las instalaciones de la Universidad de Burgos (UBU) siguiendo el procedimiento descrito en la norma EN 1015-19:1999/A1<sup>112</sup>.

Ensayo	Temperatura	Humedad relativa	
		Cámara climática	Desecante o solución acuosa saturada
<b>Tina seca (serie A)</b>	23°C	50%	0% (CaCl <sub>2</sub> )
<b>Tina húmeda (serie C)</b>	20°C	50%	93% (KNO <sub>3</sub> )

Tabla 5.2. Condiciones del ensayo de permeabilidad al vapor de agua

La permeabilidad al vapor de agua se obtiene a partir de los datos de permeancia al vapor de agua y espesor medio de la probeta.

El principio del ensayo se basa en exponer a cada una de las caras planas de las muestras a diferentes atmósferas, lo que genera un gradiente de presión atmosférica y propicia el paso de un flujo de vapor de agua a su través. Las probetas se pesan periódicamente hasta que alcanzan la masa constante, momento en el que se determina el coeficiente de transmisión de vapor de agua. El equilibrio o masa constante se obtiene cuando la variación de la masa por unidad de tiempo entre cinco pesadas consecutivas es inferior al 5 % de la masa total.

El procedimiento de ensayo consiste en acondicionar previamente las probetas a 23°C y 50% de humedad relativa hasta peso constante y medir su espesor. El desecante (tina seca) o solución acuosa saturada (tina húmeda) se vierte en el plato de ensayo con un espesor mínimo de 15 mm. Posteriormente se coloca la probeta en el plato de ensayo, se

<sup>111</sup> Asociación Española de Normalización (AENOR). (2018). UNE-EN ISO 12572 Prestaciones higrotérmicas de los productos y materiales para edificación. Determinación de las propiedades de transmisión de vapor de agua. Método del vaso (ISO 12572:2016).

<sup>112</sup> Asociación Española de Normalización (AENOR). (2005). UNE-EN 1015-19:1999/A1 Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 19: Determinación de la permeabilidad al vapor de agua de los morteros endurecidos de revoco y enlucido.

sella con parafina o mástico, se pesa el conjunto y se introduce en la cámara climática (Figura 5.27).

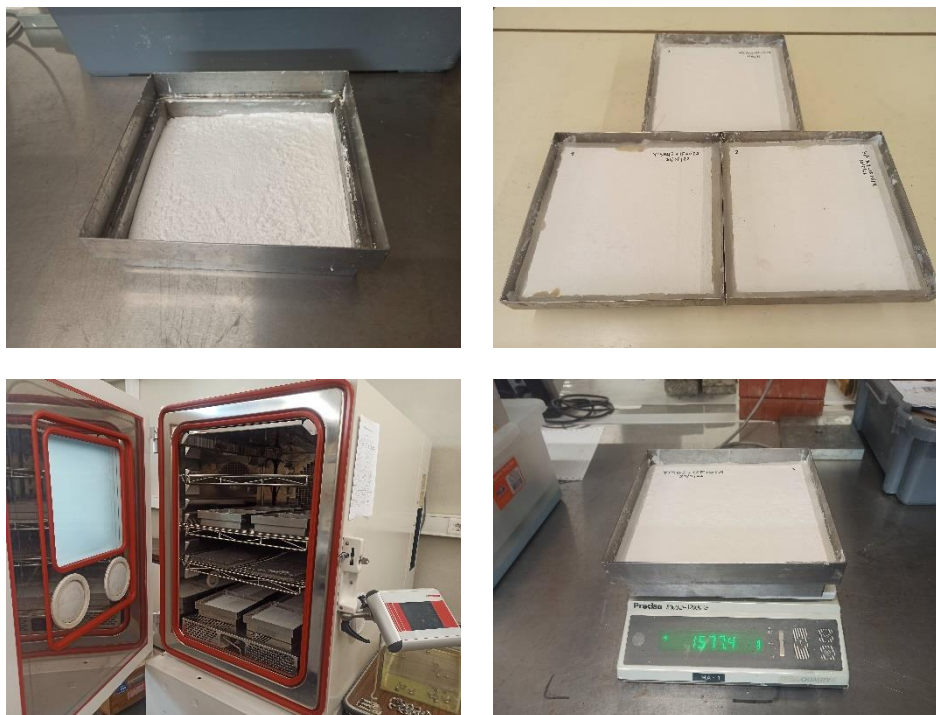


Figura 5.27. Ensayo de permeabilidad al vapor de agua en tina seca

El tipo de desecante o solución acuosa colocado en la tina determina la humedad relativa a la que se expone una de las caras de la probeta, la otra cara se expone a la humedad relativa establecida en la cámara climática. El desecante que se emplea en la tina seca es cloruro de calcio ( $\text{CaCl}_2$ ) que a una temperatura de  $23^\circ\text{C}$  presenta una humedad relativa de 0%. La solución acuosa saturada que se emplea en la tina húmeda es nitrato de potasio ( $\text{KNO}_3$ ) que a una temperatura de  $23^\circ\text{C}$  presenta una humedad relativa de 93%. La cámara climática se configura para una temperatura de  $23^\circ\text{C}$  y una humedad relativa del 50%. Según las dimensiones de los platos de ensayo, el área de las probetas expuesto al desecante es de  $0,039 \text{ m}^2$  (tina seca) y  $0,020 \text{ m}^2$  (tina húmeda).

En el ensayo de tina seca también se determina el factor de resistencia al vapor de agua, que resulta de dividir la permeabilidad al vapor de agua del aire entre la permeabilidad al vapor de agua del

material y el espesor de la capa de aire equivalente a la difusión del vapor de agua, que es el resultado de multiplicar el factor de resistencia al vapor de agua por el espesor medio de la probeta.

Este ensayo se emplea para determinar la permeabilidad al vapor de agua de las pastas de yeso que incorporan residuo de poliuretano en su composición.

#### 5.2.5.5. Curva de adsorción higroscópica

La curva de sorción permite conocer el peso de un material, que varía según el contenido de humedad, a una humedad relativa determinada y a una temperatura constante. Para la realización de este ensayo se siguen las indicaciones recogidas en la norma UNE-EN ISO 12571<sup>113</sup>. En ella se describen dos de los métodos utilizados para determinar esta propiedad higroscópica, el método de desecador y el método de sala climatizada. Para el cálculo del contenido de humedad en ambos métodos es preciso utilizar la (Ecuación 5.13).

$$u = \frac{m - m_0}{m_0} \times 100 \quad \text{(Ecuación 5.13)}$$

Donde:

u: contenido de humedad (Kg/Kg x 100);

m: es la masa estable de la probeta en un ambiente dado (Kg);

m<sub>0</sub>: es la masa estable de la probeta secada en estufa previo a la realización del ensayo (Kg).

El valor del contenido de humedad por unidad de volumen, expresado en kg/m<sup>3</sup>, se determina multiplicando el contenido de humedad por la densidad de la muestra.

La curva de adsorción higroscópica por ambos métodos se determina aplicando sobre el material una serie sucesiva de ambientes de ensayo donde la humedad relativa aumenta a una temperatura específica. Una vez se alcanza el equilibrio para cada ambiente, se determina el contenido de humedad mediante el pesaje de las muestras.

---

<sup>113</sup>Asociación Española de Normalización (AENOR). (2015). UNE-EN ISO 12571 Prestaciones higrotérmicas de los productos y materiales para edificación. Determinación de las propiedades de sorción higroscópica (ISO 12571:2013).

La norma específica que se deben analizar al menos cuatro ambientes diferentes. El equilibrio o masa constante se obtiene cuando la variación de la masa entre tres pesadas consecutivas realizadas con al menos 24 horas de diferencia es inferior al 0,1% de la masa total.

El ensayo se realiza por ambos métodos de forma simultánea en probetas de mezcla de yeso con residuo de poliuretano.

#### Método de sala climática

El equipo utilizado es una cámara climática llamada Fitoclima 3600 EDTU de tipo "walk-in" (Figura 5.28). La cámara permite un control de temperatura de entre 15 °C y 35 °C, con una precisión de  $\pm 0,5$  °C, y un control de la humedad relativa de entre 30 % y 90 % con una precisión de  $\pm 2$  %. A través de la pantalla táctil del equipo se definen la temperatura y las diferentes humedades relativas. El ensayo se lleva a cabo en las instalaciones de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Oporto (FEUP), donde se encuentra dicha tecnología.



Figura 5.28. Cámara climática tipo Fitoclima 3600 EDTU y muestras de ensayo en su interior

Este procedimiento operatorio es el más sencillo y consiste en introducir las muestras dentro de una cámara climática a una temperatura y humedad relativa determinada. La temperatura de ensayo utilizada es de  $23 \pm 0,5$  °C y las humedades relativas consecutivas seleccionadas son 33 %, 53 %, 75 % y 90 %.

### Método del desecador

El equipo empleado para realizar el ensayo por este método es un desecador de vidrio templado (Figura 5.29) propiedad del Laboratorio de Física de las Construcciones y localizado en las instalaciones de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Oporto (FEUP).

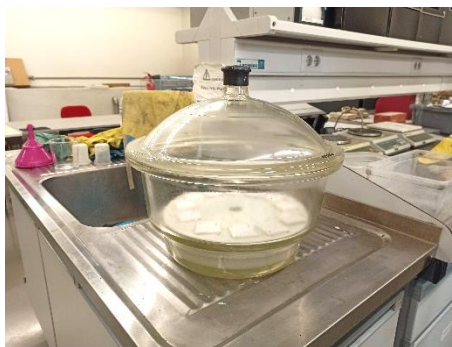


Figura 5.29. Equipamiento correspondiente al desecador

En cuanto al procedimiento para realizar este ensayo, en primer lugar, se prepara la solución saturada que permite obtener un determinado ambiente de humedad relativa. Esta solución se vierte en la parte inferior del desecador, se colocan las muestras de ensayo y se cierra el equipo. La solución acuosa saturada debe tener una profundidad de entre 30 y 50 mm (Figura 5.30.a)).



a)

b)

Figura 5.30. Ensayo del método de desecador

Para garantizar una temperatura de ensayo constante de 23 °C se introduce el desecador en la cámara climática, donde simultáneamente

se está realizando este ensayo a la misma temperatura y humedad relativa por el método de sala climática (Figura 5.30.b)).

Las sustancias empleadas en las soluciones saturadas para obtener las humedades relativas anteriormente mencionadas son cloruro de magnesio ( $\text{MgCl}_2$ ) (33 %), nitrato de magnesio hexahidratado ( $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) (53 %), cloruro sódico ( $\text{NaCl}$ ) (75 %) y nitrato de potasio ( $\text{KNO}_3$ ) (93 %) (Figura 5.31).



Figura 5.31. Sustancias empleadas para las soluciones saturadas en el método de desecador

## 5.2.6. Caracterización térmica

En este apartado se describen las técnicas utilizadas para determinar las propiedades que varían en función de la temperatura. Éstas son el ensayo de termogravimetría y la reacción al fuego.

### 5.2.6.1. Termogravimetría (TGA)

El ensayo termogravimétrico consiste en medir la variación de masa de una muestra cuando ésta se somete a un programa de temperatura en una atmósfera controlada. Durante el proceso se miden simultáneamente la masa de las muestras y el flujo de calor a medida que varía, a velocidad constante, su temperatura, la cual puede variar desde temperatura ambiente hasta 1.500 °C.

Para la realización de este análisis se emplea el equipo Q600 TA Instruments (Figura 5.32), este analizador térmico cuenta con un mecanismo de equilibrio dual, un horno bifilar horizontal y sistema de gas de purga horizontal con control de flujo másico y capacidad de cambio de gas. Este equipo está conectado, mediante una interfase TG, a un

espectrómetro FTIR, de forma que se lleve a cabo un análisis simultáneo por espectroscopia infrarroja de los gases producidos en la descomposición de las sustancias objeto de estudio. Esta tecnología forma parte del equipamiento del CENIEH en Burgos.



Figura 5.32. Equipo de análisis termogravimétrico Q600 TA Instruments y espectrómetro de infrarrojo FTIR

Este test se realiza en las muestras de residuo de poliuretano una vez procesadas y trituradas para determinar la temperatura a la que el material se degrada, en las mezclas de yeso con poliuretano triturado y en la placa de yeso-PU fabricada en una industria especializada.

#### **5.2.6.2. Reacción al fuego. Ensayos de no combustibilidad y calor bruto de combustión**

Por reacción al fuego se entiende la respuesta de un producto contribuyendo a su propia descomposición a un fuego al que está expuesto, bajo condiciones específicas.

El procedimiento de ensayo y los criterios para la clasificación de los productos en función de su comportamiento de reacción al fuego se establecen en la norma UNE-EN 13501-1+A1<sup>114</sup>, actualmente derogada y sustituida por la norma UNE-EN 13501-1<sup>115</sup>. Los productos homogéneos

---

<sup>114</sup> Asociación Española de Normalización (AENOR). (2009). UNE-EN 13501-1:2007+A1 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.

<sup>115</sup> Asociación Española de Normalización (AENOR). (2019). UNE-EN 13501-1 Clasificación en función del comportamiento frente al fuego de los productos de



candidatos a clases A1 y/o A2 deben ensayarse de acuerdo a las normas EN ISO 1182 y EN ISO 1716.

La norma UNE-EN ISO 1182<sup>116</sup>, actualizada por la norma UNE-EN ISO 1182<sup>117</sup>, recoge el ensayo de no combustibilidad, específico para identificar productos que no contribuyen a un incendio o de forma poco relevante, independientemente de uso final.

El equipamiento utilizado es un horno vertical con un espacio cilíndrico interior, en el que se introducen las muestras de ensayo, y diversos pares termoelectrónicos que miden la variación de temperatura (Figura 5.33).

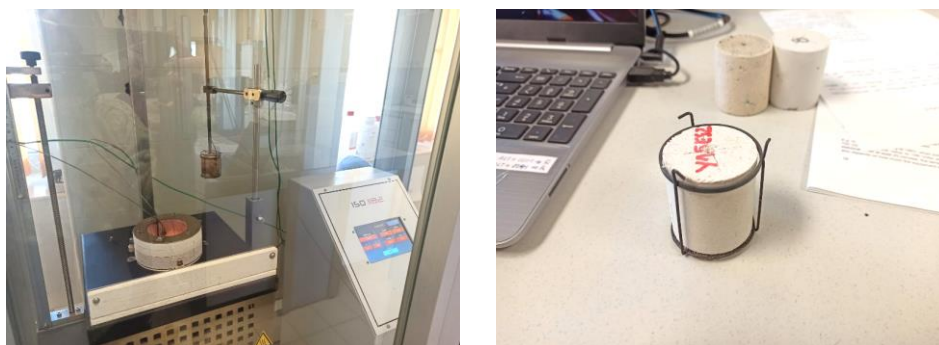


Figura 5.33. Equipo de ensayo de no combustibilidad y probeta de ensayo

Previo a la realización del test es preciso que el horno alcance una temperatura de equilibrio y que las probetas sean acondicionadas a una temperatura de  $23 \pm 2$  °C y una humedad del  $50 \pm 5$  % durante 120 horas. El procedimiento de ensayo consiste en someter a una probeta cilíndrica, colocada en el porta-probetas en el interior horno, a un incremento progresivo de temperatura hasta 800 °C, esta fase tiene una duración máxima de 120 minutos. Posteriormente, se mantiene dicha temperatura

---

construcción y elementos para la edificación. Parte 1: Clasificación a partir de datos obtenidos en ensayos de reacción al fuego.

<sup>116</sup> Asociación Española de Normalización (AENOR). (2010). UNE-EN ISO 1182 Ensayos de reacción al fuego de productos. Ensayo de no combustibilidad (ISO 1182:2010).

<sup>117</sup> Asociación Española de Normalización (AENOR). (2021). UNE-EN ISO 1182 Ensayos de reacción al fuego de productos. Ensayo de no combustibilidad (ISO 1182:2020).

durante 60 minutos. El registro de datos durante el ensayo permite obtener los valores relativos al incremento de temperatura, la duración de las llamas persistentes, en caso de que hubiere, y la pérdida de masa de las probetas.

En la norma UNE-EN ISO 1716<sup>118</sup>, derogada y sustituida por la norma UNE-EN ISO 1716<sup>119</sup>, se detallan las indicaciones a seguir para el ensayo de calor bruto de combustión. Esta propiedad consiste en la energía térmica producida por la combustión de una unidad de masa de una sustancia en concreto. El procedimiento de ensayo consiste en quemar una muestra en polvo en una atmósfera de oxígeno y medir el aumento de temperatura, considerando la pérdida de calor y el calor latente de vaporización del agua. El equipo específico para la realización de este ensayo consiste en un calorímetro IKA C5000.

Ambos ensayos son necesario para llevar a cabo una correcta clasificación al fuego de las muestras y se llevan a cabo en las instalaciones del Centro de Ensayos e Investigación del Fuego de AFITI en Toledo (España). Complementariamente se realiza algún ensayo de no combustibilidad en el horno para tal fin con el que cuenta la Universidad de Burgos (UBU).

Diferentes dosificaciones de yeso y residuo de poliuretano, así como la placa de yeso-PU, se someten a ambas técnicas de ensayo.

### **5.2.7. Caracterización acústica**

Se detallan las técnicas consideradas en la determinación de las propiedades acústicas de los materiales en estudio, en concreto, se lleva a cabo el ensayo de absorción acústica.

---

<sup>118</sup> Asociación Española de Normalización (AENOR). (2010). UNE-EN ISO 1716 Ensayos de reacción al fuego de productos. Determinación del calor bruto de combustión (Valor calorífico) (ISO 1716:2010).

<sup>119</sup> Asociación Española de Normalización (AENOR). (2021). UNE-EN ISO 1716 Ensayos de reacción al fuego de productos. Determinación del poder calorífico superior (Valor calorífico) (ISO 1716:2018).

### 5.2.7.1. Absorción acústica

Se entiende por coeficiente de absorción sonora al cociente entre el área de absorción sonora equivalente de una muestra de ensayo y el área de la muestra de ensayo. La norma UNE-EN ISO 354<sup>120</sup> establece el procedimiento a seguir para su determinación, el cual consiste en medir el tiempo de reverberación promedio en una cámara reverberante con y sin muestra de ensayo.

Este ensayo se realiza sobre la placa de yeso con residuo de poliuretano, estando la muestra formada por 21 placas de yeso-PU lisas y sin perforaciones, colocadas a 30 cm del suelo (cámara de aire) y sin material absorbente en el interior.

## 5.3. Análisis ambiental

Para la evaluación del rendimiento ambiental de un producto se emplea la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV).

En las normas UNE-EN ISO 14040<sup>121</sup> y UNE-EN ISO 14040:2006/A1<sup>122</sup> se establecen los principios y el marco de referencia a considerar en el ACV. Los preceptos UNE-EN ISO 14044<sup>123</sup> y UNE-EN ISO 14044:2006/A1<sup>124</sup> recogen los requisitos y directrices a seguir para la consecución del análisis.

El procedimiento para determinar la huella ambiental comprende el inventario y análisis los flujos de tipo ambiental del ciclo de vida del

---

<sup>120</sup> Asociación Española de Normalización (AENOR). (2004). UNE-EN ISO 354 Acústica. Medición de la absorción acústica en una cámara reverberante (ISO 354:2003).

<sup>121</sup> Asociación Española de Normalización (AENOR). (2006). UNE-EN ISO 14040 Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Principios y marco de referencia (ISO 14040:2006).

<sup>122</sup> Asociación Española de Normalización (AENOR). (2021). UNE-EN ISO 14040:2006/A1 Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Principios y marco de referencia. Modificación 1 (ISO 14040:2006/Amd 1:2020).

<sup>123</sup> Asociación Española de Normalización (AENOR). (2006). UNE-EN ISO 14044 Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Requisitos y directrices (ISO 14044:2006).

<sup>124</sup> Asociación Española de Normalización (AENOR). (2018). UNE-EN ISO 14044:2006/A1 Gestión ambiental. Evaluación del ciclo de vida. Requisitos y directrices. Modificación 1 (ISO 14044:2006/Amd 1:2017).

producto o sistema evaluado. El análisis se divide en cuatro etapas consecutivas e interrelacionadas: definición del objetivo y el alcance, análisis de inventario, evaluación del impacto e interpretación.

Se lleva a cabo un análisis ambiental de las mezclas de yeso con poliuretano reciclado en la fase experimental y del prefabricado de yeso con residuo de poliuretano elaborado en la fase industrial.

#### **5.4. Análisis económico**

El Análisis del Coste del Ciclo de Vida (CCV) permite la evaluación económica de diferentes sistemas de producto.

El análisis financiero se realiza según las indicaciones establecidas en las normas ISO 15686-5<sup>125</sup>, específica para edificios y activos construidos, y UNE-EN 60300-3-3<sup>126</sup>, que incluye la guía de aplicación.

El procedimiento consiste en evaluar los flujos económicos de las diferentes etapas del ciclo de vida de un producto o sistema. El estudio se divide en cuatro fases consecutivas e interrelacionadas: definición del objetivo y el alcance, análisis de inventario, evaluación del impacto e interpretación, al igual que el ACV.

La evaluación del rendimiento económico se realiza sobre la placa de escayola con residuo de poliuretano elaborada a nivel industrial.

---

<sup>125</sup> International Organisation for Standardisation (ISO). (2017). ISO 15686-5 Buildings and constructed assets. Service life planning. Part 5: Life-cycle costing.

<sup>126</sup> Asociación Española de Normalización (AENOR). (2017). UNE-EN 60300-3-3 Gestión de la confiabilidad. Parte 3-3: Guía de aplicación. Cálculo del coste del ciclo de vida.

# Caracterización de materias primas

# 06



## CAPÍTULO 6. CARACTERIZACIÓN DE MATERIAS PRIMAS

En este capítulo se recogen las características principales relativas a las materias primas consideradas en la investigación. Para la fabricación de mezclas y prefabricados de yeso se emplean yeso, residuo de poliuretano, fibra de vidrio, aditivo y agua. Se incluye un estudio pormenorizado de los diferentes residuos de poliuretano, ya que constituyen el elemento diferenciador y eje director de esta tesis doctoral.

El yeso, la fibra y el aditivo empleados como materia prima vienen recomendados por el fabricante y son los mismos materiales utilizados en la fabricación a nivel industrial de la placa de escayola estándar para techos suspendidos y desmontables.

La Tabla 6.1 recoge un resumen de los ensayos llevados a cabo para el análisis de las propiedades de cada una de las materias primas.

	Materias primas				
	Yeso	Residuo de PU	Fibra de vidrio	Aditivo	Agua
<b>Caracterización física</b>					
Densidad aparente	x	x	FT	-	-
Densidad real	x	x	-	x	-
Granulometría por difracción láser	x	-	-	-	-
Adsorción física de gases	-	-	-	-	-
Conductividad térmica	FT	-	-	-	-
Colorimetría	-	-	-	-	-
Viscosidad aparente	-	-	-	x	-
<b>Caracterización mecánica</b>					
Resistencia a flexión	FT	-	-	-	-
Resistencia a compresión	-	-	-	-	-
Dureza Shore C	-	-	-	-	-
Adherencia	-	-	-	-	-
Deformación bajo carga	-	-	-	-	-
<b>Caracterización química</b>					
Análisis elemental (CHNS)	-	x	-	-	-
Lixiviación	-	x	-	-	-
Principio de fraguado	-	-	-	-	-
<b>Caracterización microscópica</b>					
M. Electrónica de Barrido (MEB)	-	x	-	-	-
Tomografía Axial Comput. (TAC)	-	x	-	-	-
<b>Caracterización higroscópica</b>					
Acumulación de agua	-	-	-	-	-
Absorción de agua por inmersión	-	x	-	-	-

Absorción de agua por capilaridad	-	-	-	-	-
Permeabilidad vapor	FT	-	-	-	-
Curva de adsorción higroscópica	-	-	-	-	-
<b>Caracterización térmica</b>					
Termogravimetría (TGA)	-	X	-	-	-
Reacción al fuego	FT	-	-	-	-
<b>Caracterización acústica</b>					
Absorción acústica	-	-	-	-	-

FT: dato obtenido de la ficha técnica

Tabla 6.1. Esquema de los ensayos realizados en la caracterización de materias primas

### 6.1. Conglomerante a base de yeso

El conglomerante utilizado es una escayola tipo A (E-35), con designación A/14/3,5 según la norma UNE-EN 13279-1<sup>127</sup>, suministrado en forma de sacos y fabricado por la empresa Saint-Gobain Placo Ibérica SA en las instalaciones de Gelsa (Zaragoza) (Figura 6.1).



Figura 6.1. Escayola IBERYOLA E-35

Los conglomerante a base de yeso tienen un contenido en sulfato cálcico igual o superior al 50%, y sus características se determinan siguiendo las especificaciones de la norma UNE-EN 13279-2<sup>128</sup>.

<sup>127</sup> Asociación Española de Normalización (AENOR). (2008). UNE-EN 13279-1 Yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción. Parte 1: Definiciones y especificaciones.

<sup>128</sup> Asociación Española de Normalización (AENOR). (2014). UNE-EN 13279-2 Yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción. Parte 2: Métodos de ensayo.



La Tabla 6.2 recoge las características más relevantes del producto incluidas en su ficha técnica.

<b>Conductividad térmica</b>	0,30 W/m.K (Gelsa – GA) (según UNE-EN 13279-1)
<b>Factor de difusión de vapor de agua (<math>\mu</math>)</b>	6
<b>Reacción al fuego</b>	A1
<b>Resistencia a flexión</b>	> 3,50 N/mm <sup>2</sup> (Gelsa – GA)
<b>Índice de pureza</b>	> 92 % (Gelsa – GA)
<b>Granulometría</b>	0,00-0,20 mm
<b>Relación agua/polvo</b>	0,8-1,00 Litros/Kg (Gelsa – GA)
<b>Tiempo de fraguado (min)</b>	13-25 min
<b>PH</b>	> 6

Tabla 6.2. Características de la escayola IBERYOLA E-35<sup>129</sup>

Cuenta con el marcado CE y el certificado de garantía del fabricante Marca N de AENOR, según reglamento particular del producto (RP 35.02). Asimismo, el fabricante realiza una evaluación de la sostenibilidad del producto cuyos resultados se recogen en la declaración ambiental de producto S-P-05051. El estudio es tipo de la cuna a la puerta, considerando únicamente las etapas de fabricación y transporte al cliente.

Además de la caracterización proporcionada por el fabricante del conglomerante, se llevan a cabo los ensayos de densidad real, densidad aparente y granulometría por difracción láser según los procedimientos descritos en el CAPÍTULO 5. Metodología.

### 6.1.1. Densidad aparente y densidad real

La Tabla 6.3 muestra los datos relativos a la densidad aparente y densidad real de la escayola. Analizando estos datos, se obtiene una porosidad o volumen de poros del 66,5 %.

<b>Densidad aparente</b>	831,25 Kg/m <sup>3</sup>
<b>Densidad real</b>	2.481,74 Kg/m <sup>3</sup>

Tabla 6.3. Densidad aparente y densidad real de la escayola

<sup>129</sup> Saint-Gobain Placo Ibérica S.A. (2020). Ficha técnica. Iberyola. Yesos y plastes.

### 6.1.2. Granulometría por difracción láser

La muestra a ensayar se corresponde con el pasa del tamiz de 1,40 mm, el equipo no admite tamaños de partícula superiores a los 2 mm. Los valores resultantes del ensayo de granulometría por difracción láser se detallan en la Tabla 6.4.

Material		Tamaño de partículas ( $\mu\text{m}$ )				
		< 10 %	< 25 %	< 50 %	< 75 %	< 90 %
Escayola tipo A	Muestra 1	3,23	5,64	15,97	42,38	88,09
	Muestra 2	3,16	-	15,16	-	84,34
	Media	3,20	5,64	15,57	42,38	86,22

Tabla 6.4. Resultados del ensayo de granulometría por difracción láser de la escayola

De los datos obtenidos se concluye que el 10% de la escayola tiene un tamaño de partícula inferior a 3,20  $\mu\text{m}$ , el 50% no supera las 15,57  $\mu\text{m}$  y el 90% tiene una dimensión menor de 86,22  $\mu\text{m}$ .

En las gráficas de granulometría se observa que, aun siendo la muestra el pasa del tamiz de 1,4 mm, el 100% de la misma tiene un tamaño de partícula inferior a 1 mm. En consecuencia, se deduce que el proceso de tamizado no afecta en los resultados obtenidos dado el tamaño de partícula predominante en dicho material.

En el Anexo 1 se incluyen los informes del ensayo que contienen las gráficas granulométricas.

## 6.2. Residuo de poliuretano

El elemento diferenciador de esta investigación es la incorporación de residuo de poliuretano en mezclas y prefabricados de yeso en sustitución de conglomerante. El estudio comprende diferentes desechos o subproductos de poliuretano procedentes de diversos sectores del tejido industrial nacional. Todos ellos pertenecen al grupo de polímeros termoestables.

Este apartado incluye la caracterización de cada uno de ellos, determinando sus propiedades físicas, químicas y microscópicas principales.

A continuación, se recoge la descripción de cada uno de los residuos de poliuretano incluidos en la investigación según la nomenclatura asignada:

- I: Residuo de espuma rígida de poliuretano amarillo suministrado en forma de bloque (Figura 6.2). Este desecho procede de la fabricación de paneles aislantes para la industria de refrigeración, específicamente de la empresa ITALPANNELLI IBÉRICA SA cuya fábrica se localiza en La Almunia de Doña Godina (Zaragoza).



Figura 6.2. Residuo de poliuretano tipo I según el formato suministrado (izquierda) y tras el proceso de trituración (derecha)

- B: Residuo de espuma rígida de poliuretano amarillo proporcionado en forma de bloque (Figura 6.3). Los rechazos y restos de paneles empleados en la realización de ensayos en fábrica constituyen este residuo. Este desecho resulta de la fabricación de paneles aislantes para la industria de refrigeración, específicamente de la empresa PANELES AISLANTES PENINSULARES SL (PAP) cuya planta se localiza en Cuenca.



Figura 6.3. Residuo de poliuretano tipo B según el formato suministrado (izquierda) y tras el proceso de trituración (derecha)

- P: Residuo de espuma rígida de poliuretano amarillo en polvo con forma de pellet (polvo comprimido) (Figura 6.4). El polvo resultante del refinado y perfilado de los bordes de los paneles de aislamiento constituye este residuo. Con el fin de reducir su volumen de almacenamiento en la fábrica, el generador del residuo lo transforma y comprime en forma de pellets. Este desecho resulta de la fabricación de paneles aislantes para la industria de refrigeración y también procede de la empresa PANELES AISLANTES PENINSULARES SL (PAP).



Figura 6.4. Residuo de poliuretano tipo P según el formato suministrado (izquierda) y tras el proceso de trituración (derecha)

- A: Residuo de espuma rígida de poliuretano gris oscuro en polvo recibido en forma de pellet (polvo comprimido) (Figura 6.5). El polvo resultante de la fabricación de ciertos componentes de vehículos constituye este residuo. Procede de la industria de la automoción, específicamente de la multinacional española GRUPO ANTOLÍN, con sede en Burgos.



Figura 6.5. Residuo de poliuretano tipo A según el formato suministrado (izquierda) y tras el proceso de trituración (derecha)

- AT: Residuo de espuma rígida de poliuretano gris oscuro suministrado en forma de lámina (Figura 6.6). Procede del sector del automóvil, se emplea específicamente en la elaboración de los techos de los coches. Procede del sector automovilístico, en concreto, de la empresa burgalesa GRUPO ANTOLÍN.

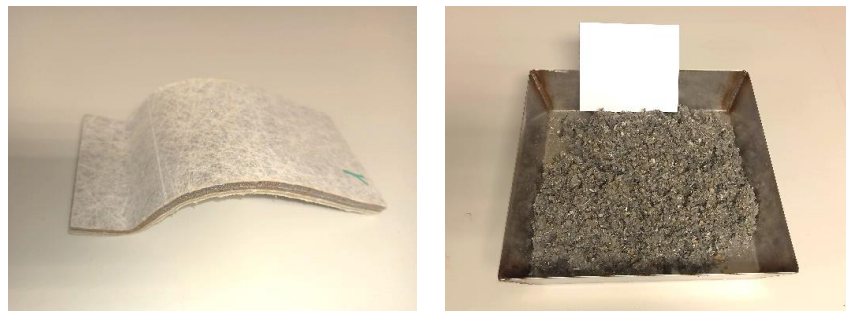


Figura 6.6. Residuo de poliuretano tipo AT según el formato suministrado (izquierda) y tras el proceso de trituración (derecha)

- SG: Residuo de espuma flexible de poliuretano amarillo recibido en forma de bloque (Figura 6.7). Este desecho procede del sector del automóvil, concretamente de los asientos del desguace de vehículos fuera de uso de la empresa SIGRAUTO, la cual cuenta con una amplia red de desguaces y fragmentadoras a nivel nacional y cuyas instalaciones principales se localizan en Madrid.



Figura 6.7. Residuo de poliuretano tipo SG según el formato suministrado (izquierda) y tras el proceso de trituración (derecha)

- BU: Residuo de espuma rígida de poliuretano amarillo en forma de gránulo (Figura 6.8). Este desecho se genera en la fabricación de depósitos que precisan de aislamiento térmico. El aislamiento utilizado es espuma de poliuretano proyectada, la cual es preciso

pulir para proceder con la posterior colocación del revestimiento exterior del producto. La industria generadora del residuo es BURGALESA DEL POLIESTER SL, con sede en Burgos.



Figura 6.8. Residuo de poliuretano tipo BU según el formato suministrado (izquierda) y tras el proceso de trituración (derecha)

- ES: Residuo a base de resina de poliuretano de diferentes colores y con forma sólida variable según el conformado elaborado (Figura 6.9). Este desecho procede de las presas de escalada que o bien no han superado el control de calidad en el proceso de fabricación o bien han sido retiradas del rocódromo una vez finalizada su etapa de uso. La industria que genera y recoge el residuo es EUROHOLDS GROUP, situada en Játiva (Valencia).



Figura 6.9. Residuo de poliuretano tipo ES según el formato suministrado (izquierda) y tras el proceso de trituración (derecha)

La Tabla 6.5 recoge un resumen detallado de los distintos tipos de residuo de poliuretano considerados, incluyendo la nomenclatura con la que referirse a cada uno de ellos, la empresa generadora o productora del desecho, el sector industrial de procedencia, el producto de origen y la forma en la que se recepciona.

Nomenclatura	Empresa	Sector	Origen	Forma
I	ITALPANNELLI	Refrigeración	Panel de aislamiento	Bloque
B	PAP	Refrigeración	Recorte de panel de aislamiento	Bloque
P	PAP	Refrigeración	Fresado de panel de aislamiento	Pellet
A	GRUPO ANTOLÍN	Automoción	Fabricación de coches	Pellet
AT	GRUPO ANTOLÍN	Automoción	Techo de coche	Lámina
SG	SIGRAUTO	Automoción	Asiento de coche	Bloque
BU	BURGALESA DEL POLIESTER	Industrial	Aislamiento de depósito	Gránulo
ES	EUROHOLDS	Industrial	Presa de escalada	Variable

Tabla 6.5. Resumen de los diferentes tipos de residuos de poliuretano

Para incorporar esta materia prima en las mezclas de yeso es preciso someter a los diferentes residuos a un proceso de trituración. Los desechos tipo I, B, SG y AT, recepcionados en forma de bloque o lámina de grandes dimensiones, precisan de una fase de acondicionamiento previa al triturado que consiste en cortar con un cúter el residuo en pequeñas piezas que puedan introducirse en la máquina trituradora (Figura 6.10). El tamaño de la muestra ES se reduce por golpeo. Por otro lado, los residuos tipo A, P y BU, los cuales presentan un tamaño mas reducido, se introducen directamente en la trituradora.



Figura 6.10. Residuos tipo B y ES reducidos a piezas de menor tamaño antes de su trituración

El procesado es de tipo mecánico y el molino de trituración empleado es el RETSCH SM100 (Figura 6.11), con una potencia de 1.500 W y ubicado en los laboratorios de la Universidad de Burgos (UBU). Las muestras de poliuretano introducidas se trituran y tamizan según los tamices de malla de 2,00 mm y 4,00 mm disponibles.



Figura 6.11. Equipo RETSCH SM100 empleado en la trituración del residuo de poliuretano

La Figura 6.12 muestra diferentes tipos de residuo de poliuretano una vez procesados.

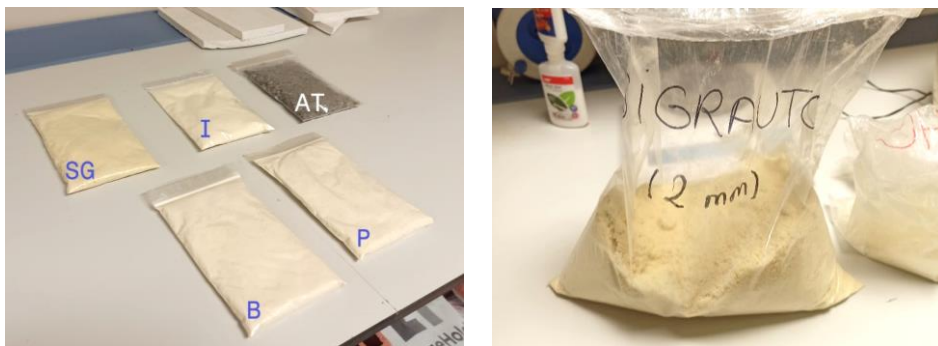


Figura 6.12. Muestras de residuo de poliuretano triturado

Esta etapa de acondicionamiento previo es necesaria para transformar el residuo y poder valorizarlo como materia prima y varía considerablemente dependiendo del tipo de poliuretano. Durante el transcurso de esta fase se toma nota de diferentes parámetros como el tiempo empleado en el proceso de corte previo, el tiempo necesario de trituración y la energía consumida por la maquinaria empleada (Tabla 6.6). Se utiliza de referencia el procesado completo de 1 Kg de residuo.



Tipo de residuo de poliuretano	Tiempo de cortado (H/Kg)	Tiempo de triturado (H/Kg)	Energía consumida (KwH/Kg)
I	0,58	0,33	0,50
B	0,75	0,45	0,68
P	NN	0,10	0,15
A	NN	0,42	0,63
AT	0,58	0,67	1,01
SG	1,00	1,50	2,25
BU	NN	0,22	0,33
ES	x	x	x

NN = No es necesario

Tabla 6.6. Parámetros relativos al procesado del residuo de poliuretano

La energía consumida se calcula teniendo en cuenta el tiempo de triturado y la potencia del equipo empleado en este proceso.

El procesado del poliuretano tipo ES resulta altamente laborioso y lento dada la dureza y resistencia a la fragmentación del material. Ello imposibilita la toma de datos relativos a este material en esta fase. El resto de residuos de poliuretano presenta una etapa de acondicionamiento más amable permitiendo el análisis completo del proceso.

El residuo tipo SG se presenta en bloques de gran formato cuyo volumen condiciona el tiempo de corte y triturado, presentando los valores más altos de entre todas las muestras. Le siguen los desechos tipo I, B, A y AT con datos relativos al consumo de energía intermedios. Por último, los poliuretanos tipo P y BU muestran los tiempos más cortos y, por tanto, los mejores resultados en cuanto a la fase de procesado.

Se concluye que los parámetros relativos a la duración del proceso de corte y triturado y, en consecuencia, al consumo de energía eléctrica de esta etapa de preparación previa están condicionados por la forma y volumen de recepción del polímero, así como, por su resistencia al corte y trituración.

A continuación, se procede a la caracterización detallada de cada uno de ellos, determinando sus propiedades físicas, químicas, microscópicas, higroscópicas y térmicas principales.

### 6.2.1. Caracterización física

Se incluyen los resultados obtenidos en los ensayos de densidad aparente, densidad real, granulometría por difracción láser y termogravimetría realizados con el propósito de determinar y analizar las propiedades físicas más relevantes de los polímeros.

#### 6.2.1.1. Densidad aparente y densidad real

Los resultados obtenidos para las propiedades de densidad aparente del poliuretano sin procesar y procesado y densidad real del residuo procesado se recogen en la Tabla 6.7.

Tipo de residuo de poliuretano	Densidad aparente sin procesar (Kg/m <sup>3</sup> )	Densidad aparente procesado (Kg/m <sup>3</sup> )	Densidad real procesado (Kg/m <sup>3</sup> )
I	33,8	54,1	1.105,0
B	37,6	45,9	1.370,9
P	451,4	150,0	1.052,7
A	212,5	130,8	1.378,6
AT	71,2	109,0	1.761,6
SG	33,1	92,9	1.211,1
BU	38,5	93,0	908,9
ES	1.121,7	688,7	1.133,3

Tabla 6.7. Densidad aparente y densidad real de los residuos de poliuretano

El poliuretano tipo ES presenta densidades aparentes excesivamente elevadas con respecto al resto de residuos mientras que la densidad real se mantiene similar al resto. Ello puede ser debido a la estructura de tipo laminar con ausencia de poros observada a nivel microestructural en el ensayo de microscopía electrónica de barrido.

La densidad aparente sin procesar de los residuos tipo P y A es notablemente superior a la del resto, no obstante, ambos polímeros se suministran en forma de pellet que se elabora comprimiendo el polvo. Se concluye que estos resultados se deben a la eliminación la porosidad y reducción de volumen que conlleva este proceso.

Los valores obtenidos de densidad aparente del poliuretano procesado se sitúan en una horquilla de 46 a 150 Kg/m<sup>3</sup>, a excepción del tipo ES, los cuales se entienden razonables en este tipo de polímeros. Por otro lado, todos ellos presentan una densidad aparente inferior a 800 Kg/m<sup>3</sup>, por lo que pueden considerarse como agregados ligeros<sup>130</sup>.

En cuanto a la densidad real de los residuos procesados destaca la del residuo tipo AT, ligeramente superior a las del resto, mientras que el poliuretano tipo BU presenta el menor dato.

Del análisis de la densidad real y la densidad aparente sin procesar se obtienen los datos relativos al volumen de poros o porosidad del residuo en su estado de recepción (Tabla 6.8), ello concuerda con la estructura interna visualizada en el ensayo MEB.

	I	B	P	A	AT	SG	BU	ES
<b>Porosidad (%)</b>	96,9	97,3	57,1	84,6	96,0	97,3	95,8	1,0

Tabla 6.8. Porosidad de los residuos de poliuretano sin procesar

Los residuos de poliuretano estudiados son todos de tipo espumoso, con excepción del tipo ES. El proceso de gasificación interno en la mezcla de los bicomponentes da lugar a un elevado volumen de poros, próximo al 96,5 % del volumen total. Los polímeros tipo P y tipo A presentan unos resultados de porosidad desvirtuados debido al conformado del pellet. El residuo tipo ES presenta una estructura interna completamente diferente con ausencia de poros y debido a su proceso de fabricación. Estos valores no son aplicables al poliuretano triturado dado que este proceso modifica considerablemente la forma y tamaño de las partículas y de los huecos, modificando la porosidad total.

### 6.2.1.2. Granulometría por difracción láser

Las Tabla 6.9 y Tabla 6.10 incluyen los datos resultantes del ensayo de granulometría por difracción láser para los distintos tipos de poliuretano. Se analiza el pasa de los tamices de 0,5 mm y de 2 mm.

<sup>130</sup> Asociación Española de Normalización (AENOR). (2008). UNE-EN 13279-1 Yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción. Parte 1: Definiciones y especificaciones.

Tipo de residuo de PU	Tamaño de partículas ( $\mu\text{m}$ )				
	< 10 %	< 25 %	< 50 %	< 75 %	< 90 %
I	63,54	117,70	194,30	299,90	410,70
B	44,14	82,62	131,70	191,80	259,40
P	62,53	125,30	229,10	371,20	521,10
A	84,48	153,30	271,30	433,30	619,90
AT	-	-	-	-	-
SG	110,80	227,90	401,00	579,90	772,70
BU	-	-	-	-	-
ES	-	-	-	-	-

Tabla 6.9. Granulometría por difracción láser de los residuos de poliuretano (pasa tamiz 0,5 mm)

Tipo de residuo de PU	Tamaño de partículas ( $\mu\text{m}$ )				
	< 10 %	< 25 %	< 50 %	< 75 %	< 90 %
I	68,88	-	207,70	-	504,00
B	49,75	-	162,20	-	504,70
P	61,59	-	339,80	-	1.205,00
A	85,88	-	303,70	-	878,90
AT	-	-	-	-	-
SG	114,90	-	528,70	-	1.207,00
BU	252,80	691,70	1.102,00	1.489,00	1.774,00
ES	426,70	815,40	1.184,00	1.521,00	1.780,00

Tabla 6.10. Granulometría por difracción láser de los residuos de poliuretano (pasa tamiz 2 mm)

En los resultados de granulometría de las muestras de pasa del tamiz de 0,5 mm se observa la presencia de partículas con tamaño superior a la malla del tamiz, lo que se debe al paso de éstas por la diagonal de la cuadrícula. Estos resultados no pueden extrapolarse a muestras con mayor tamaño de partícula ya que el proceso de tamizado si influye considerablemente en la muestra.

En los resultados obtenidos para las muestras con tamaño de partícula inferior a 2 mm se observa que, el mayor tamaño de partícula notificado es de 1,78 mm. En consecuencia, se entiende que el proceso de tamizado no disminuye la representatividad del material ya que en dicho rango de tamaños se encuentran al menos el 90 % de las partículas. En este análisis se observa que los residuos de poliuretano presentan un tamaño de grano muy superior al del yeso. El 90% de las partículas del conglomerado tienen un tamaño inferior a 86  $\mu\text{m}$  mientras que en los polímeros este tamaño supone únicamente alrededor del 10 %. El 90 % de las partículas de poliuretano tienen un tamaño inferior que se sitúa en un rango de 500 a 1.800  $\mu\text{m}$ .

Las diferentes muestras de residuo analizadas carecen de uniformidad en cuanto al tamaño de partícula, por lo que no se puede deducir un tamaño de grano generalizado para la familia de poliuretanos.

La muestra de residuo tipo AT tiene una textura de tipo textil, caracterizada por tener unas partículas muy unidas a otras, que hace que sea prácticamente imposible la realización de este ensayo en dicha muestra.

En el Anexo 1 se incluyen las gráficas granulométricas resultantes del este ensayo para cada tipo de polímero según los tamaños de partícula de 0,5 y de 2 mm.

## **6.2.2. Caracterización química**

En esta sección se detallan los resultados obtenidos de las propiedades químicas de los distintos residuos de poliuretano. Se realizan los ensayos de análisis elemental (CHNS) y de lixiviación.

### **6.2.2.1. Análisis Elemental (CHNS)**

Los resultados obtenidos del ensayo de Análisis Elemental (CHNS) se muestran en la Tabla 6.11.

Los poliuretanos presentan proporciones similares en cuanto a los elementos químicos analizados, con excepción del tipo AT que contiene una menor relación de carbono, hidrógeno y nitrógeno en beneficio de un elemento químico no detectable en este ensayo y que se recoge en el apartado de otros.

Tipo de residuo de poliuretano	Elemento químico (%)				
	C	H	N	S	Otros
I	63,34	5,58	7,28	0,00	23,80
B	62,06	5,07	6,58	0,00	26,29
P	64,48	5,63	6,74	0,00	23,15
A	63,74	6,15	6,04	0,00	24,07
AT	47,33	4,20	3,05	0,00	45,42
SG	64,67	7,75	4,80	0,00	22,78
BU	63,77	6,82	6,62	0,00	22,79
ES	67,32	7,98	6,90	0,00	17,80

Tabla 6.11. Análisis elemental (CHNS) de los residuos de poliuretano

Este ensayo permite confirmar la presencia de carbono, hidrógeno y nitrógeno en las materias primas evaluadas y la ausencia de azufre.

#### 6.2.2.2. Lixiviación

Del ensayo de lixiviación de las diferentes muestras de residuo de poliuretano se obtienen los resultados detallados en la Tabla 6.12. También se lleva a cabo un ensayo en blanco sobre agua destilada para verificar el proceso de lixiviación.

Materia prima	pH	CT ( $\mu\text{s/cm}$ )	Sal (mg/L)	SDT (mg/L)
Agua destilada	6,6	1,86	Fuera de escala	1,24
I	6,8	32,78	15,3	20,7
B	7,5	63,40	28,3	40,5
P	6,6	30,80	14,3	19,7
A	7,7	33,80	15,6	21,5
AT	-	-	-	-
SG	7,9	149,2	69,0	95,4
BU	-	-	-	-
ES	-	-	-	-

Tabla 6.12. Ensayo de lixiviación de los residuos de poliuretano

Los residuos de poliuretano presentan, de forma generalizada, un valor de pH de hasta un 20 % superior al del agua destilada. La conductividad eléctrica (CT) y la cantidad de sólidos disueltos totales (SDT) también presentan resultados más elevados.

### **6.2.3. Caracterización microscópica**

En este apartado se detallan las propiedades microscópicas de los distintos residuos de poliuretano. Se realizan los ensayos de Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) y Tomografía Axial (micro)Computarizada (TAC).

#### **6.2.3.1. Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)**

Del ensayo de Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) se obtienen las siguientes imágenes relativas a la estructura interna de las muestras de poliuretano. En ellas se observa el tipo de estructura celular o laminar y la tipología de las celdas, abierta o cerrada.

En la Figura 6.13 se muestran las imágenes obtenidas con el microscopio electrónico de barrido de una muestra de residuo de poliuretano tipo I. Este poliuretano presenta una estructura de celda cerrada con un tamaño de poro homogéneo de entre 200 y 400  $\mu\text{m}$ . Por otro lado, no se observa contaminación en la muestra.

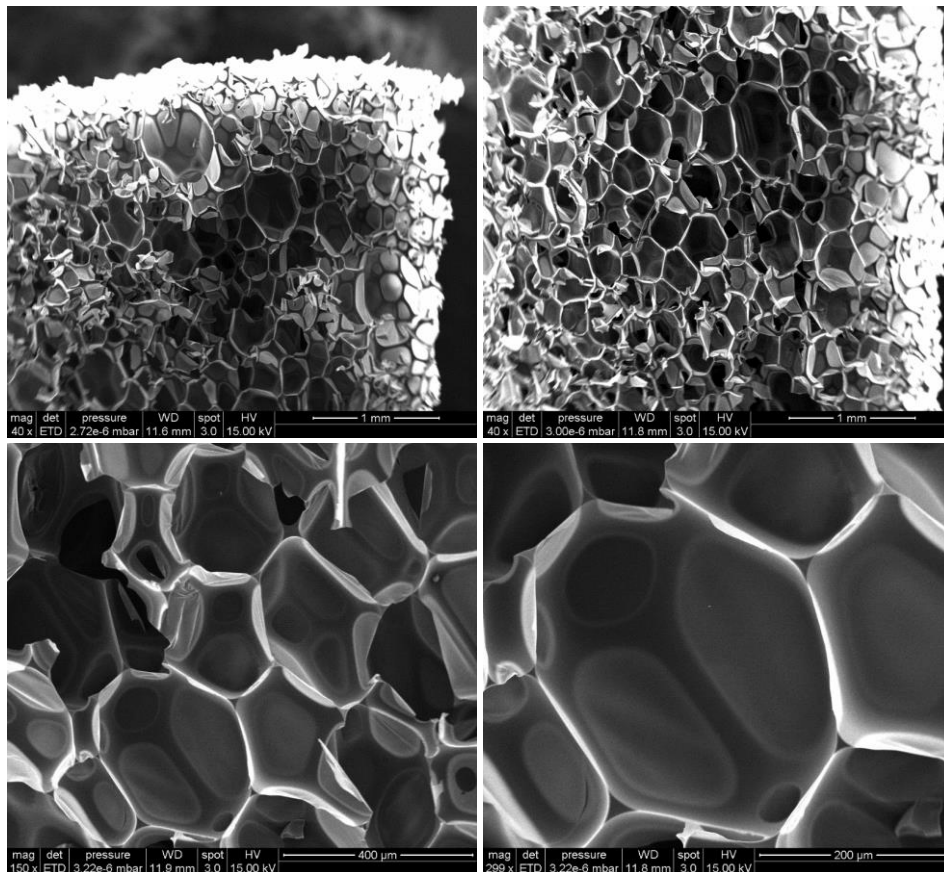


Figura 6.13. MEB residuo tipo I (40x, 150x y 299x)



Respecto de la estructura interna del residuo tipo B, se observa que también presenta una estructura homogénea de celdas cerradas de dimensiones entre 10-300  $\mu\text{m}$  (Figura 6.14). El proceso de trituration provoca la unión o conexión de estas celdas, permitiendo el paso de aire entre los orificios.

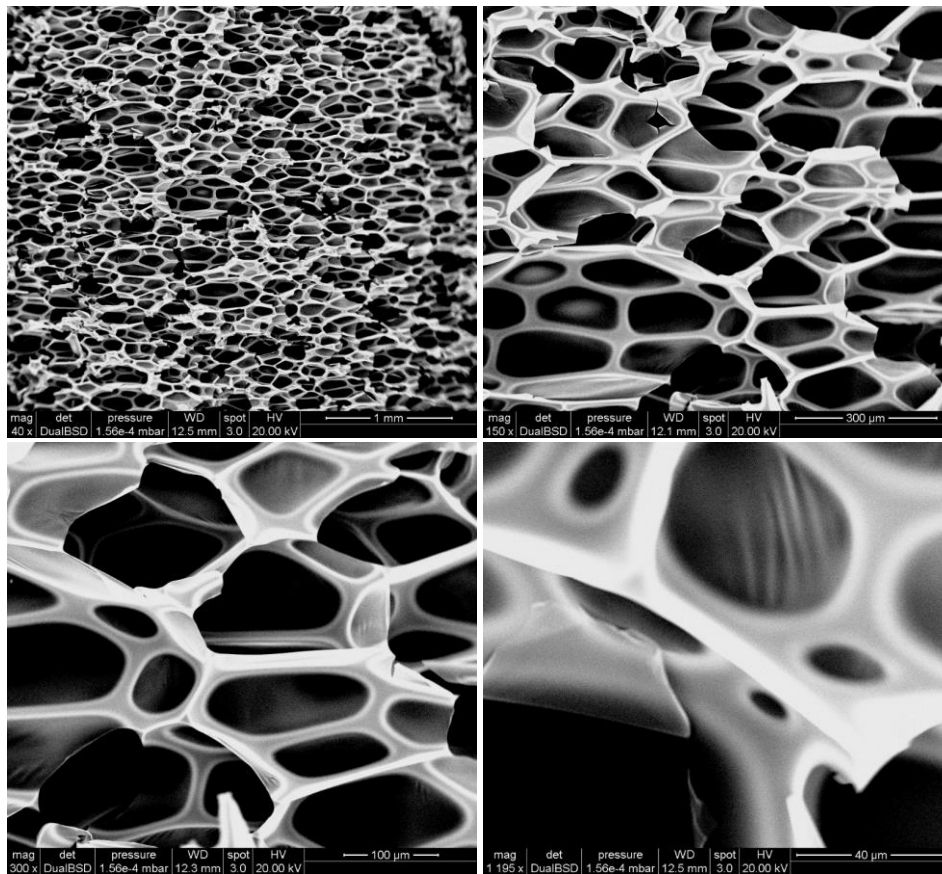


Figura 6.14. MEB residuo tipo B (40x, 150x, 300x y 1195x)

En la Figura 6.15 se muestran las imágenes obtenidas en el ensayo de microscopía electrónica de barrido para una muestra de residuo de poliuretano tipo P. Este poliuretano presenta una estructura laminar desordenada en la que predomina la pared de la celda de poliuretano. En ocasiones se observan las láminas agrupadas, consecuencia del proceso de compactación del residuo en forma de pellet. El proceso, previo a la recepción, de molienda y compactación a nivel industrial que experimenta este residuo supone la pérdida de su estructura de celdas original.

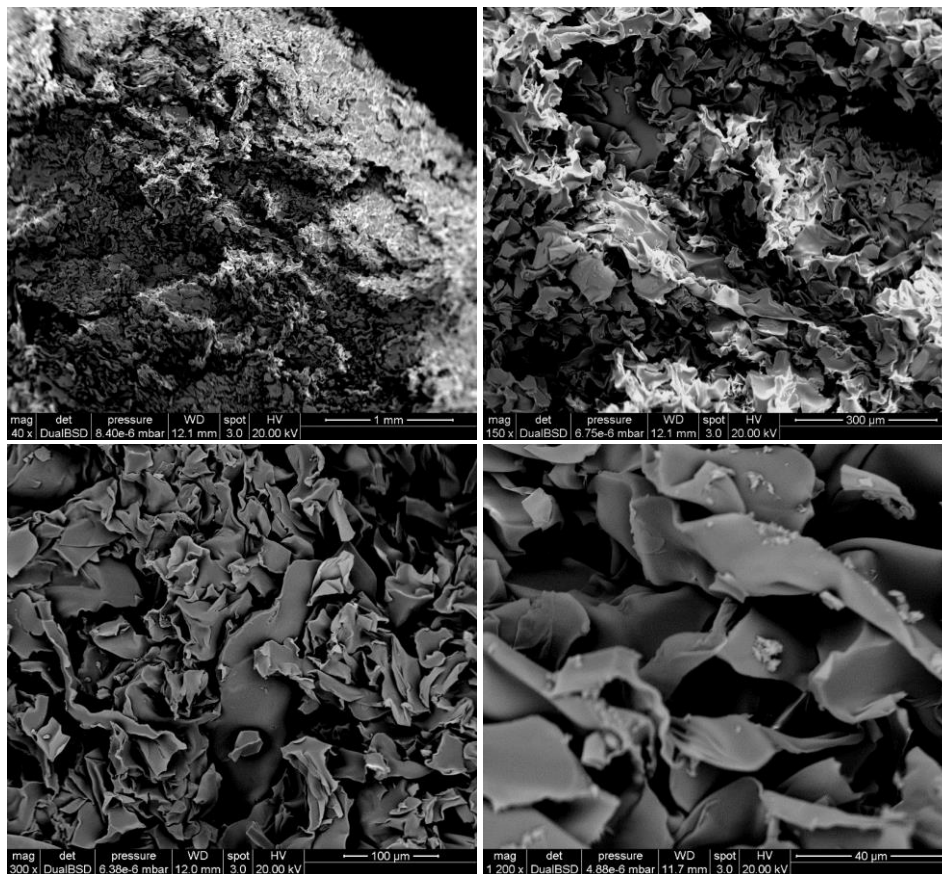


Figura 6.15. MEB residuo tipo P (40x, 150x, 300x y 1.200x)

Respecto de la estructura interna del residuo tipo A (Figura 6.16), se observa una estructura laminar ordenada cuyas laminas están dispuestas de forma paralela, todas ellas en la misma dirección, y en la que predomina la pared de la celda de poliuretano. El proceso, previo a la recepción, de molienda y compactación a nivel industrial que experimenta este residuo supone la pérdida de su estructura de celdas original.

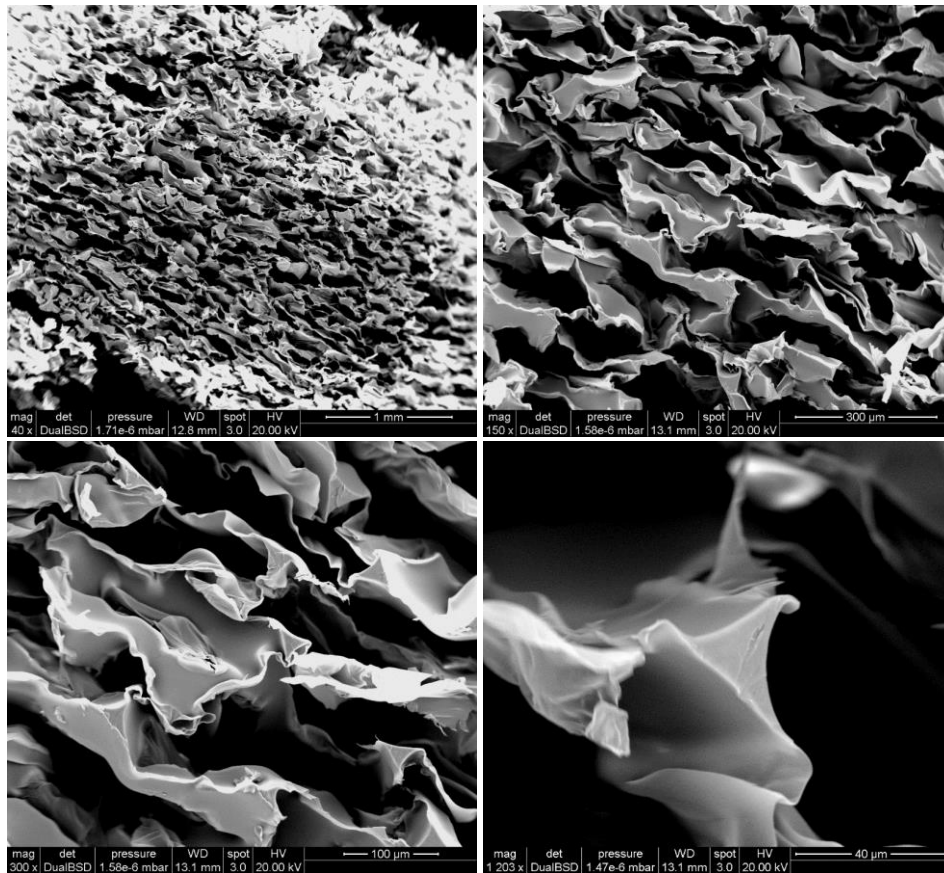


Figura 6.16. MEB residuo tipo A (40x, 150x, 300x y 1.203x)

Sobre el residuo de poliuretano tipo AT no ha sido posible llevar a cabo la microscopía electrónica de barrido debido a la estructura laminar del mismo.

En la Figura 6.17 se muestran las imágenes obtenidas para una muestra de residuo de poliuretano tipo SG. Este poliuretano presenta una estructura de celdas abiertas de varias dimensiones, con celdas conectadas entre sí que permiten el paso del aire entre los orificios. La dimensión de las celdas oscila de 0,1 a 500  $\mu\text{m}$ . Se observa la existencia de poros en las paredes de la estructura y la influencia de la fase de procesado sobre la muestra, que ocasiona la rotura de las celdas.

Por otro lado, se aprecia que la muestra está contaminada por elementos de diversa naturaleza (cobre o hierro). Por ejemplo, en las imágenes obtenidas a 148 y 300 aumentos se observa una partícula de cobre (Cu).

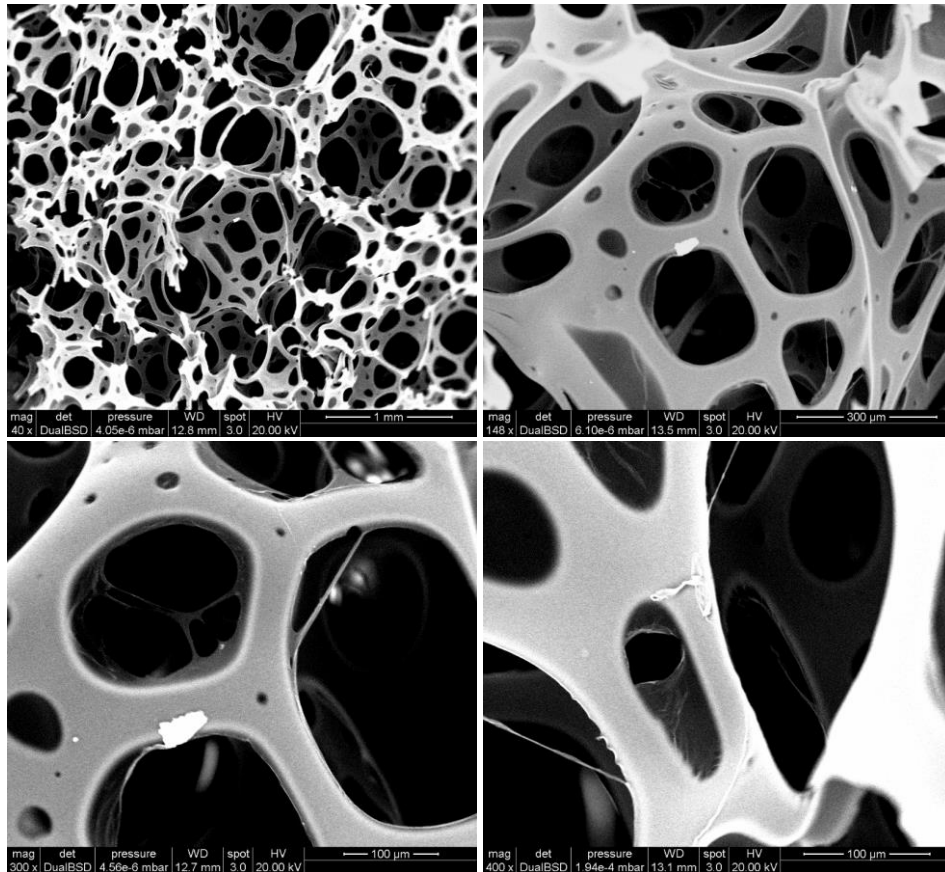


Figura 6.17. MEB residuo tipo SG (40x, 148x, 300x y 400x)

La Figura 6.18 incluye las imágenes relativas al residuo de poliuretano tipo BU obtenidas a través del microscopio electrónico de barrido. Se observa una estructura homogénea y celular, con un tamaño de celda de 100 a 200  $\mu\text{m}$  conectadas entre sí. Este residuo procede del proceso de pulido del poliuretano, lo cual se puede observar con la rotura y desgarro de las partículas más superficiales.

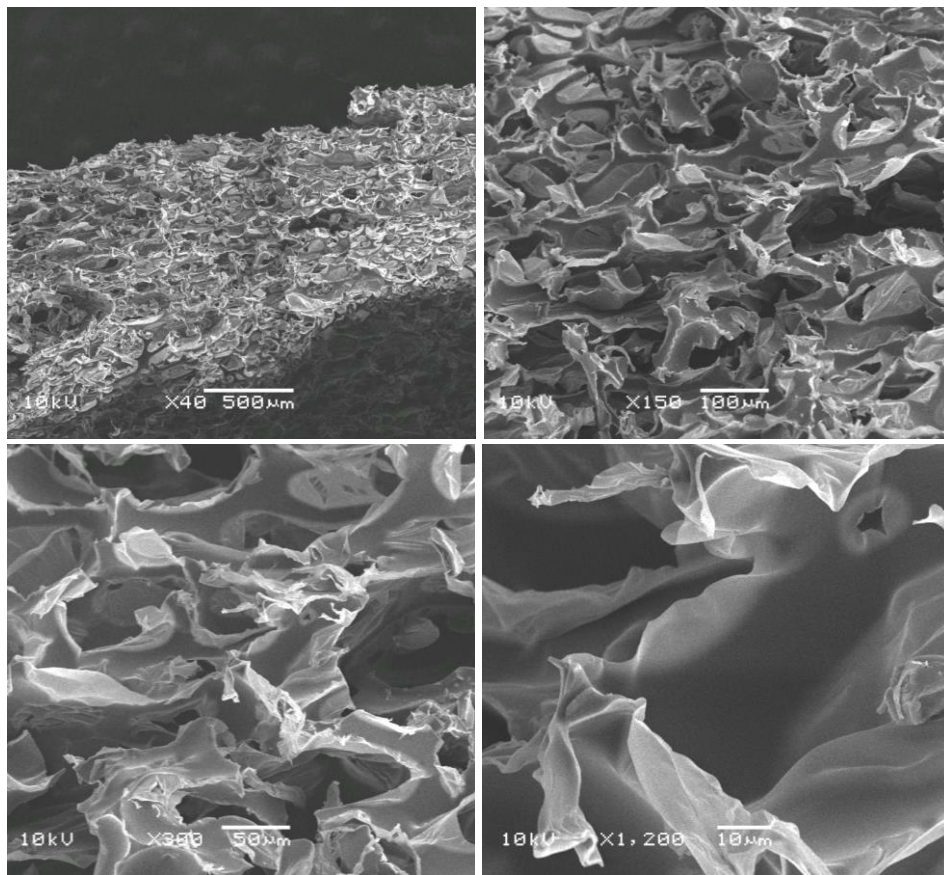


Figura 6.18. MEB residuo tipo BU (40x, 150x, 300x y 1.200x)

La superficie del residuo de poliuretano no espumoso tipo ES se observa en la Figura 6.19. Las imágenes muestran una estructura laminar ordenada con ausencia total de poros debido a su red sólida y compacta.

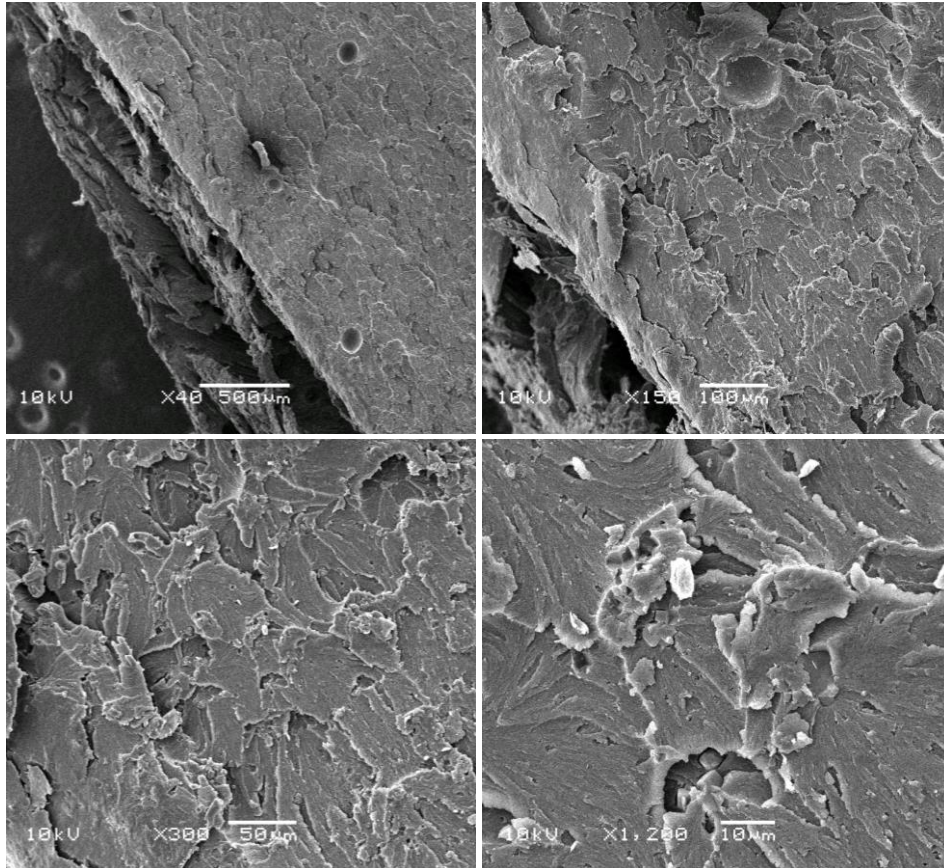


Figura 6.19. MEB residuo tipo ES (40x, 150x, 300x y 1.200x)

### 6.2.3.2. Tomografía Axial Computarizada (TAC)

A continuación, se muestran las imágenes obtenidas en el análisis tomográfico de los diferentes poliuretanos en su estado de recepción. Ello permite conocer la red de celdas o láminas en volumen de cada residuo.

Las Figura 6.20 y Figura 6.21 incluye las imágenes obtenidas para diferentes tipos de polímeros en el ensayo de tomografía axial (micro)computarizada.

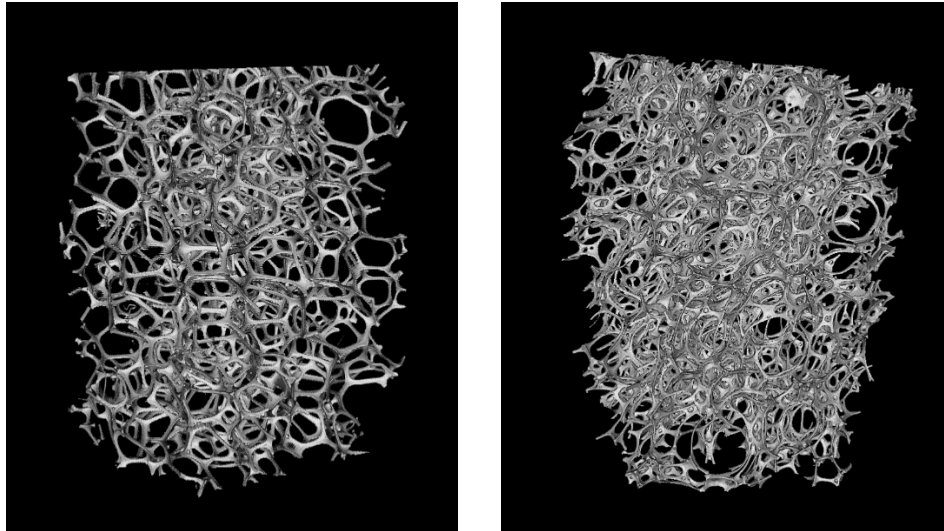


Figura 6.20. TAC residuos de poliuretano tipo A y tipo SG, respectivamente

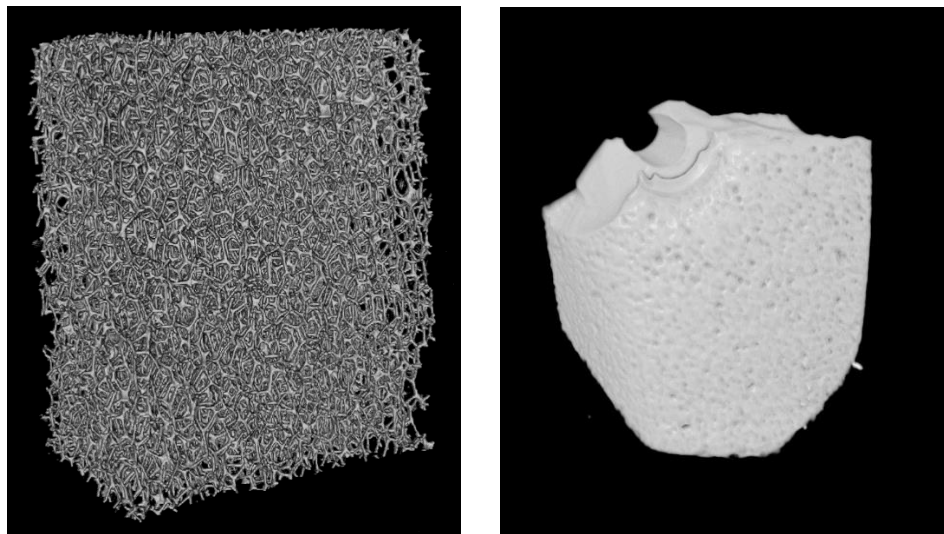


Figura 6.21. TAC residuos de poliuretano tipo I y tipo ES, respectivamente

Los residuos tipo A, tipo SG y tipo I presentan una estructura muy porosa debido a la disposición en forma de red o celda de las partículas. El residuo tipo ES difiere de forma considerable del resto de polímeros analizados, presentando una estructura laminar sólida y maciza con un grado de porosidad muy reducido.

## 6.2.4. Caracterización higroscópica

El análisis de las prestaciones higroscópicas del poliuretano reciclado se limita a determinar la absorción de agua por inmersión.

### 6.2.4.1. Absorción de agua por inmersión

La Tabla 6.13 recoge los resultados obtenidos de absorción de agua por inmersión para los diferentes tipos de residuos de poliuretano.

Tipo de residuo de poliuretano	Absorción de agua sin procesar (%)
I	49,0
B	28,0
P	2,0
A	333,5
AT	373,0
SG	645,0
BU	911,3
ES	1,6

Tabla 6.13. Absorción de agua por inmersión de los residuos de poliuretano

El ensayo de absorción de agua por inmersión se realiza sobre las muestras sin procesar o pre-procesadas. Los resultados obtenidos se asumen relativos dada la influencia en dichos valores de la superficie específica de cada muestra. Ejemplo de ello es el elevado valor obtenido para el material tipo BU, que es el único poliuretano suministrado en pequeñas partículas o gránulos. Destacan la baja absorción de los polímeros tipo ES, debido a su baja porosidad, tipo I, tipo B y tipo A. El conformado de tipo pellet no afecta de manera significativa en este parámetro dadas las diferencias que presentan los resultados de los residuos tipo A y tipo P, ambos con forma de pellet.

## 6.2.5. Caracterización térmica

En análisis de las propiedades de carácter térmico de los residuos de poliuretano comprende la realización del ensayo de termogravimetría.



### 6.2.5.1. Termogravimetría (TGA)

Este análisis permite determinar la temperatura de degradación de cada residuo, delimitando la temperatura de cada tipo de poliuretano.

En la Tabla 6.14 se detallan los tramos de temperatura en los que se produce primera degradación (PD) y la segunda degradación (SD), así como la respectiva pérdida de masa. Se incluye el residuo final y la temperatura de inflexión (puntos de mayor pérdida de masa).

Tipo de residuo de poliuretano	Primera degradación (PD) (°C)	Temp. inflexión PD (°C)	Segunda degradación (SD) (°C)	Temp. inflexión SD (°C)	Residuo final (%)
I	275-400 (35 %)	343	400-600 (21 %)	446	24,30
B	150-250 (11 %)	203	250-525 (56 %)	328	25,20
P	150-250 (14 %)	210	250-525 (57 %)	308	22,59
A	250-375 (52 %)	317	375-450 (22 %)	398	15,56
AT	250-350 (18 %)	315	350-450 (30 %)	407	40,19
SG	250-350 (14 %)	321	350-450 (62 %)	388	10,98
BU	150-250 (11 %)	215	250-550 (70 %)	335-397	18,69
ES	225-300 (14 %)	264	300-500 (67 %)	388	6,03

Tabla 6.14. Ensayo de termogravimetría (TGA) de los residuos de poliuretano

El tramo de degradación inicial se sitúa de los 150 a 400 °C. Los residuos que experimentan una pérdida de masa más temprana son el tipo B, tipo P y tipo BU, mientras que los tipo I, tipo A, tipo AT y tipo SG soportan mayores temperaturas antes de la primera degradación. Lo mismo sucede para la segunda degradación que se sitúa entre los 250 y 600 °C. Con respecto a la cantidad de residuo final, destacan el poliuretano AT que conserva el 40 % de la masa al finalizar el ensayo y el tipo ES que únicamente mantiene el 6 %.

Las diferentes gráficas del ensayo de termogravimetría de cada residuo se incluyen en el Anexo 2.

### 6.2.6. Fichas técnicas

Una vez obtenidos los parámetros de caracterización de cada tipo de residuo de polímero, se elaboran las correspondientes fichas técnicas.

**FICHA TÉCNICA. RESIDUO DE POLIURETANO TIPO I**

<b>DENOMINACIÓN</b>	Residuo de espuma rígida de poliuretano amarillo	<b>NOMENCLATURA</b>	I
<b>ORIGEN</b>	Paneles de aislamiento del sector de refrigeración		
<b>EMPRESA</b>	ITALPANNELLI		

**PRESENTACIÓN**  
BLOQUE



Triturado y tamizado  
(pasa tamiz de 2,00 mm)

**CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS**

**COMPOSICIÓN** Polioli + isocianato (reacción química de dos componentes)

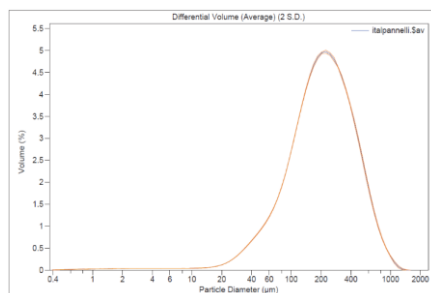
<b>ANÁLISIS ELEMENTAL</b>	<b>C</b>	64,34 %	<b>LIXIVIACIÓN</b>	<b>CT (µs/cm)</b>	32,78
	<b>H</b>	5,58 %		<b>SDT (mg/L)</b>	20,7
	<b>N</b>	7,28 %		<b>Sal (mg/L)</b>	15,3
	<b>S</b>	0,00 %		<b>pH</b>	6,8

**CARACTERÍSTICAS FÍSICAS**

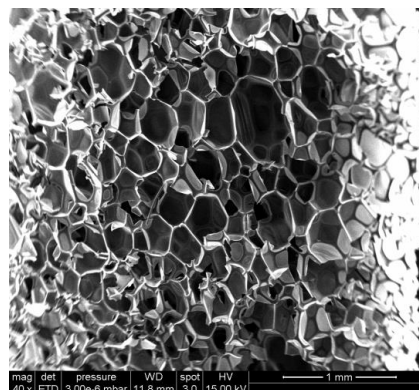
<b>COLOR</b>	Amarillo	
<b>TEXTURA</b>	Áspero	
<b>ESTADO</b>	Sólido	
<b>DENSIDAD</b>	Real	1.105,0 Kg/m <sup>3</sup>
	Aparente	54,1 Kg/m <sup>3</sup>
<b>ABSORCIÓN DE AGUA</b>	49 %	

De la muestra	Tamaño de partícula (µm)
< 10%	68,9
< 25%	-
< 50%	207,7
< 75%	-
< 90%	504,0

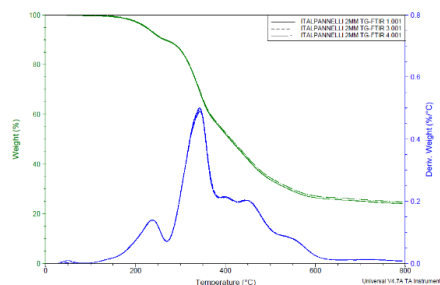
**GRANULOMETRÍA**



**MEB**



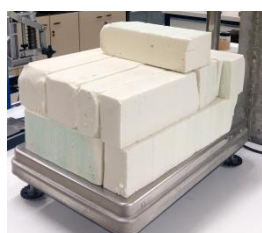
**TGA**



**FICHA TÉCNICA. RESIDUO DE POLIURETANO TIPO B**

<b>DENOMINACIÓN</b>	Residuo de espuma rígida de poliuretano amarillo	<b>NOMENCLATURA</b>	<b>B</b>
<b>ORIGEN</b>	Paneles de aislamiento del sector de refrigeración		
<b>EMPRESA</b>	Paneles Aislantes Peninsulares (PAP)		

**PRESENTACIÓN**  
BLOQUE



Triturado y tamizado  
(pasa del tamiz de 2.00 mm)

**CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS**

**COMPOSICIÓN** Poliul + isocianato (reacción química de dos componentes)

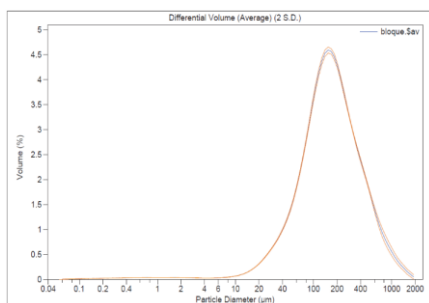
<b>ANÁLISIS ELEMENTAL</b>	<b>C</b>	62,06 %	<b>LIXIVIACIÓN</b>	<b>CT (µs/cm)</b>	63,4
	<b>H</b>	5,07 %		<b>SDT (mg/L)</b>	40,5
	<b>N</b>	6,58 %		<b>Sal (mg/L)</b>	28,3
	<b>S</b>	0,00 %		<b>pH</b>	7,5

**CARACTERÍSTICAS FÍSICAS**

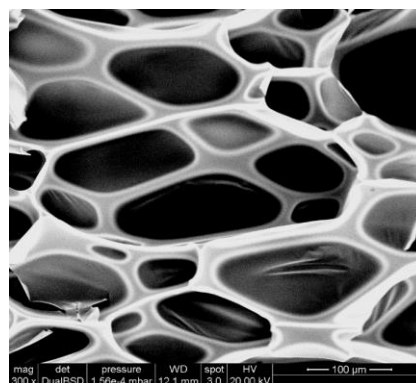
<b>COLOR</b>	Amarillo	
<b>TEXTURA</b>	Áspero	
<b>ESTADO</b>	Sólido	
<b>DENSIDAD</b>	Real	1.307,9 Kg/m <sup>3</sup>
	Aparente	45,9 Kg/m <sup>3</sup>
<b>ABSORCIÓN DE AGUA</b>	28 %	

De la muestra	Tamaño de partícula (µm)
< 10%	49,8
< 25%	-
< 50%	162,2
< 75%	-
< 90%	504,7

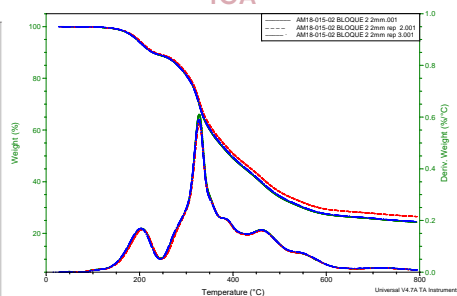
**GRANULOMETRÍA**



**MEB**



**TGA**



**FICHA TÉCNICA. RESIDUO DE POLIURETANO TIPO P**

<b>DENOMINACIÓN</b>	Residuo de espuma rígida de poliuretano amarillo	<b>NOMENCLATURA</b>	<b>P</b>
<b>ORIGEN</b>	Paneles de aislamiento del sector de refrigeración		
<b>EMPRESA</b>	Paneles Aislantes Peninsulares (PAP)		

**PRESENTACIÓN**

PELLET



Triturado y tamizado  
(pasa del tamiz de 2,00 mm)

**CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS**

**COMPOSICIÓN** Poliul + isocianato (reacción química de dos componentes)

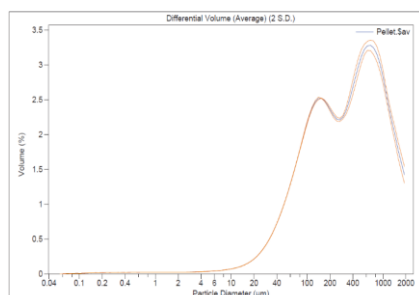
<b>ANÁLISIS ELEMENTAL</b>	<b>C</b>	64,48 %	<b>LIXIVIACIÓN</b>	<b>CT (µs/cm)</b>	30,8
	<b>H</b>	5,63 %		<b>SDT (mg/L)</b>	19,7
	<b>N</b>	6,74 %		<b>Sal (mg/L)</b>	14,3
	<b>S</b>	0,00 %		<b>pH</b>	6,6

**CARACTERÍSTICAS FÍSICAS**

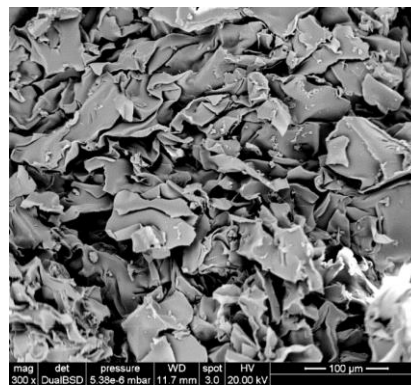
<b>COLOR</b>	Amarillo	
<b>TEXTURA</b>	Áspero	
<b>ESTADO</b>	Polvo prensado	
<b>DENSIDAD</b>	Real	1.052,7 Kg/m <sup>3</sup>
	Aparente	150,0 Kg/m <sup>3</sup>
<b>ABSORCIÓN DE AGUA</b>	2 %	

De la muestra	Tamaño de partícula (µm)
< 10%	61,6
< 25%	-
< 50%	339,8
< 75%	-
< 90%	1.205,0

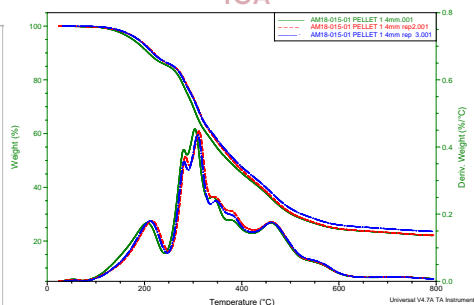
**GRANULOMETRÍA**



**MEB**



**TGA**



**FICHA TÉCNICA. RESIDUO DE POLIURETANO TIPO A**

<b>DENOMINACIÓN</b>	Residuo de espuma semirrígida de poliuretano gris	<b>NOMENCLATURA</b>	<b>A</b>
<b>ORIGEN</b>	Fabricación de coches en el sector automovilístico		
<b>EMPRESA</b>	GRUPO ANTOLÍN		

**PRESENTACIÓN**

PELLET



Triturado y tamizado  
(pasa del tamiz de 2,00 mm)

**CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS**

**COMPOSICIÓN** Polioli + isocianato (reacción química de dos componentes)

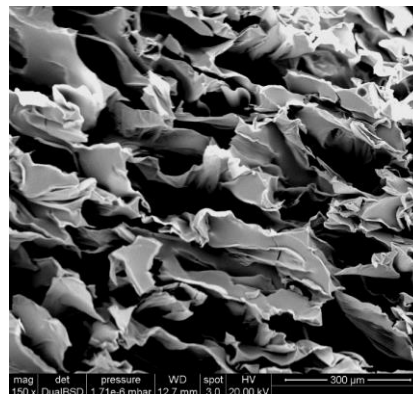
<b>ANÁLISIS ELEMENTAL</b>	<b>C</b>	63,74 %	<b>LIXIVIACIÓN</b>	<b>CT (µs/cm)</b>	33,8
	<b>H</b>	6,15 %		<b>SDT (mg/L)</b>	21,5
	<b>N</b>	6,04 %		<b>Sal (mg/L)</b>	15,6
	<b>S</b>	0,00 %		<b>pH</b>	7,7

**CARACTERÍSTICAS FÍSICAS**

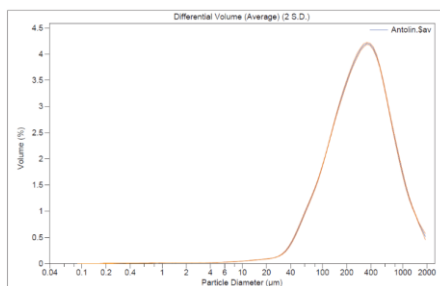
<b>COLOR</b>	Gris	
<b>TEXTURA</b>	Áspero	
<b>ESTADO</b>	Sólido	
<b>DENSIDAD</b>	Real	1.378,6 Kg/m <sup>3</sup>
	Aparente	130,8 Kg/m <sup>3</sup>
<b>ABSORCIÓN DE AGUA</b>	333,5 %	

De la muestra	Tamaño de partícula (µm)
< 10%	85,9
< 25%	-
< 50%	303,7
< 75%	-
< 90%	878,9

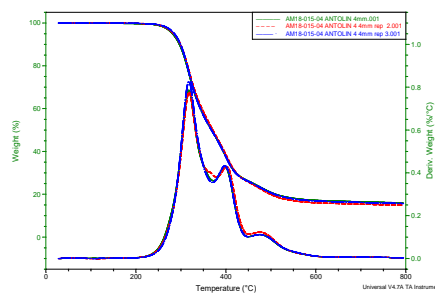
**MEB**



**GRANULOMETRÍA**



**TGA**



FICHA TÉCNICA. RESIDUO DE POLIURETANO TIPO AT		
<b>DENOMINACIÓN</b>	Residuo de espuma rígida de poliuretano gris	<b>NOMENCLATURA</b> AT
<b>ORIGEN</b>	Fabricación de coches en el sector automovilístico	
<b>EMPRESA</b>	GRUPO ANTOLÍN	

PRESENTACIÓN

LÁMINA



Triturado y tamizado  
(pasa del tamiz de 4,00 mm)

**CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS**

**COMPOSICIÓN** Polioli + isocianato (reacción química de dos componentes)

<b>ANÁLISIS ELEMENTAL</b>	<b>C</b>	47,33 %	<b>LIXIVIACIÓN</b>	<b>CT (µs/cm)</b>	-
	<b>H</b>	4,20 %		<b>SDT (mg/L)</b>	-
	<b>N</b>	3,05 %		<b>Sal (mg/L)</b>	-
	<b>S</b>	0,00 %		<b>pH</b>	-

**CARACTERÍSTICAS FÍSICAS**

<b>COLOR</b>	Gris	
<b>TEXTURA</b>	Áspero	
<b>ESTADO</b>	Sólido	
<b>DENSIDAD</b>	Real	1.761,6 Kg/m <sup>3</sup>
	Aparente	109,0 Kg/m <sup>3</sup>
<b>ABSORCIÓN DE AGUA</b>	373 %	

MEB

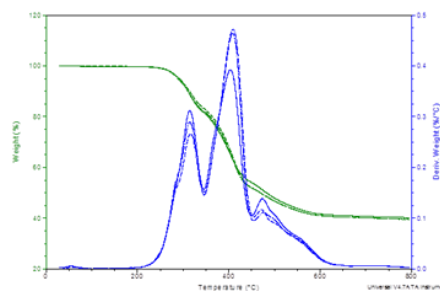
Debido a la estructura lamelar de los residuos de AT, no fue posible realizar MEB en estos residuos.

GRANULOMETRÍA

De la muestra	Tamaño de partícula (µm)
< 10%	-
< 25%	-
< 50%	-
< 75%	-
< 90%	-

La muestra de AT no pudo ser analizada en el equipo por su textura textil, porque siempre hay unas partículas unidas a otras.

TGA



**FICHA TÉCNICA. RESIDUO DE POLIURETANO TIPO SG**

<b>DENOMINACIÓN</b>	Residuo de espuma semirrígida de poliuretano amarillo	<b>NOMENCLATURA</b>	<b>SG</b>
<b>ORIGEN</b>	Restos de asientos de coches procedentes del desguace		
<b>EMPRESA</b>	SIGRAUTO		

**PRESENTACIÓN**

BLOQUE



Triturado y tamizado  
(pasa del tamiz de 2,00 mm)

**CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS**

**COMPOSICIÓN** Polioli + isocianato (reacción química de dos componentes)

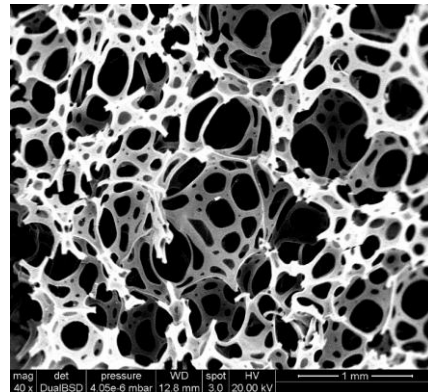
<b>ANÁLISIS ELEMENTAL</b>	<b>C</b>	64,67 %	<b>LIXIVIACIÓN</b>	<b>CT (µs/cm)</b>	149,2
	<b>H</b>	7,75 %		<b>SDT (mg/L)</b>	95,4
	<b>N</b>	4,80 %		<b>Sal (mg/L)</b>	69,0
	<b>S</b>	0,00 %		<b>pH</b>	7,9

**CARACTERÍSTICAS FÍSICAS**

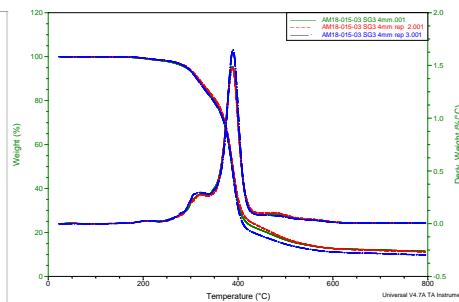
<b>COLOR</b>	Amarillo	
<b>TEXTURA</b>	Suave	
<b>ESTADO</b>	Sólido	
<b>DENSIDAD</b>	Real	1.211,1 Kg/m <sup>3</sup>
	Aparente	92,9 Kg/m <sup>3</sup>
<b>ABSORCIÓN DE AGUA</b>	645 %	

De la muestra	Tamaño de partícula (µm)
< 10%	114,9
< 25%	-
< 50%	528,70
< 75%	-
< 90%	1.207,0

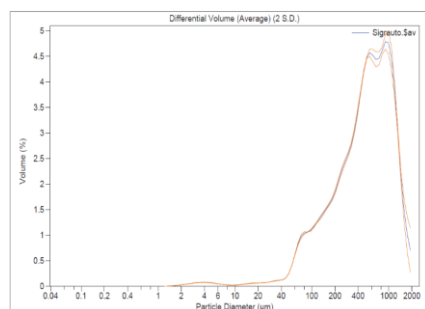
**MEB**



**TGA**



**GRANULOMETRÍA**



FICHA TÉCNICA. RESIDUO DE POLIURETANO TIPO BU			
<b>DENOMINACIÓN</b>	Residuo de espuma semirrígida de poliuretano amarillo	<b>NOMENCLATURA</b>	<b>BU</b>
<b>ORIGEN</b>	Restos del aislamiento de depósitos		
<b>EMPRESA</b>	BUPOLSA		

**PRESENTACIÓN**

GRÁNULO



Triturado y tamizado  
(pasa del tamiz de 2,00 mm)

**CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS**

**COMPOSICIÓN** Polioli + isocianato (reacción química de dos componentes)

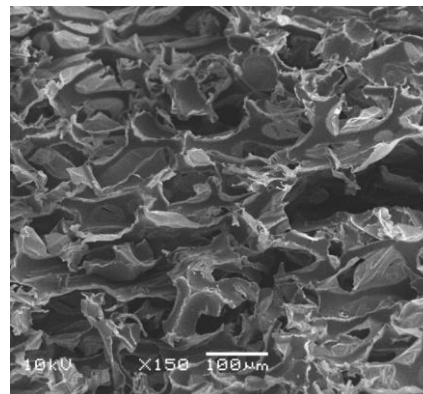
<b>ANÁLISIS ELEMENTAL</b>	<b>C</b>	63,77 %	<b>LIXIVIACIÓN</b>	<b>CT (µs/cm)</b>	-
	<b>H</b>	6,82 %		<b>SDT (mg/L)</b>	-
	<b>N</b>	6,62 %		<b>Sal (mg/L)</b>	-
	<b>S</b>	0,00 %		<b>pH</b>	-

**CARACTERÍSTICAS FÍSICAS**

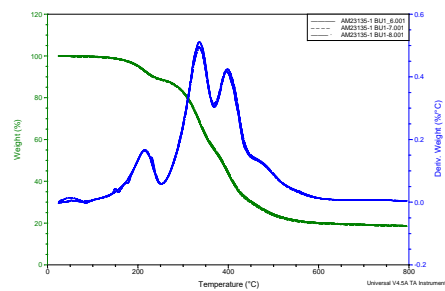
<b>COLOR</b>	Amarillo	
<b>TEXTURA</b>	Suave	
<b>ESTADO</b>	Sólido	
<b>DENSIDAD</b>	Real	908,9 Kg/m <sup>3</sup>
	Aparente	93,0 Kg/m <sup>3</sup>
<b>ABSORCIÓN DE AGUA</b>	911,3 %	

De la muestra	Tamaño de partícula (µm)
< 10%	252,8
< 25%	691,7
< 50%	1.102,0
< 75%	1.489,0
< 90%	1.774,0

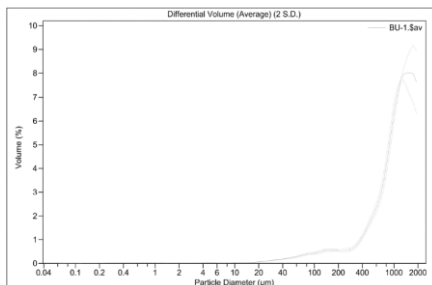
**MEB**



**TGA**



**GRANULOMETRÍA**





**FICHA TÉCNICA. RESIDUO DE POLIURETANO TIPO ES**

<b>DENOMINACIÓN</b>	Residuo de resina de poliuretano de color variado	<b>NOMENCLATURA</b>	<b>ES</b>
<b>ORIGEN</b>	Residuo de presas de escalada		
<b>EMPRESA</b>	EUROHOLDS GROUP		

**PRESENTACIÓN**  
VARIABLE



Triturado y tamizado  
(pasa del tamiz de 2,00 mm)

**CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS**

**COMPOSICIÓN** Polioli + isocianato (reacción química de dos componentes)

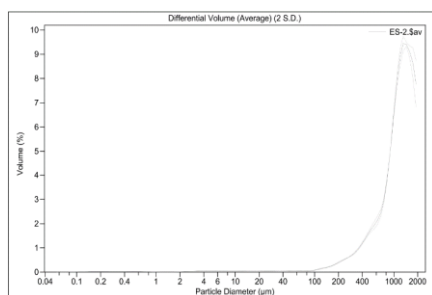
<b>ANÁLISIS ELEMENTAL</b>	<b>C</b>	67,32 %	<b>LIXIVIACIÓN</b>	<b>CT (µs/cm)</b>	-
	<b>H</b>	7,98 %		<b>SDT (mg/L)</b>	-
	<b>N</b>	6,90 %		<b>Sal (mg/L)</b>	-
	<b>S</b>	0,00 %		<b>pH</b>	-

**CARACTERÍSTICAS FÍSICAS**

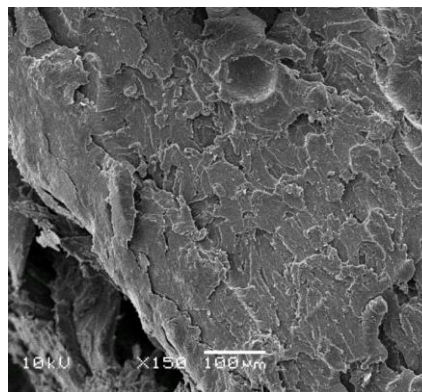
<b>COLOR</b>	Multicolor	
<b>TEXTURA</b>	Suave	
<b>ESTADO</b>	Sólido	
<b>DENSIDAD</b>	Real	1.133,3 Kg/m <sup>3</sup>
	Aparente	688,7 Kg/m <sup>3</sup>
<b>ABSORCIÓN DE AGUA</b>	1,6 %	

De la muestra	Tamaño de partícula (µm)
< 10%	426,7
< 25%	815,4
< 50%	1.184,0
< 75%	1.521,0
< 90%	1.780,0

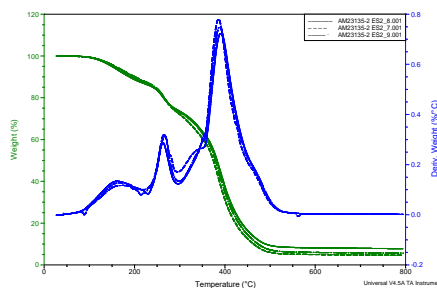
**GRANULOMETRÍA**



**MEB**



**TGA**



### 6.2.7. Conclusiones

La investigación incluye la caracterización de un total de ocho tipos de desechos poliméricos diferentes de forma que se faciliten y amplíen las posibilidades de replicación del estudio permitiendo el aprovechamiento de residuos de poliuretano de diferentes sectores y tipología.

De esta fase de evaluación en profundidad de los residuos de poliuretano reconvertidos en materia prima se concluye que el tipo P presenta los mejores parámetros de procesamiento dado el reducido tiempo de corte y trituración, y el bajo consumo energético, seguido del material tipo BU.

En cuanto a las densidades y absorción de agua, no se observa ningún patrón en común ni tendencia asimilable a esta familia de polímeros dada la disparidad en los resultados.

Los poliuretanos de tipo espumoso presentan un volumen de poros próximo al 96,5 %, mientras que el tipo ES de tipología sólida y maciza muestra unos valores de porosidad muy bajos.

El tamaño de partícula de los residuos de poliuretano es en todos los casos ampliamente superior al del conglomerante de yeso al que sustituye en las mezclas. No se aprecian similitudes entre las granulometrías de los diferentes polímeros.

Del ensayo de análisis elemental se concluye que todos ellos advierten de la presencia de carbono, hidrógeno y nitrógeno en proporciones similares y de la ausencia de azufre, con excepción del residuo tipo AT que presenta una relación algo diferente.

Ningún residuo tiene capacidad de lixiviación, todos los analizados se consideran adecuados para su uso en nuevos productos con base de yeso.

Con referencia a la estructura interna, es posible observar la estructura celular o laminar de los poliuretanos, así como, si existe comunicación o no entre sus poros internos. El residuo SG presenta una estructura adecuada para ser utilizados como posible absorbente acústico, debido a su estructura de poro abierto.

La degradación inicial de todos los polímeros se produce en un rango de temperaturas superiores a 150-400 °C, para a continuación producirse una segunda pérdida de masa. El residuo final constituye entre un 6 y un 40% del peso de las muestras.

### 6.3. Fibra de vidrio

Con el fin de mejorar las prestaciones mecánicas del material resultante, se incorpora en la mezcla fibra de vidrio 2400 Tex (Figura 6.22).



Figura 6.22. Fibra de vidrio 2400 Tex

La Tabla 6.15 recoge los datos más relevantes incluidos en su ficha técnica.

<b>Densidad lineal</b>	2.400 tex
<b>Diámetro de filamento</b>	24 µm
<b>Contenido de humedad</b>	≤ 0,10 %
<b>Pérdida de masa por ignición</b>	0,55 %
<b>Tenacidad</b>	> 0,40 N/tex

Tabla 6.15. Características de la fibra de vidrio 2400 Tex

### 6.4. Aditivo

Se contempla la incorporación en las dosificaciones de un aditivo fluidificante de base alcohólica, cuya característica más destacable es el aumento de la trabajabilidad en estado fresco de las mismas. Su nombre comercial es "Yesycleaner" y es suministrado, en estado líquido, por la empresa Yesyforma Europa SL (Figura 6.23).



Figura 6.23. Aditivo Yesycleaner

Se realizan los ensayos de densidad real y de viscosidad con el objetivo de obtener más información acerca de este tipo de producto y de determinar algunas de sus propiedades más relevantes.

#### 6.4.1. Densidad real

El resultado obtenido en el cálculo de la densidad real del aditivo con el densímetro se detalla en la Tabla 6.16.

<b>Densidad real</b>	1.254,00 Kg/m <sup>3</sup>
----------------------	----------------------------

Tabla 6.16. Densidad real del aditivo

#### 6.4.2. Viscosidad aparente

La Tabla 6.17 incluye el valor de viscosidad resultante del ensayo.

<b>Viscosidad aparente</b>	48,50 mPa s
----------------------------	-------------

Tabla 6.17. Viscosidad aparente del aditivo

### 6.5. Agua

El agua que se utiliza en la elaboración de las diferentes mezclas de yeso procede de la red municipal de suministro de agua potable de Burgos. La Sociedad Municipal de Aguas de Burgos SA, propiedad del Ayuntamiento de Burgos, se encarga íntegramente de gestionar los servicios relativos al abastecimiento de agua potable y saneamiento de aguas residuales de la ciudad de Burgos y su Alfoz.

De forma periódica se evalúa la calidad del agua y el cumplimiento de las especificaciones recogidas en el Real Decreto 140/2003, de 7 de febrero, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano y sus modificaciones posteriores<sup>131</sup>. Recientemente, esta disposición ha sido derogada en favor del Real Decreto 3/2023, de 10 de enero, por el que establecen los criterios técnico-sanitarios de la calidad del agua de consumo, su control y suministro<sup>132</sup>. Durante el transcurso de la fase experimental se publican diversos informes al respecto, en todos ellos se muestra la conformidad de los parámetros analizados. La Tabla 6.18 recoge, en concreto, los datos contenidos en el informe relativo al análisis del agua de la red municipal para una muestra tomada el 23 de noviembre de 2021<sup>133</sup>.

<b>PARÁMETROS INDICADORES</b>			
<b>Indicador o parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Resultado</b>	<b>Máximo permitido según RD 140/2003</b>
<b>Color</b>	UNF	< 1,0	≤ 15
<b>Olor</b>	Índice de dilución	2	≤ 3
<b>Sabor</b>	Índice de dilución	2	≤ 3

<b>PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS</b>			
<b>Indicador o parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Resultado</b>	<b>Máximo permitido según RD 140/2003</b>
<b>Cloro Combinado</b>	mg/L	0,03	≤ 2
<b>Cloro libre</b>	mg/L	0,39	≤ 1
<b>Cloro Total</b>	mg/L	0,42	-
<b>Conductividad a 20° C</b>	μS/cm	100	≤2.500
<b>pH</b>	Unidades de pH	8,2	6,5 – 9,5
<b>Temperatura de medición de pH</b>	°C	24	-
<b>Turbidez</b>	UNF	0,57	≤ 5
<b>Oxidabilidad</b>	mg O2/L	<0,50	≤ 5

<sup>131</sup> Real Decreto 140/2003, de 7 de febrero, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano (BOE núm. 45, de 21 de febrero de 2003).

<sup>132</sup> Real Decreto 3/2023, de 10 de enero, por el que se establecen los criterios técnico-sanitarios de la calidad del agua de consumo, su control y suministro (BOE núm. 9, de 11 de enero de 2023).

<sup>133</sup> Aguas de Burgos. (2021). Informe Analítico.

<b>ANIONES</b>			
<b>Indicador o parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Resultado</b>	<b>Máximo permitido según RD 140/2003</b>
<b>Bromatos</b>	mg/L	< 0,0020 (LDD)	≤ 0,01
<b>Clorato</b>	mg/L	< 0,050	≤ 0,7
<b>Clorito</b>	mg/L	< 0,05	≤ 0,7
<b>Cloruro</b>	mg/L	< 10	≤ 250
<b>Fluoruros</b>	mg/L	< 0,10	≤ 1,5
<b>Nitrato (NO<sub>3</sub>)</b>	mg/L	< 1	≤ 50
<b>Nitrito (NO<sub>2</sub>)</b>	mg/L	< 0,02	≤ 0,5
<b>Sulfato</b>	mg/L	< 10	≤ 250

<b>CACIONES</b>			
<b>Indicador o parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Resultado</b>	<b>Máximo permitido según RD 140/2003</b>
<b>Amonio (NH<sub>4</sub>)</b>	mg/L	< 0,05	≤ 0,5

<b>METALES Y MINERALES</b>			
<b>Indicador o parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Resultado</b>	<b>Máximo permitido según RD 140/2003</b>
<b>Aluminio (Al)</b>	µg/L	< 25	≤ 200
<b>Antimonio (Sb)</b>	µg/L	< 0,5	≤ 5
<b>Arsénico (As)</b>	µg/L	< 0,50	≤ 10
<b>Boro (B)</b>	mg/L	< 0,050	≤ 1
<b>Cadmio (Cd)</b>	µg/L	< 0,10	≤ 5
<b>Cobre (Cu)</b>	mg/L	< 0,001	≤ 2
<b>Cromo (Cr)</b>	µg/L	< ,50	≤ 50
<b>Hierro (Fe)</b>	µg/L	< 50	≤ 200
<b>Manganeso (Mn)</b>	µg/L	14,0	≤ 50
<b>Mercurio (Hg)</b>	µg/L	< 0,10	≤ 1
<b>Níquel (Ni)</b>	µg/L	< 1	≤ 20
<b>Plomo (Pb)</b>	µg/L	< 1,0	≤ 10
<b>Selenio (Se)</b>	µg/L	< 1,0	≤ 10
<b>Sodio (Na)</b>	mg/L	2,7	≤ 200

Tabla 6.18. Resultados del análisis de laboratorio del agua del municipio de Burgos en el año 2021

**Fabricación y  
caracterización  
de mezclas de  
yeso con residuo  
de poliuretano**

**07**





## CAPÍTULO 7. FABRICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE MEZCLAS DE YESO CON RESIDUO DE POLIURETANO

En este capítulo se incluye el proceso de fabricación a nivel de laboratorio de las mezclas de yeso con residuo de poliuretano y se desarrolla el estudio experimental cuyo propósito es la determinación de la mezcla idónea de yeso y polímero para su replicación industrial en una fábrica de placas de yeso para techos suspendidos desmontables.

Previo al comienzo de la investigación es preciso tener en cuenta varios aspectos técnicos, comunicados por el fabricante de placas, que garantizan la correcta transferencia del producto de la escala de laboratorio al nivel industrial:

- La consistencia de la pasta debe ser líquida dado que ésta se vierte en los moldes a través de mangueras.
- El tiempo de fraguado debe ser inferior a 20-22 minutos, que es el tiempo que el prefabricado discurre por la línea de producción hasta ser desmoldada.
- Información acerca de las materias primas empleadas por el fabricante (escayola, fibra de vidrio y aditivo), de forma que se empleen los mismos productos desde el estudio preliminar.

El plan de trabajo establecido para la fase experimental se divide en dos fases consecutivas: diseño de la dosificación idónea y caracterización de las mezclas. El objetivo principal de la primera etapa es la obtención de la proporción de materias primas y relación agua-conglomerante apropiados de las mezclas, valorando los aspectos técnicos. Para ello, se procede a la caracterización de una amplia variedad de mezclas de yeso que incorporan exclusivamente el residuo de poliuretano tipo P.

Una vez obtenida la composición ideal, la segunda fase consiste en identificar, de entre todas las mezclas de yeso con poliuretanos reciclados, aquel con el mejor rendimiento en los ensayos de caracterización y cuya replicabilidad a nivel industrial tenga mayor probabilidad de éxito. Para ello, se procede a la caracterización de las diferentes mezclas de yeso que incorporan los residuos de poliuretano tipo I, B, P, A, AT, SG, BU y ES.

## 7.1. Fabricación

La elaboración de todas las muestras a ensayar se lleva a cabo en los laboratorios de la Escuela Politécnica Superior de la Universidad de Burgos, en Burgos (España). Esta medida pretende garantizar la homogeneidad del estudio, de forma que todas las probetas se elaboren en las mismas condiciones y espacios, con independencia de donde vayan a ser ensayadas.

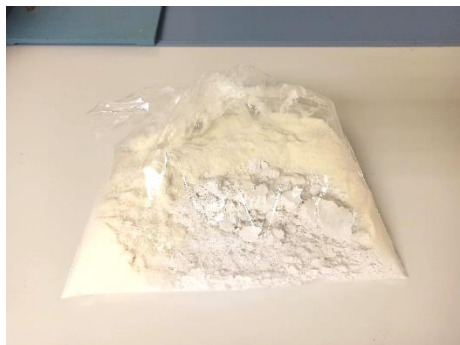
Para la fabricación de mezclas de yeso que incluyen residuo de poliuretano en su matriz hay que tener en cuenta que varias de las materias primas empleadas precisan de una preparación y acondicionamiento previos. La temperatura de los materiales debe estar en torno a  $23 \pm 2$  °C y la humedad relativa del aire debe ser de  $50 \pm 5$  %. Por todo ello, el agua, procedente de la red municipal, se embotella y almacena en el laboratorio con el objetivo de que adquiera la misma temperatura. El yeso se introduce en la estufa a 40°C, para asegurar un secado uniforme, y con posterioridad se introduce en un saco hermético que lo aisle de la humedad del ambiente. Adicionalmente, el residuo polimérico precisa del proceso de trituración y tamizado mencionado en secciones anteriores, el polvo obtenido debe tener un tamaño de partícula regular y apto para su incorporación en las mezclas. Las fibras de vidrio y el aditivo no precisan de ningún tratamiento previo específico.

Una vez que las materias primas están listas para ser utilizadas, se procede con la fabricación de las mezclas. En primer lugar, se premezclan de forma manual el yeso y el poliuretano triturado (Figura 7.1.a)). Por otra parte, se combinan el agua, las fibras de vidrio y el aditivo fluidificante (Figura 7.1.b)). Una vez homogeneizadas ambas premezclas, se procede a su unificación agregando la fase sólida en la fase líquida. A continuación, se remueve la mezcla manualmente con ayuda de la espátula durante 60 segundos (Figura 7.1.c)). Posteriormente, se introduce la pasta en la amasadora mecánica y se amasa durante otros 60 segundos a velocidad lenta (Figura 7.1.d)), según el procedimiento descrito en la norma UNE-EN 13279-2<sup>134</sup>. La pasta de yeso fresco obtenido se vierte en moldes de diferentes dimensiones en función del tamaño de

---

<sup>134</sup> Asociación Española de Normalización (AENOR). (2014). UNE-EN 13279-2 Yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción. Parte 2: Métodos de ensayo.

probeta que precise cada ensayo (Figura 7.1.e)). Finalmente, la fase de curado de las muestras elaboradas consiste en desmoldarlas una vez transcurridas 24 horas de su fabricación e introducirlas en la estufa de secado a 40°C hasta masa constante (Figura 7.1.f)).



a)



b)



c)



d)



e)



f)

Figura 7.1. Proceso de fabricación de las mezclas de yeso con residuo de poliuretano

## 7.2. Diseño de dosificaciones

El objetivo principal de esta fase es establecer la dosificación adecuada de las mezclas de yeso con poliuretano reciclado, procurando la mayor valorización de residuo posible siempre que las propiedades técnicas se mantengan por encima de los requerimientos establecidos en la normativa de aplicación.

El estudio se realiza en cinco fases, en las que se evalúa progresivamente la incorporación de poliuretano reciclado en diferentes proporciones, así como su combinación con fibra de vidrio y aditivo fluidificante y la relación agua-conglomerante. La Tabla 7.1 incluye el estudio de mezclas llevado a cabo. El estudio al completo junto con los resultados de los ensayos se recoge en el Anexo 3.

<b>Fase 1: Yeso (Y) + Poliuretano (PU)</b> $(\alpha/Y+PU) = 1$	Y1P2	Y1P4
	Y1,5P2	Y1,5P4
	Y1,75P2	Y1,75P4
	Y2P2	Y2P4
<b>Fase 2: Yeso (Y) + Poliuretano (PU) + Fibras (F)</b> $(\alpha/Y+PU) = 1$	Y1,5P2+2%F	
	Y1,5P2+4%F	
<b>Fase 3: Yeso (Y) + Poliuretano (PU) + Aditivo (A)</b> $(\alpha/Y+PU) = 1$	Y1,5P2+0,2%A	
	Y1,5P2+0,4%A	
<b>Fase 4: Yeso (Y) + Poliuretano (PU) + Fibras (F) + Aditivo (A)</b> $(\alpha/Y+PU) = 1$	Y1,5P2+1%F+0,5%A	Y1,5P2+1%F+3%A
	Y1,5P2+1%F+1%A	Y1,5P2+2%F+0,4%A
	Y1,5P2+1%F+2%A	Y1,5P2+2%F+0,8%A
	Y1,5P2+1%F+2,5%A	Y1,5P2+4%F+0,4%A
<b>Fase 5: Yeso (Y) + Poliuretano (PU) + Fibras (F) + Aditivo (A)</b>	$(\alpha/Y+PU) = 0,95$	$(\alpha/Y+PU) = 1,10$
	Y1,5P2+1%F+0,5%A	Y1,5P2+1%F+1%A
	Y1,5P2+1,7%F+0,5%A	Y1,5P2+1%F+2%A

Tabla 7.1 Mezclas analizadas en la fase de diseño de la dosificación idónea

Se concluye que los mejores resultados y optimización de materias primas suceden en la dosificación Y1,5PU2+1%F+0,5%A, que contiene 1,5 partes de residuo por cada parte yeso (en volumen), el residuo triturado utilizado es el pasa del tamiz de 2 mm, incorpora un 1 % de fibra de vidrio y un 0,5 % de aditivo (respecto del peso del yeso) y la relación agua-conglomerante es de 0,95.

La Figura 7.2 incluye un resumen de las conclusiones de cada etapa y la dosificación final seleccionada en la fase de diseño de la mezcla.

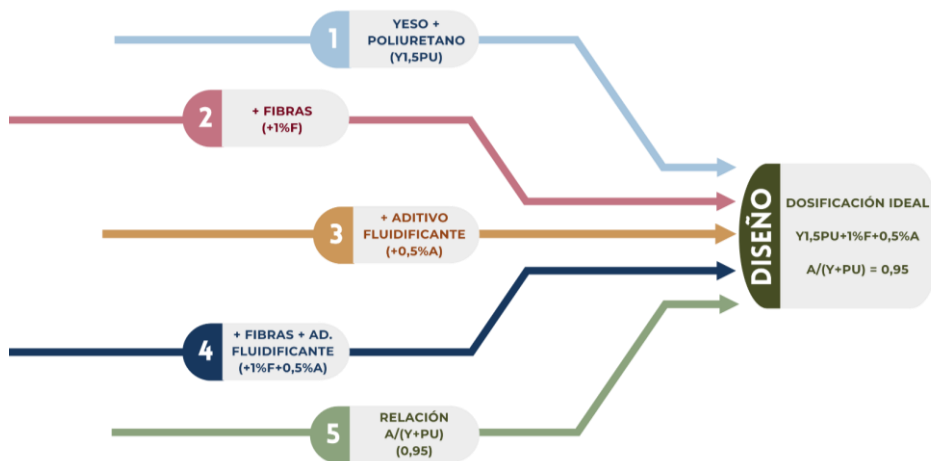


Figura 7.2. Resumen de las conclusiones de la fase de diseño de la dosificación idónea

### 7.3. Caracterización de las mezclas de yeso con residuo de poliuretano

El objetivo primordial de esta fase experimental consiste en escoger la mezcla de yeso con residuo de poliuretano triturado que va a ser replicado a nivel industrial.

El plan de trabajo establecido se basa en fabricar y caracterizar varias mezclas de yeso y residuo de poliuretano, una por cada tipo de polímero, y la muestra de referencia. Las dosificaciones objeto de estudio son  $Y0+1\%F+0,5\%A$ ,  $Y1,5I2+1\%F+0,5\%A$ ,  $Y1,5B2+1\%F+0,5\%A$ ,  $Y1,5P2+1\%F+0,5\%A$ ,  $Y1,5A2+1\%F+0,5\%A$ ,  $Y1,5AT4$ ,  $Y1,5SG2+1\%F+0,5\%A$ ,  $Y1,5BU2+1\%F+0,5\%A$  y  $Y1,5ES2+1\%F+0,5\%A$ . Todas ellas se elaboran siguiendo la dosificación ideal establecida durante la fase experimental anterior ( $Y1,5P2+1\%F+0,5\%A$ ,  $a/c = 0,95$ ), con excepción de la del residuo tipo AT. La mezcla que se analiza para este tipo de polímero es la  $Y1,5AT4$  con una relación  $a/c = 0,85$ . Este residuo contiene fibras por lo que no es preciso su incorporación a mayores, además se reduce la relación agua-conglomerante y se utiliza el pasa del tamiz de 4 mm para mejorar su trabajabilidad. Finalmente, la consistencia es fluida por lo que también se desestima la incorporación de aditivo fluidificante en la mezcla.

En la Tabla 7.2 se detallan las nomenclaturas empleadas para cada mezcla analizada en esta etapa y la abreviación (clave) utilizada para referirse a cada una de estas dosificaciones.

Dosificación	Clave	Relación Y-PU (en volumen)	Tipo de PU	Fibra de vidrio (F) (%)	Aditivo fluidificante (A) (%)	Relación $\alpha/(Y+PU)$
<b>Y0+1%F+0,5%A</b>	<b>Y0</b>	-	-	1	0,5	0,95
<b>Y1,5I2+1%F+0,5%A</b>	<b>Y1,5I2</b>	1,5	I2	1	0,5	0,95
<b>Y1,5B2+1%F+0,5%A</b>	<b>Y1,5B2</b>	1,5	B2	1	0,5	0,95
<b>Y1,5P2+1%F+0,5%A</b>	<b>Y1,5P2</b>	1,5	P2	1	0,5	0,95
<b>Y1,5A2+1%F+0,5%A</b>	<b>Y1,5A2</b>	1,5	A2	1	0,5	0,95
<b>Y1,5AT4</b>	<b>Y1,5AT4</b>	1,5	AT4	-	-	0,85
<b>Y1,5SG2+1%F+0,5%A</b>	<b>Y1,5SG2</b>	1,5	SG2	1	0,5	0,95
<b>Y1,5BU2+1%F+0,5%A</b>	<b>Y1,5BU2</b>	1,5	BU2	1	0,5	0,95
<b>Y1,5ES2+1%F+0,5%A</b>	<b>Y1,5ES2</b>	1,5	ES2	1	0,5	0,95

Tabla 7.2. Descripción de la nomenclatura de las dosificaciones analizadas en la fase de caracterización de las mezclas

La Tabla 7.3 recoge la composición completa de cada mezcla referenciada a 1.000 gramos de yeso.

Clave	Yeso (Y) (g)	Tipo de PU	Poliuretano (PU) (g)	Fibra de vidrio (F) (g)	Aditivo fluidificante (A) (g)	Agua (a)
<b>Y0</b>	1.000	-	-	10	5	950,00
<b>Y1,5I2</b>	1.000	I2	97,67	10	5	1.042,79
<b>Y1,5B2</b>	1.000	B2	82,78	10	5	1.028,64
<b>Y1,5P2</b>	1.000	P2	270,68	10	5	1.207,14
<b>Y1,5A2</b>	1.000	A2	235,94	10	5	1.174,14
<b>Y1,5AT4</b>	1.000	AT4	196,69	-	-	1.017,19
<b>Y1,5SG2</b>	1.000	SG2	167,59	10	5	1.109,21
<b>Y1,5BU2</b>	1.000	BU2	167,82	10	5	1.109,43
<b>Y1,5ES2</b>	1.000	ES2	1.033,00	10	5	1.931,35

Tabla 7.3. Detalle de la composición de las dosificaciones analizadas en la fase de caracterización de las mezclas

El estudio de las propiedades de las diferentes mezclas incluye la realización de un amplio espectro de ensayos que se detallan en la Tabla 7.4.

	Mezcla según el tipo de poliuretano								
	Y0	I2	B2	P2	A2	AT4	SG2	BU2	ES2
<b>Caracterización física</b>									
Densidad aparente EF	x	x	x	x	x	x	x	x	-
Densidad aparente EE (7D)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Densidad aparente EE (28D)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Densidad real	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Granulometría por d. láser	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Adsorción física de gases	x	x	x	x	x	-	x	-	-
Conductividad térmica (UBU)	x	x	x	-	-	x	-	x	-
Conductividad térmica (FEUP)	x	-	x	-	-	x	-	x	-
Conductividad térmica (ISOMET)	x	-	x	-	-	x	-	x	-
Colorimetría	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Viscosidad aparente	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Caracterización mecánica</b>									
Resistencia a flexión (7D)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Resistencia a flexión (28D)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Resistencia a compresión (7D)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Resistencia a compresión (28D)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Dureza Shore C (7D)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Dureza Shore C (28D)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Adherencia (28D)	x	x	x	x	x	x	x	x	-
Deformación bajo carga	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Caracterización química</b>									
Análisis elemental (CHNS)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Lixiviación	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Principio de fraguado	x	x	x	x	x	x	x	x	-
<b>Caracterización microscópica</b>									
M. Elect. de Barrido (MEB)	x	x	x	-	-	x	-	-	-
Tomografía Axial Comp. (TAC)	x	x	x	-	-	-	-	-	-
<b>Caracterización higroscópica</b>									
Acumulación de agua (7D)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Acumulación de agua (28D)	x	x	x	x	x	x	x	x	-
Absorción por inmersión	x	x	x	x	x	x	x	x	-
Absorción por capilaridad-RILEM	x	x	x	x	x	x	x	x	-
Absorción por capilaridad-UNE	x	-	x	-	-	x	-	x	-
Permeabilidad vapor (HÚMEDA)	x	x	x	x	x	x	x	x	-
Permeabilidad vapor (SECA)	x	-	x	-	-	x	-	x	-
C. adsorción higroscópica	x	-	x	-	-	x	-	x	-
<b>Caracterización térmica</b>									
Termogravimetría (TGA)	x	x	x	-	-	x	-	-	-
Reacción al fuego (No comb.)	-	x	x	x	x	x	x	x	x
Reacción al fuego (CBC)	-	x	x	-	-	-	-	-	-
<b>Caracterización acústica</b>									
Absorción acústica	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabla 7.4. Inventario de ensayos llevados a cabo en las dosificaciones analizadas en la fase de caracterización de las mezclas

### 7.3.1. Caracterización física

La fase de caracterización física de las mezclas de yeso con residuo de poliuretano contempla los ensayos necesarios para determinar la densidad aparente en estado fresco y en estado endurecido, la porosidad (adsorción física de gases), la conductividad térmica y la colorimetría.

#### 7.3.1.1. Densidad aparente en estado fresco y en estado endurecido

Los resultados obtenidos del análisis de la densidad aparente en estado fresco (EF) y en estado endurecido (EE) a los 7 y 28 días de la fabricación de las diferentes dosificaciones se recogen en la Tabla 7.5.

Clave	Densidad aparente en estado fresco (EF) (Kg/m <sup>3</sup> )	Densidad aparente en estado endurecido (EE) (7 días) (Kg/m <sup>3</sup> )	Densidad aparente en estado endurecido (EE) (28 días) (Kg/m <sup>3</sup> )
Y0	1.512,00	897,00	900,00
Y1,5I2	1.318,00	800,00	807,00
Y1,5B2	1.315,00	793,00	773,00
Y1,5P2	1.160,00	690,00	670,00
Y1,5A2	1.356,00	790,00	800,00
Y1,5AT4	1.418,00	987,00	890,00
Y1,5SG2	1.339,00	830,00	797,00
Y1,5BU2	1.144,00	706,00	683,00
Y1,5ES2	-	680,00	655,00

Tabla 7.5. Densidad aparente en estado fresco y endurecido de las dosificaciones analizadas en la fase de caracterización de las mezclas

La inclusión de poliuretano en las mezclas conlleva una reducción de la densidad aparente en estado fresco que varía de un 6 % (Y1,5AT4) a un 24 % (Y1,5BU2) con respecto al material Y0. En cuanto a la densidad aparente en estado endurecido, las muestras más ligeras son las dosificaciones Y1,5P2, Y1,5BU2 y Y1,5ES2, mientras que el resultado más



alto se da en la muestra Y1,5AT4. Exceptuando ésta última, que presenta datos fuera de la tendencia general, se aprecia un descenso de la densidad aparente en estado endurecido de los especímenes que incorporan el polímero de entre un 7 y 27 %.

La muestra de referencia experimenta una pérdida de densidad aparente del 40 % del estado fresco al endurecido. Las mezclas con polímero pierden un 38 % de su densidad en los primeros 7 días y hasta un 40 % transcurridos 28 días desde su fabricación, igual que el material Y0.

La densidad aparente de las mezclas, especialmente la del estado fresco, suele estar vinculada a la cantidad de agua incorporada. Las dosificaciones objeto de investigación tienen todas una relación agua-conglomerante de 0,95, excepto la muestra Y1,5AT4 que es de 0,85. Ello no significa que tengan la misma cantidad de agua, pero sí la misma proporción con respecto al conglomerante (Y+PU) a hidratar. Por ello se deduce que el descenso generalizado de la densidad aparente de las muestras atiende exclusivamente a cuestiones relacionadas con el poliuretano y su densidad. La Figura 7.3 incluye la correlación existente entre la densidad aparente de las mezclas y la densidad real del poliuretano que incorporan.

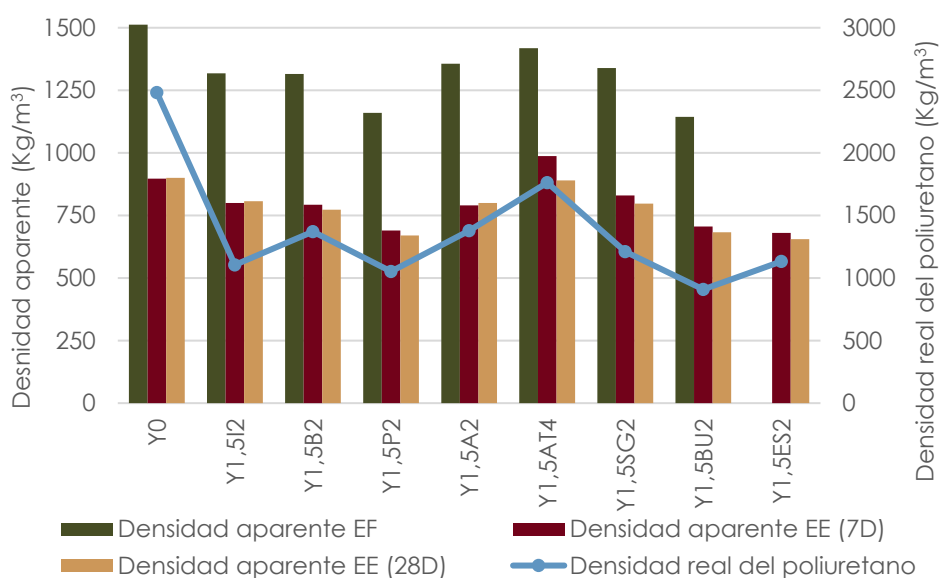


Figura 7.3. Relación entre la densidad aparente en estado fresco y endurecido de las dosificaciones analizadas en la fase de caracterización de las mezclas y la densidad real del poliuretano incluido en cada dosificación

### 7.3.1.2. Adsorción física de gases

Esta técnica permite analizar la influencia del poliuretano incluido en las dosificaciones en el volumen y tamaño de poros y en la superficie específica de las mezclas. Los resultados se muestran en la Tabla 7.6.

Clave	Área BET (m <sup>2</sup> /g)	Área microporo (m <sup>2</sup> /g)	Área externa (m <sup>2</sup> /g)	Diámetro medio de poros (4V/A según BJH adsorción) (nm)	Volumen de poros acumulado (según BJH adsorción) (cm <sup>3</sup> /g)
Y0	24,3	5,2	19,1	11,15	0,0635
Y1,5I2	19,1	1,5	17,7	9,85	0,0526
Y1,5B2	15,9	1,1	14,9	10,38	0,0499
Y1,5P2	8,1	0,6	7,5	13,86	0,0376
Y1,5A2	5,4	0,6	4,8	19,09	0,0340
Y1,5AT4	-	-	-	-	-
Y1,5SG2	5,1	1,7	3,4	17,44	0,0307
Y1,5BU2	-	-	-	-	-
Y1,5ES2	-	-	-	-	-

Tabla 7.6. Área BET, diámetro medio de poro y volumen de poros acumulado de las dosificaciones analizadas en la fase de caracterización de las mezclas

Antes de analizar los resultados relativos a la porosidad de las muestras analizadas, es preciso mencionar que, según el tamaño de los poros, éstos pueden ser clasificados en microporos (< 2nm), mesoporos (2-50 nm) y macroporos (> 50nm)<sup>135</sup>.

Las muestras con poliuretano presentan unos valores de área BET que van de los 5,1 m<sup>2</sup>/g de la muestra Y1,5SG2 a 19,1 m<sup>2</sup>/g de la Y1,5I2, un 79 y 21 %, respectivamente, por debajo de los resultados de la dosificación de referencia que presenta un área BET de 24,3 m<sup>2</sup>/g. El área de microporo se ve también reducida entre un 67 y 88 %, y el área externa

<sup>135</sup> Sing, K. S. W., Everett, D. H., Haul, R. A. W., Moscou, L., Pierotti, R. A., Rouquérol, J., & Siemieniewska, T. (1985). Reporting physisorption data for gas/solid systems with special reference to the determination of surface area and porosity. Pure and Applied Chemistry, 57(4), 603–619. <https://doi.org/https://doi.org/10.1351/pac198557040603>

entre un 7 y 82 %. Una reducción del área BET está relacionada con la disminución de la porosidad o del tamaño de poros.

El diámetro medio de poros de todas las dosificaciones se sitúa en el rango de mesoporo. En cuanto al volumen de poros acumulado, las muestras con poliuretano presentan una disminución de la adsorción de nitrógeno de entre un 17 y 51 % y, en consecuencia, una menor porosidad en el rango de trabajo de este ensayo (1 a 120 nm).

Los residuos tipo AT, BU y ES no se incluyen en la realización de esta prueba dado que se reciben con posterioridad a la ejecución del mismo.

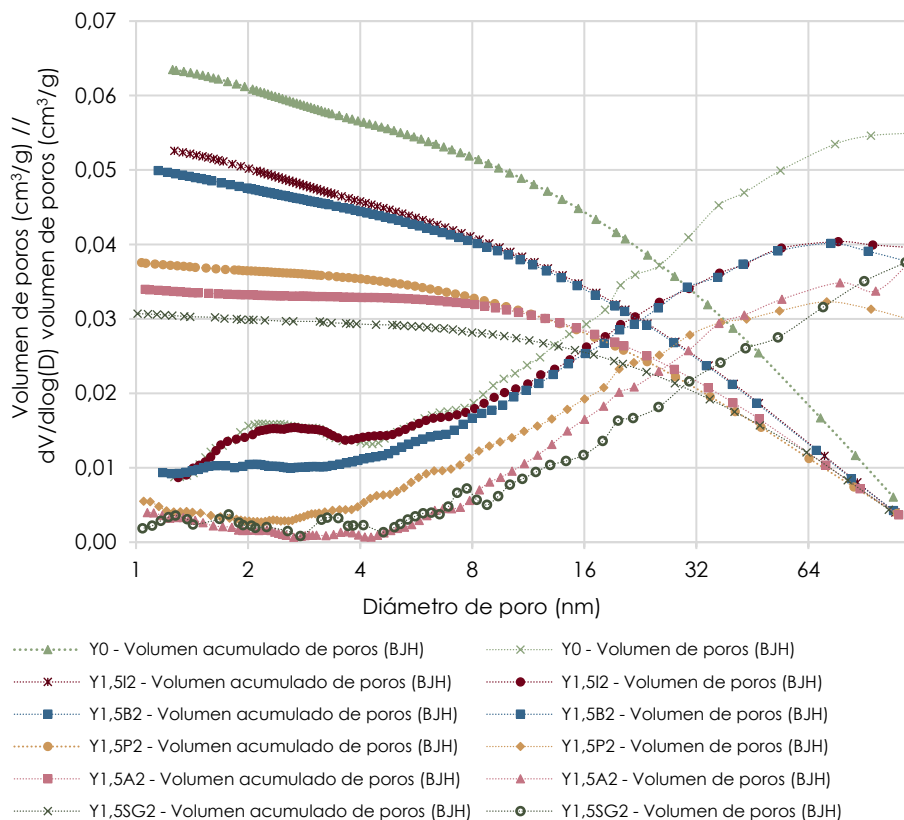


Figura 7.4. Distribución del tamaño de poro de las dosificaciones Y0, Y1,5I2, Y1,5B2, Y1,5P2, Y1,5A2 e Y1,5SG2

La Figura 7.4 incluye la gráfica relativa a la distribución de poros en función del tamaño de su diámetro (gráfica diámetro de poro –  $dV/d\log(D)$  volumen de poros) y el volumen de poros acumulados por

tamaño de diámetro del poro (gráfica diámetro de poro – volumen de poros) para las dosificaciones analizadas.

De su análisis podemos afirmar que para todas las dosificaciones se observa una distribución ancha del tamaño de poro que se extiende desde los 5 nm hasta los 120 nm, con presencia de poros en todo el rango de mesoporo (2-50 nm) y en el de macroporo hasta el máximo alcanzable mediante esta técnica (120 nm).

Todas las representaciones muestran un volumen de poros que crece progresivamente a medida que aumenta el diámetro de poro. Es preciso señalar que no se observa ningún pico de poro crítico en estas gráficas lo que significa que, en este rango de análisis, ningún tamaño de poro prevalece o tiene mayor presencia que el resto. Por ambas razones se intuye que el tamaño de poro predominante se encuentra en el rango de macroporos, el cual no es posible evaluar con esta metodología.

Para poder conocer la distribución de poros de un tamaño superior a 120 nm existen dos técnicas: porosimetría de intrusión de mercurio (MIP) y Tomografía Axial Computarizada (TAC). La primera analiza el rango de mesoporos y macroporos y es capaz de estudiar porosidades de hasta 10  $\mu\text{m}^{136}$ . No obstante, el uso de esta metodología se descarta dada la baja fiabilidad de los resultados obtenidos en experiencias previas, el procedimiento de ensayo implica someter las muestras a altas presiones de mercurio que modifican la estructura interna del poliuretano. La segunda técnica, el TAC, es específica para analizar la macroporosidad, permitiendo detectar tamaños de diámetro de poro superiores a 170  $\mu\text{m}$ . Esta metodología sí se incluye en el presente estudio con el propósito de observar la presunta existencia de macroporos que no alcanza a evaluar el ensayo de adsorción física de gases.

Según la clasificación de isothermas de fisisorción de la IUPAC, el patrón de isothermas de adsorción-desorción las mezclas analizadas se corresponde con el tipo V<sup>137</sup> (Figura 7.5). Este modelo de curva se

---

<sup>136</sup> Zhang, D., & Shao, Y. (2018). Surface scaling of CO<sub>2</sub>-cured concrete exposed to freeze-thaw cycles. *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization*, 27, 137–144. <https://doi.org/10.1016/J.JCOU.2018.07.012>

<sup>137</sup> Sing, K. S. W., Everett, D. H., Haul, R. A. W., Moscou, L., Pierotti, R. A., Rouquérol, J., & Siemieniowska, T. (1985). Reporting physisorption data for gas/solid systems with special reference to the determination of surface area and porosity. *Pure and Applied Chemistry*, 57, 603–619.

caracteriza por no tener un punto de inflexión en un rango  $p/p^0$  bajo, por lo que no se puede identificar el momento de la formación de la monocapa, lo cual puede ser debido a una interacción débil entre el adsorbente y el adsorbato. Para este modelo la agrupación molecular y el llenado de poros se produce en un rango alto de presión relativa<sup>138</sup>.

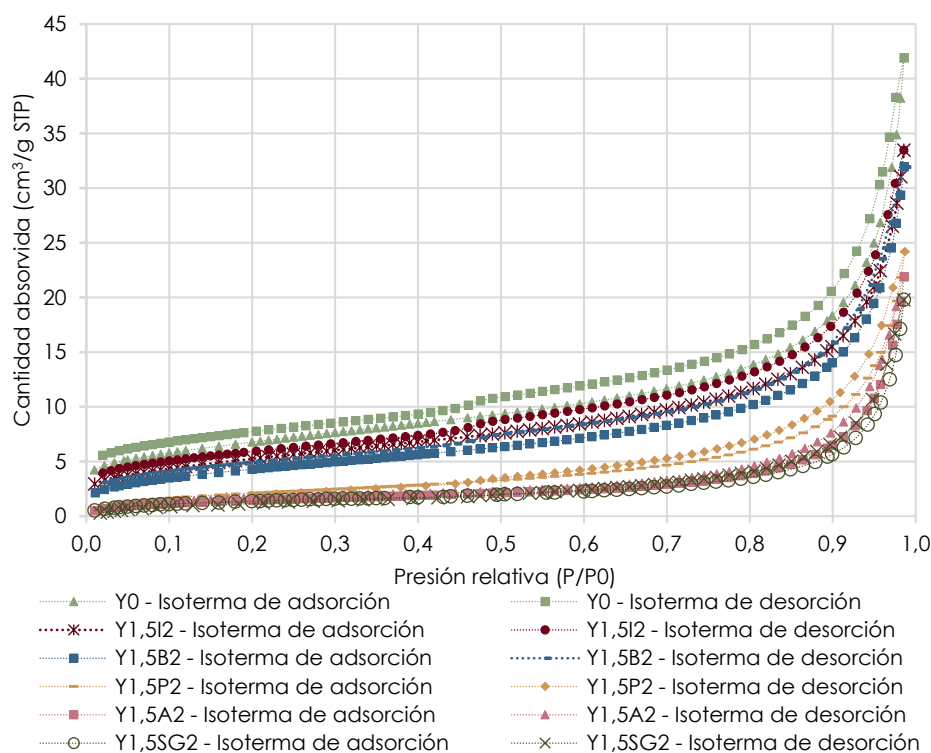


Figura 7.5. Isotermas de adsorción-desorción de las dosificaciones Y0, Y1,5I2, Y1,5B2, Y1,5P2, Y1,5A2 e Y1,5SG2

Por otra parte, todas las representaciones muestran curvas de adsorción no coincidentes con la de desorción. Este fenómeno se

Applied Chemistry, 57(4), 603–619.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1351/pac198557040603>

<sup>138</sup> Thommes, M., Kaneko, K., Neimark, A. V., Olivier, J. P., Rodríguez-Reinoso, F., Rouquerol, J., & Sing, K. S. W. (2015). Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report). Pure and Applied Chemistry, 87(9–10), 1051–1069. <https://doi.org/10.1515/pac-2014-1117>

conoce como histéresis y está relacionado con la formación de condensación por capilaridad en los mesoporos del material que exceden de una cierta anchura crítica (5-6 nm)<sup>139</sup>. La forma de la curva de histéresis se corresponde con el tipo H3.

Comparando la isoterma del material de referencia con la del resto, éstas se diferencian principalmente en que la primera absorbe más cantidad de fluido inicialmente y en el global del ensayo, lo que está relacionado con su mayor área BET y porosidad en el rango 1-120 nm.

### 7.3.1.3. Conductividad térmica

El análisis de conductividad térmica se realiza con tres equipos diferentes. Las dosificaciones Y0, Y1,5I2, Y1,5B2, Y1,5AT4 y Y1,5BU2 se analizan con el equipamiento de placa caliente guardada (PCG) de la Universidad de Burgos (UBU). Las mismas mezclas, con excepción de la Y1,5I2, se someten al ensayo de PCG e Isomet de la Universidad de Oporto (FEUP). La Tabla 7.7 muestra los resultados del ensayo.

Clave	Conductividad térmica (UBU) (PCG) ( $\lambda$ ) (W/m K)	Conductividad térmica (FEUP) (PCG) ( $\lambda$ ) (W/m K)	Conductividad térmica (FEUP) (ISOMET) ( $\lambda$ ) (W/m K)
Y0	0,24	0,093	0,095
Y1,5I2	0,18	-	-
Y1,5B2	0,22	0,072	0,076
Y1,5AT4	0,29	0,092	0,094
Y1,5BU2	0,20	0,084	0,083

Tabla 7.7. Conductividad térmica de las dosificaciones analizadas en la fase de caracterización de las mezclas

Los valores de conductividad térmica obtenidos son corregidos según el procedimiento descrito en el anexo B.2 de la norma UNE-EN ISO 10456<sup>140</sup>, de forma que el incremento de temperatura del ensayo sea

<sup>139</sup> Thommes, M., & Cychosz, K. A. (2014). Physical adsorption characterization of nanoporous materials: Progress and challenges. *Adsorption*, 20(2-3), 233-250. <https://doi.org/10.1007/s10450-014-9606-z>

<sup>140</sup> Asociación Española de Normalización (AENOR). (2007). UNE-EN ISO 10456 Materiales y productos de construcción. Propiedades higrotérmicas. Valores

rigurosamente de 10°C, lo que permite obtener el valor térmico declarado.

Como era de esperar y dada la capacidad aislante del poliuretano triturado, su incorporación en las mezclas supone un descenso de la conductividad térmica de las mismas, con excepción de la mezcla Y1,5AT4 en el ensayo de PCG (UBU).

El método de PCG (UBU) muestra mejoras en la conductividad térmica que van del 8 % (Y1,5B2) al 25 % (Y1,5I2) con respecto al material Y0. Los resultados con el equipo de PCG (FEUP) muestran una reducción de entre un 1 % (Y1,5AT4) y un 23 % (Y1,5B2) en dicha propiedad. Por último, los resultados obtenidos con el equipo Isomet disminuyen la conductividad térmica de referencia en un 1 % (Y1,5AT4) y un 21 % (Y1,5B2), siendo muy similares a los de PCG (FEUP).

Se observan resultados muy dispares entre el ensayo llevado a cabo con el equipo de la Universidad de Burgos (UBU) y los realizados en las instalaciones de la Universidad de Oporto (FEUP). Los primeros se aproximan a los de otros productos de construcción que incluyen materiales con propiedades aislantes, mientras que los resultados de la FEUP se alejan de lo expresado en la bibliografía consultada, sin embargo, los resultados de ambos ensayos coinciden mostrando datos muy similares. A este respecto se concluye que esta diferencia de valores puede ser debida a las condiciones de transporte de las probetas de FEUP o al acondicionamiento previo de secado en estufa a 80°C de las mismas, el cual difiere ligeramente del realizado en las instalaciones de la UBU.

Por otro lado, entre los ensayos realizados en la Universidad de Oporto (FEUP) existen ligeras diferencias en cuanto al resultado de conductividad térmica. Esto puede ser debido a la porosidad de las muestras, teniendo en cuenta que el equipo Isomet 2114 analiza la zona específica en la que se coloca la sonda, la cual puede tener más o menos huecos, mientras que la placa caliente guardada evalúa las probetas de forma íntegra.

---

tabulados de diseño y procedimientos para la determinación de los valores térmicos declarados y de diseño (ISO 10456:2007).

La Figura 7.6 incluye la relación existente entre la densidad aparente en estado endurecido (EE) a 7 días y la conductividad térmica de los productos analizados según el ensayo de método de placa caliente guardada (UBU).

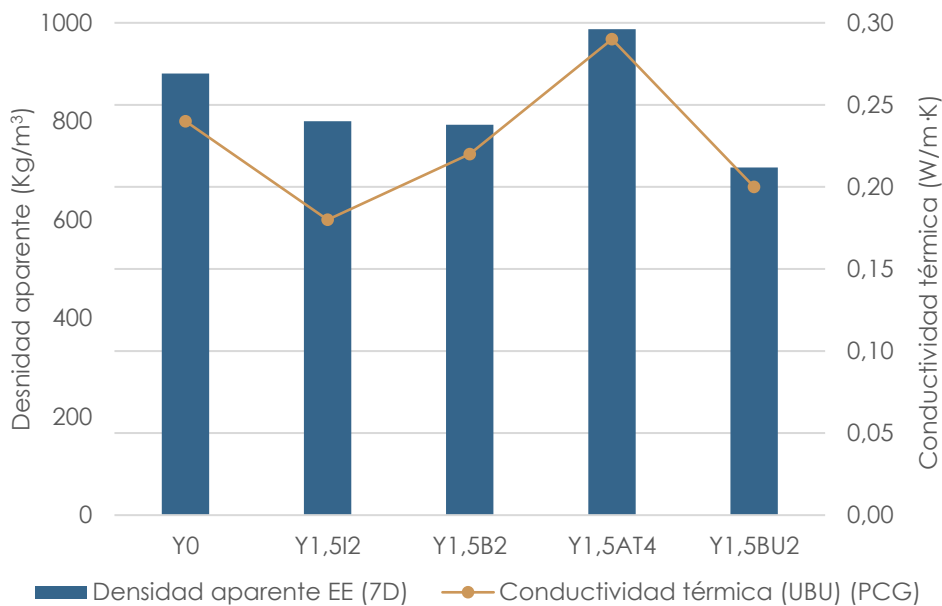


Figura 7.6. Relación entre la conductividad térmica y la densidad aparente en EE a 7 días de las dosificaciones analizadas en la fase de caracterización de las mezclas

La representación gráfica demuestra la correlación directa existente entre ambas propiedades, las dosificaciones con mayor densidad aparente son las que mayor conductividad térmica presentan.

El equipo de Isomet (FEUP), además de los valores de conductividad térmica, también proporciona datos sobre otras propiedades térmicas que se detallan en la Tabla 7.8.



Clave	Capacidad calorífica volumétrica ( $c_p$ ) (MJ/(m <sup>3</sup> K))	Calor específico ( $c_e$ ) (J/(kg K))	Difusividad térmica ( $\alpha$ ) (mm <sup>2</sup> /s)
Y0	0,669	743,80	0,137
Y1,5I2	-	-	-
Y1,5B2	0,506	654,29	0,146
Y1,5AT4	0,595	668,71	0,153
Y1,5BU2	0,560	819,28	0,146

Tabla 7.8. Capacidad calorífica volumétrica, calor específico y difusividad térmica de las dosificaciones analizadas en la fase de caracterización de las mezclas

La capacidad calorífica volumétrica de las muestras que incorporan residuo de espuma de poliuretano es menor que la de la muestra de referencia, por lo que éstas pierden capacidad de almacenamiento de calor por metro cúbico, precisando entre un 11,1 % y 24,4 % menos de energía térmica para modificar su temperatura.

La propiedad de calor específico, sin embargo, no sigue una tendencia uniforme en los productos que incorporan el residuo. Mientras que para las muestras Y1,5B2 y Y1,5AT4 su calor específico se ve reducido entre un 10 – 12 % con la incorporación del residuo, la mezcla Y1,5BU2 sobrepasa en un 10 % al valor de la muestra de referencia.

En cuanto a la difusividad térmica, de forma generalizada se notifica que la incorporación de residuo de poliuretano en mezclas de yeso supone un aumento de la velocidad en el cambio de temperatura del material y, por tanto, en la difusión de calor. Esta característica es directamente proporcional a la conductividad térmica e inversamente proporcional a la capacidad calorífica volumétrica, interpretándose sobre que tanto domina el fenómeno conductivo sobre el de almacenamiento.

#### 7.3.1.4. Colorimetría

Los resultados relativos al color superficial de las probetas se muestran en la Tabla 7.9. El equipo de colorimetría muestra los valores según los modelos o espacios de color XYZ y Lab. Los datos relativos a los

modelos HSL y RGB se obtienen a partir de la escala Lab y con ayuda del convertidor de color Colorizer<sup>141</sup>.

Clave	Colorimetría								
	XYZ			Lab			HSL		
	X	Y	Z	L	a	b	H	S	L
<b>Y0</b>	60,86	64,31	65,71	83,91	-0,77	3,19	51,43	7,22	80,98
<b>Y1,5I2</b>	55,42	39,03	62,48	81,31	-1,36	0,77	139,99	2,75	78,63
<b>Y1,5B2</b>	61,79	65,61	66,13	84,80	-0,99	3,60	60,00	8,51	81,57
<b>Y1,5P2</b>	62,60	66,43	68,19	85,22	-0,88	2,57	60,00	5,62	82,55
<b>Y1,5A2</b>	61,34	65,50	35,95	84,51	-0,78	3,26	50,50	8,51	81,57
<b>Y1,5AT4</b>	60,78	64,49	67,27	84,22	-0,84	1,63	74,99	4,25	81,56
<b>Y1,5SG2</b>	61,40	64,98	66,13	84,48	-0,50	2,96	42,86	7,53	81,76
<b>Y1,5BU2</b>	56,63	59,81	58,33	81,73	-0,17	5,29	41,23	12,72	78,53
<b>Y1,5ES2</b>	51,79	53,88	52,81	78,39	1,85	4,85	27,17	13,28	75,77

Clave	Colorimetría			
	RGB			Color RGB
	R	G	B	
<b>Y0</b>	210,41	209,43	203,20	
<b>Y1,5I2</b>	199,93	202,71	200,47	
<b>Y1,5B2</b>	212,81	212,02	204,90	
<b>Y1,5P2</b>	213,33	213,21	208,00	
<b>Y1,5A2</b>	212,13	211,11	204,74	
<b>Y1,5AT4</b>	209,80	210,44	206,97	
<b>Y1,5SG2</b>	212,34	210,88	205,23	
<b>Y1,5BU2</b>	207,21	202,86	193,29	
<b>Y1,5ES2</b>	201,43	192,45	185,02	

Tabla 7.9. Colorimetría de las dosificaciones analizadas en la fase de caracterización de las mezclas

<sup>141</sup> Colorizer. (2023, marzo). <https://colorizer.org/>

El residuo tipo ES2 se recibe en forma de presas de escalada de diferentes colores, los cuales se mezclan en la fase de trituración del residuo dando lugar a un material multicolor. Es por ello que los resultados de colorimetría obtenidos para la dosificación Y1,5ES2 son específicos de la probeta analizada, ya que la tonalidad de esta mezcla puede variar según la proporción de colores de este residuo de poliuretano.

### 7.3.2. Caracterización mecánica

Durante esta fase experimental se realizan varios ensayos con el propósito de determinar las propiedades mecánicas de las dosificaciones objeto de estudio. Se analizan la resistencia a flexión, la resistencia a compresión, la dureza Shore C y la adherencia.

#### 7.3.2.1. Resistencia a flexión

En la Tabla 7.10 se presentan los resultados obtenidos para las diferentes mezclas en el ensayo de resistencia a flexión una vez transcurridos 7 y 28 días de la fabricación de las probetas.

Clave	Resistencia a flexión (7 días) (N/mm <sup>2</sup> )	Resistencia a flexión (28 días) (N/mm <sup>2</sup> )
Y0	3,07	2,70
Y1,5I2	2,07	2,20
Y1,5B2	2,18	2,23
Y1,5P2	1,16	1,15
Y1,5A2	1,90	1,97
Y1,5AT4	4,06	2,38
Y1,5SG2	1,97	1,71
Y1,5BU2	2,07	1,32
Y1,5ES2	0,30	0,41

Tabla 7.10. Resistencia a flexión de las dosificaciones analizadas en la fase de caracterización de las mezclas

El rendimiento a flexión de las dosificaciones de yeso con residuo de poliuretano es inferior al de la mezcla de yeso de referencia, con la excepción del Y1,5AT4 que a 7 días muestra una mejoría del 32 %, sin embargo, a 28 días se queda con una resistencia del 12 % inferior. Los

mejores resultados les presentan las dosificaciones con poliuretano tipo I, tipo B y tipo AT.

A pesar de este descenso, todos ellos se sitúan por encima de 1 N/mm<sup>2</sup>, requerimiento mínimo para la resistencia a flexión. Nuevamente existe una excepción, la mezcla Y1,5ES2 presenta una resistencia a flexión muy baja e insuficiente para el cumplimiento de los requisitos de la normativa de aplicación. Por lo tanto, en lo que respecta a la resistencia a flexión, todas las mezclas pueden ser replicadas a nivel industrial, con excepción de la Y1,5ES2 (Figura 7.7).

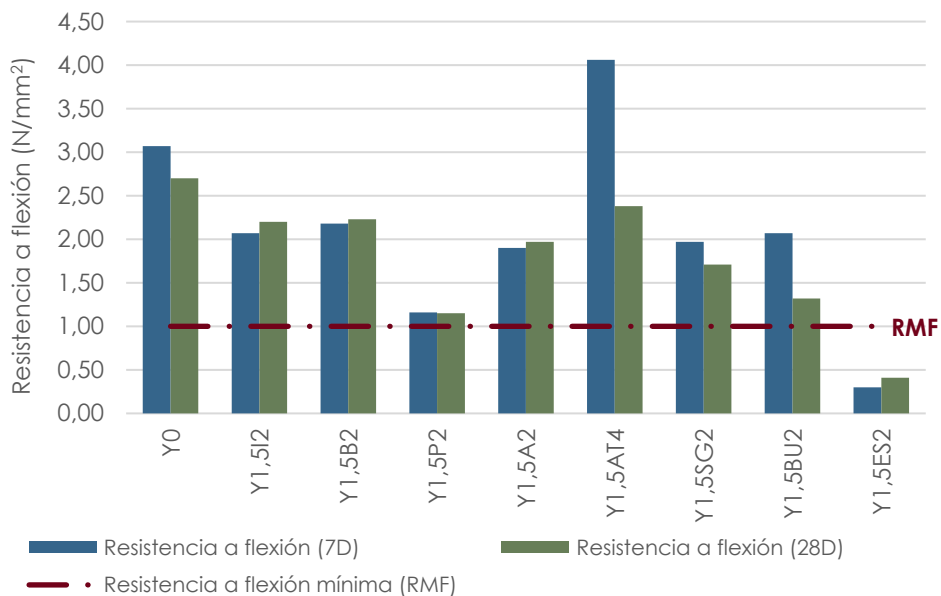


Figura 7.7. Comparativa de la resistencia a flexión a 7 y 28 días de las dosificaciones analizadas en la fase de caracterización de las mezclas

Las pérdidas o ganancias de resistencia a flexión que experimentan las dosificaciones entre el período de 7 a 28 días no responden a ningún patrón en concreto, dado que unas ganan resistencia y otras la pierden.

El descenso en la capacidad mecánica de las dosificaciones puede ser debido a varios aspectos como la propia naturaleza del poliuretano incorporado en sustitución de yeso o la cantidad de agua por yeso a hidratar.

Por último, la tipología y estructura interna del poliuretano tipo ES difiere considerablemente de la del resto de polímeros estudiados, de lo que se deduce que no tenga un comportamiento similar y afín al resto. Tras la rotura del material se observa falta de cohesión y ligazón entre las partículas. Se concluye que este tipo de poliuretano requiere de un estudio de dosificación específico e individualizado.

### 7.3.2.2. Resistencia a compresión

Se estudia el comportamiento mecánico a compresión de las muestras a los 7 y 28 días después de ser elaboradas. Los datos resultantes del ensayo se recogen en la Tabla 7.11.

Clave	Resistencia a compresión (7 días) (N/mm <sup>2</sup> )	Resistencia a compresión (28 días) (N/mm <sup>2</sup> )
Y0	5,88	4,79
Y1,5I2	4,15	4,33
Y1,5B2	4,45	3,95
Y1,5P2	2,32	1,99
Y1,5A2	4,00	3,70
Y1,5AT4	4,06	5,64
Y1,5SG2	4,36	3,71
Y1,5BU2	2,89	2,69
Y1,5ES2	0,65	0,93

Tabla 7.11. Resistencia a compresión de las dosificaciones analizadas en la fase de caracterización de las mezclas

Al igual que sucede con las resistencias a flexión, la resistencia a compresión de las dosificaciones con poliuretano disminuye con respecto a la del material de referencia, con excepción de la mezcla Y1,5AT4 a 28 días que la supera en un 18 %. Los mejores resultados los presentan las mezclas Y1,5I2, Y1,5B2 y Y1,5AT4.

Las variaciones de las resistencias a compresión de las probetas entre los datos de 7 y 28 días no siguen ninguna pauta en concreto.

La normativa de aplicación establece el requisito de que la resistencia a compresión de este tipo de productos sea como mínimo de 2 N/mm<sup>2</sup>. En base a los resultados obtenidos, todas las dosificaciones se

mantienen con valores superiores con excepción de la mezcla Y1,5P2 a 28 días y la Y1,5ES2 nuevamente. En consecuencia, en lo que respecta a la resistencia a compresión, todas las mezclas de yeso con residuo de poliuretano pueden ser replicadas a nivel industrial, con excepción estas dosificaciones (Figura 7.8).

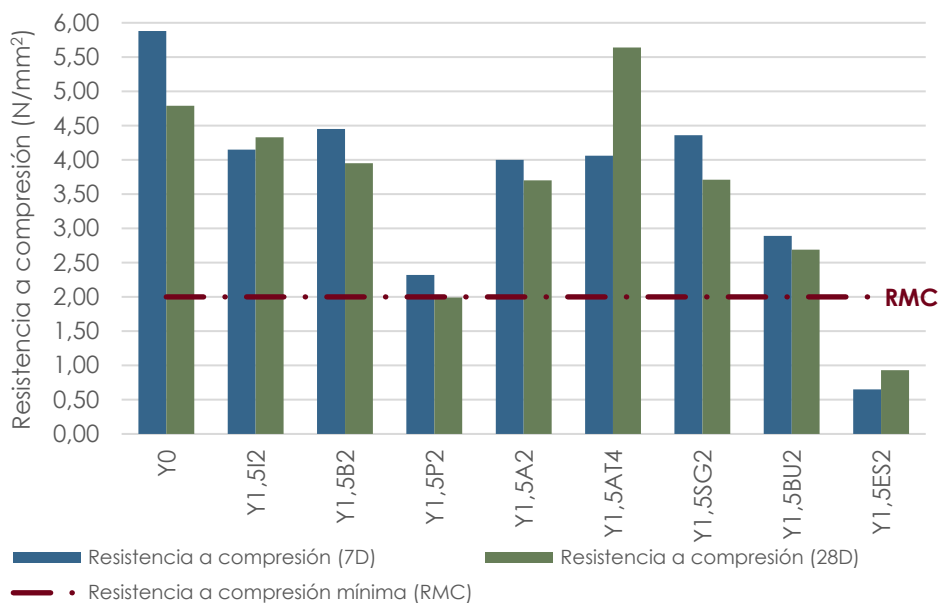


Figura 7.8. Comparativa de la resistencia a compresión a 7 y 28 días de las dosificaciones analizadas en la fase de caracterización de las mezclas

Las razones que justifican la pérdida de resistencia a flexión de las dosificaciones con polímero del apartado anterior, son extrapolables al resto de propiedades mecánicas como la resistencia a compresión que se está analizando en este apartado.

### 7.3.2.3. Dureza Shore C

La dureza superficial de las mezclas se analiza a través del ensayo de dureza Shore C. Los resultados a 7 y 28 días se incluyen en la Tabla 7.12.

Observando los datos se confirma el descenso esperado de la dureza superficial para las mezclas de yeso con poliuretano triturado. Esta respuesta mecánica del material se debe a la sustitución parcial de un material más duro, como es el yeso, por otro más blando, como es el poliuretano. Sin embargo, las muestras Y1,5AT4 y Y1,5A2 escapan de la

tendencia general mostrando resultados que superan a los de la mezcla de referencia.

Clave	Dureza superficial (7 días) (Shore C)	Dureza superficial (28 días) (Shore C)
Y0	67,50	57,50
Y1,5I2	50,50	54,90
Y1,5B2	55,30	53,60
Y1,5P2	40,40	37,00
Y1,5A2	58,40	57,70
Y1,5A4	72,80	69,10
Y1,5SG2	57,30	50,80
Y1,5BU2	43,40	44,50
Y1,5ES2	30,87	29,05

Tabla 7.12. Dureza Shore C de las dosificaciones analizadas en la fase de caracterización de las mezclas

Las pérdidas de dureza Shore C a 7 días van desde el 13 % de la mezcla Y1,5A2 al 54 % de la Y1,5ES2 con respecto a Y0. Mientras que, a 28 días, la dosificación Y1,5I2 muestra valores un 5 % más bajos y, por el lado opuesto, la Y1,5ES2 notifica un 49 % menos.

Dado el bajo rendimiento mecánico de la dosificación Y1,5ES2, ésta deja de incluirse en los ensayos de caracterización llevados a cabo durante esta fase.

#### 7.3.2.4. Adherencia

En este ensayo se evalúa la resistencia a tracción o el grado de adhesión de las pastas a un soporte pasados 28 días de su fabricación. Ciertamente, esta investigación se focaliza en encontrar una mezcla de yeso con residuo de poliuretano a replicar a nivel industrial como placa en techos suspendidos. En consecuencia, la adherencia no es una propiedad de alto interés para los materiales del presente estudio dado que en su diseño no se contempla su aplicación sobre un cerramiento. Si bien, se analiza esta propiedad con el fin de conocer el rendimiento de estos productos de cara a futuras investigaciones en las que sí sea relevante.

Los resultados a 28 días incluidos en la Figura 7.9 muestran dos dosificaciones, la Y1,5I2 y la Y1,5AT4, que superan en un 14 % y 80 %, respectivamente, la resistencia a tracción de la mezcla de yeso tradicional. El resto de muestras presentan valores de adherencia inferiores con una disminución que va del 18 % (Y1,5A2) al 41 % (Y1,5SG2). Se deduce que la resistencia a la adhesión depende del tipo de poliuretano incluido, si bien, la tendencia general es que los resultados se vean mermados.

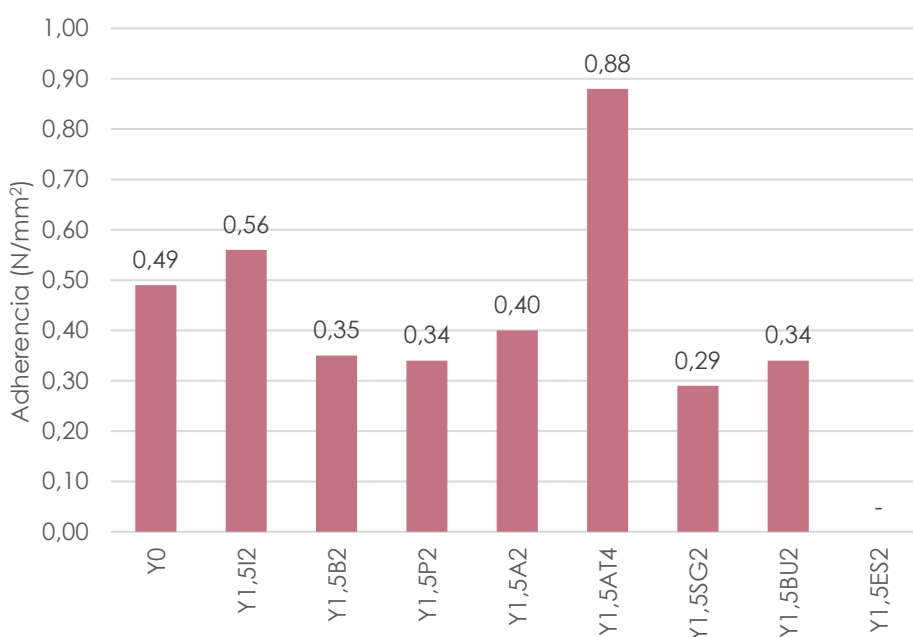


Figura 7.9. Adherencia de las dosificaciones analizadas en la fase de caracterización de las mezclas

La Figura 7.10 detalla el tipo de rotura que se produce en la interfase pasta-soporte durante el ensayo de resistencia a la adhesión. Según las indicaciones de la normativa de aplicación, las muestras Y0, Y1,5P2, Y1,5B2, Y1,5A2 y Y1,5SG2 presentan rotura tipo “b” o rotura por cohesión, lo que significa que la adherencia es superior a los valores indicados en el dispositivo de ensayo. Las dosificaciones Y1,5AT4 y Y1,5BU2 presentan, siendo conservadores, rotura tipo “a” o rotura por adhesión, ello supone que la resistencia a la adhesión coincide con el valor expresado en el equipo.





Y0



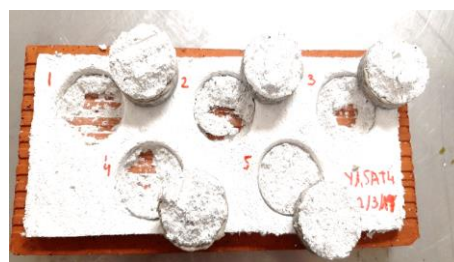
Y1,5P2



Y1,5B2



Y1,5A2



Y1,5AT4



Y1,5SG2



Y1,5BU2

Figura 7.10. Tipos de rotura según la adherencia de las dosificaciones analizadas en la fase de caracterización de las mezclas

### 7.3.3. Caracterización química

El análisis de las propiedades químicas de los materiales analizados comprende el estudio del tiempo de principio de fraguado.

#### 7.3.3.1. Principio de fraguado

Esta propiedad se considera de elevada relevancia ya que una de las premisas para lograr una replicabilidad exitosa de esta fase experimental a nivel industrial es que el tiempo de principio de fraguado no supere los 20-22 min, que es el tiempo máximo en el que la placa de yeso discurre por la línea de producción hasta ser desmoldada.

La Figura 7.11 incluye los resultados del ensayo de principio de fraguado de las diferentes dosificaciones estudiadas.

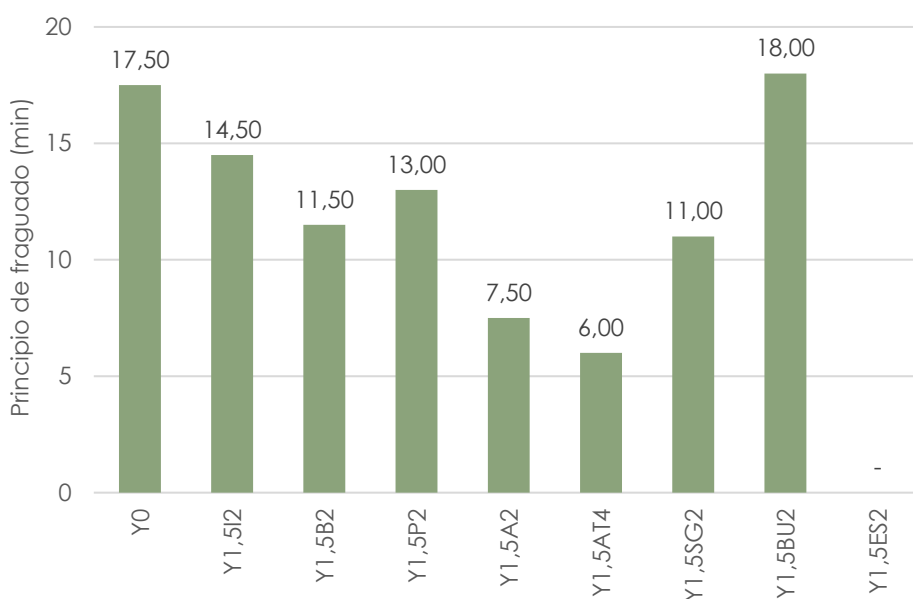


Figura 7.11. Principio de fraguado de las dosificaciones analizadas en la fase de caracterización de las mezclas

Se observa que la incorporación de residuo de poliuretano en las mezclas de yeso conlleva un descenso generalizado en los tiempos de principio de fraguado, con excepción de la mezcla Y1,5BU2. Esta propiedad experimenta una reducción que va desde el 17 % (Y1,5I2) al 66 % (Y1,5AT4). Los resultados más bajos los presentan las mezclas que

incorporan los residuos tipo A y tipo AT, ambos procedentes de la industria automovilística.

Todas las mezclas presentan tiempos de fraguado válidos, excepto la muestra Y1,5BU2 cuyo resultado es muy próximo a los límites preestablecidos para su replicación a nivel industrial.

Un tiempo de fraguado elevado suele estar relacionado con altas cantidades de agua en la mezcla. En este caso, ciertamente todas las dosificaciones tienen la misma relación agua-conglomerante de 0,95, con excepción de la Y1,5AT4 que es de 0,85, si bien esto no implica que incorporen la misma cantidad de agua ya que la sustitución de yeso por poliuretano triturado se realiza en volumen y, por tanto, la cantidad de conglomerante varía según la densidad aparente de cada polímero. Observando las composiciones de cada mezcla se notifica que, efectivamente, estas contienen una cantidad de agua mayor a la de la muestra de referencia, si bien, no se aprecia ninguna correlación entre dicha cantidad y los resultados de principio de fraguado. De ello se deduce interacciones de cada tipo de polímero en dicha propiedad.

#### **7.3.4. Caracterización microscópica**

En análisis microscópico de las mezclas incluye el ensayo de Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) y Tomografía Axial (micro)Computarizada (TAC). Ambos permiten conocer la estructura interna y microscópica del material, así como, la distribución de los diferentes componentes en el interior de la matriz.

##### **7.3.4.1. Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)**

En el microscopio electrónico de barrido se analizan las dosificaciones con los mejores rendimientos mecánicos, éstas son Y1,5I2, Y1,5B2 e Y1,5AT4. Se incluye la muestra de referencia Y0 que carece de residuos de poliuretano.

Esta metodología permite conocer y comparar la microestructura de los materiales analizados, así como, los cambios introducidos por nuevos materiales, la interferencia entre las diferentes materias primas, como el yeso y el poliuretano, y la cohesión entre la pasta y las fibras de vidrio.

La Figura 7.12 incluye las imágenes obtenidas a 40, 150, 300 y 1.200 aumentos para la muestra de referencia (Y0).

En ellas se observa una estructura a base de cristales de yeso hidratado bien desarrollados cuyo tamaño no excede de 50  $\mu\text{m}$ . La formación de este tipo de red cristalina tiene un carácter expansivo.

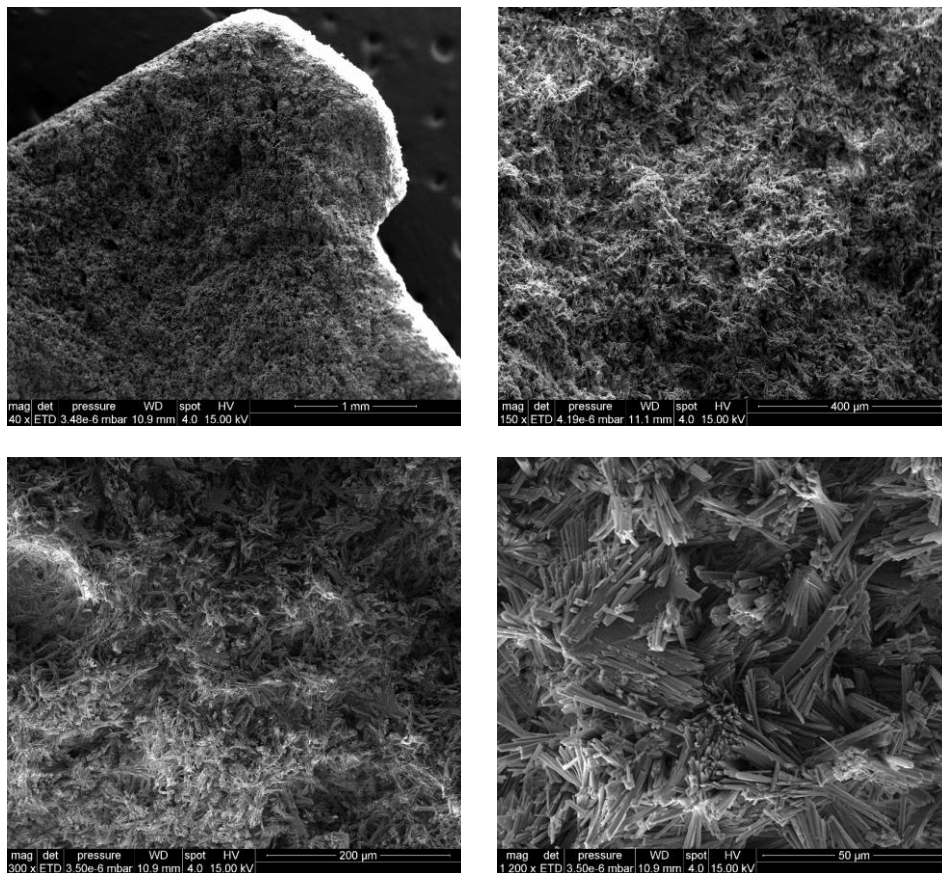


Figura 7.12. MEB dosificación Y0 (40x, 150x, 300x y 1.200x)

La microestructura en detalle de la dosificación Y1,5I2 se recoge en la Figura 7.13, la cual incluye imágenes de 40,150, 298 y 1.193 aumentos.

Se notifica la existencia de cierta porosidad introducida con la incorporación del polímero en la mezcla, así como, los cristales de yeso, el residuo de poliuretano tipo I con forma de celda fragmentada o dividida y las fibras de vidrio. Se observa un tamaño de poliuretano

considerablemente más elevado que el de los cristales de yeso hidratado.

La presencia de partículas de polímero rodeadas de cristales de yeso sin que se produzca reacción química visible entre ambos pero de apariencia estable permite deducir una adecuada cohesión en la interfase yeso-polímero. Se visualizan también fragmentos de fibra de vidrio integrados en la matriz sin signos visibles de falta de cohesión.

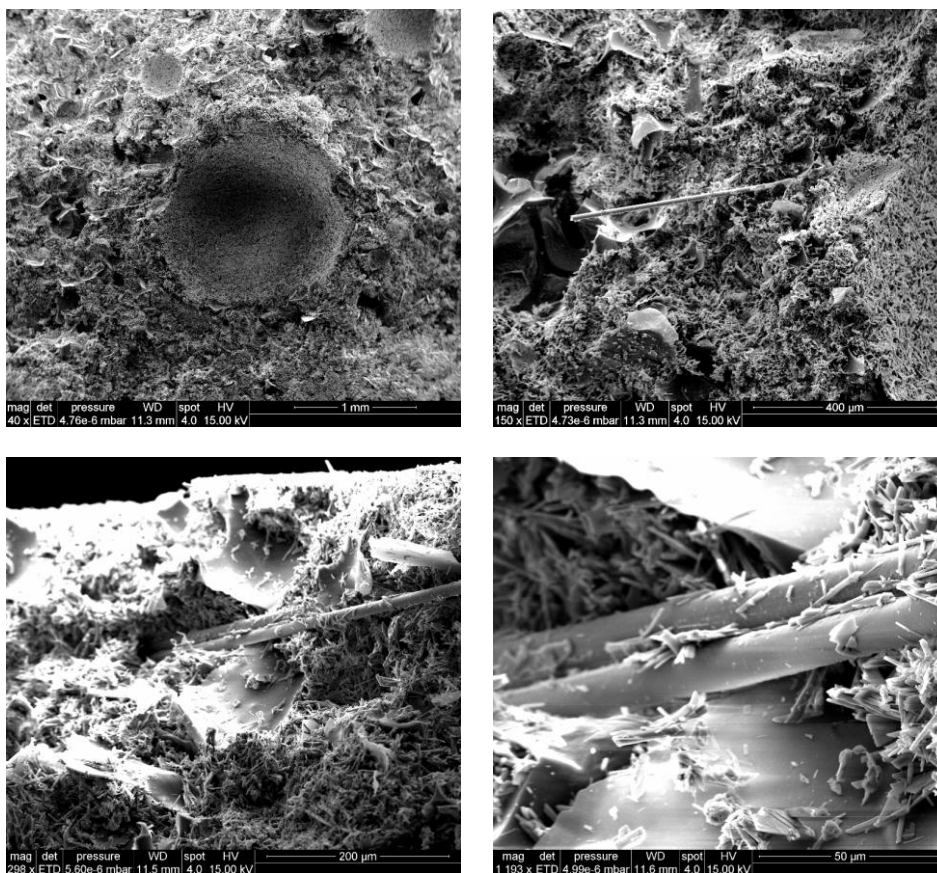


Figura 7.13. MEB dosificación Y1,5I2 (40x, 150x, 298x y 1.193x)

La Figura 7.14 incluye las imágenes obtenidas con ayuda del microscopio electrónico de barrido para la muestra Y1,55B2.

En las imágenes a 40 y 144 aumentos se identifican las diferentes materias primas consideradas y su distribución, apreciándose agrupaciones de polímero y de fibras, así como, cierta porosidad.

Las imágenes a 300 y 1.200 aumentos permiten observar la adecuada cohesión entre los cristales de yeso que rodean las estructuras celulares divididas del poliuretano y las fibras de vidrio.

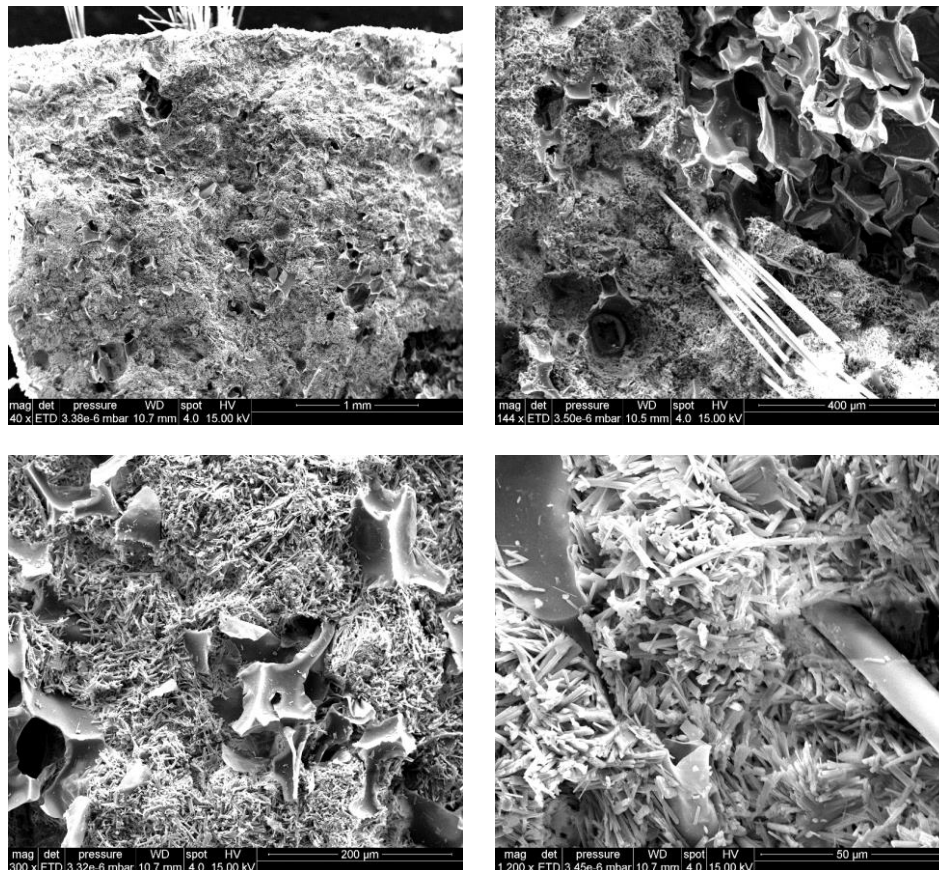


Figura 7.14. MEB dosificación Y1,5B2 (40x, 144x, 300x y 1.200x)

La Figura 7.15 muestra la estructura a nivel microscópico de la dosificación Y1,5AT4. Las imágenes se realizan a 40, 150, 300 y 1.198 aumentos.

En esta mezcla se prescinde de la incorporación de fibra de vidrio ya que en la recepción del residuo se advierte a simple vista de la presencia de algún tipo de estas. El análisis microscópico ratifica la existencia de estos filamentos aun habiendo sido sometido el poliuretano a un proceso de trituración y tamizado.

En cuanto a la mezcla, al igual que en el resto de dosificaciones, se observan tanto los cristales de yeso como las lascas de poliuretano sin que se aprecien signos de incompatibilidad en cuanto a su cohesión. Las fibras se encuentran rodeadas de yeso hidratado, de lo que se deduce una buena trabazón, también avalada por los buenos resultados mecánicos de esta mezcla.

Por el contrario, se notifica una estructura más desordenada y con mayor presencia de poros que el resto de las analizadas. Esta porosidad puede deberse a la baja trabajabilidad que presenta la pasta con la inclusión del poliuretano tipo AT, si bien su influencia a nivel mecánico se intuye baja según los resultados observados.

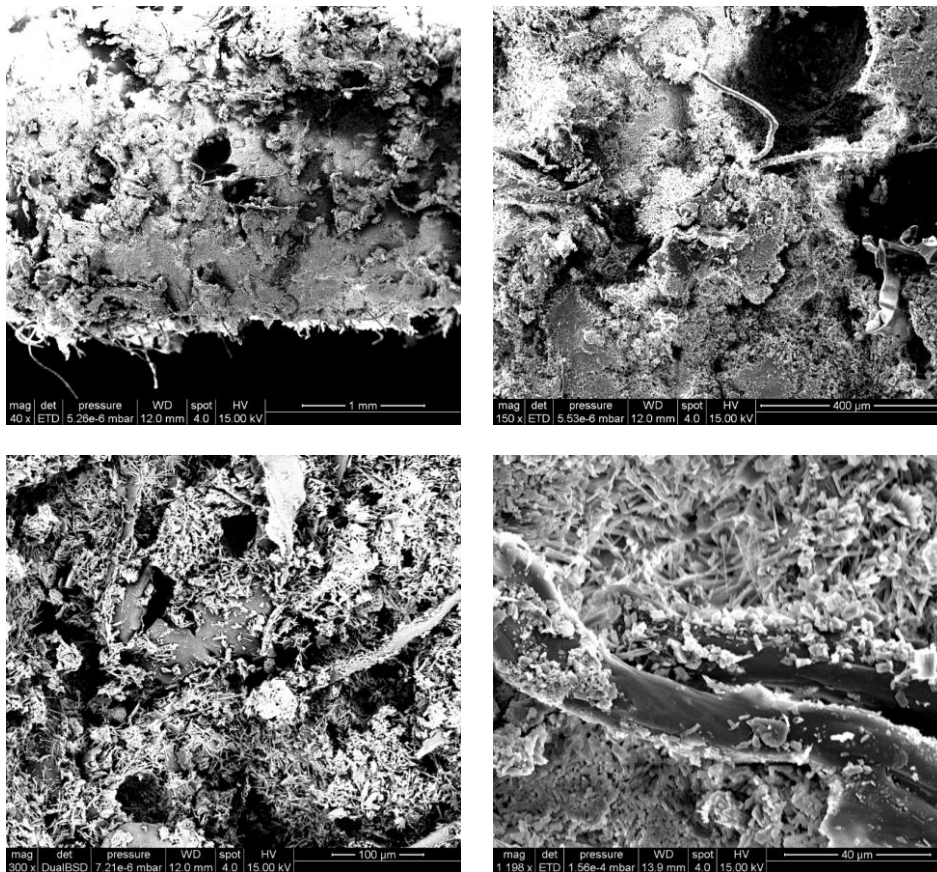


Figura 7.15. MEB dosificación Y1,5AT4 (40x, 150x, 300x y 1198x)

Las imágenes muestran el residuo de poliuretano fragmentado, dividido o con la estructura celular cortada, lo cual se debe al proceso de

trituration previo al que se somete el polímero antes de su incorporación a las mezclas de yeso. En el Capítulo 6 de caracterización de materias primas se incluye la microestructura en detalle de estos poliuretanos sin procesar.

#### 7.3.4.2. Tomografía Axial Computarizada (TAC)

El equipamiento de Tomografía Axial Computarizada (TAC) permite ver imágenes de cortes virtuales que se realizan en la sección de los materiales analizados, posibilitando la observación de la distribución interna de las materias primas y la porosidad.

La Figura 7.16 incluye las infografías obtenidas del análisis por este método de la muestra de referencia.

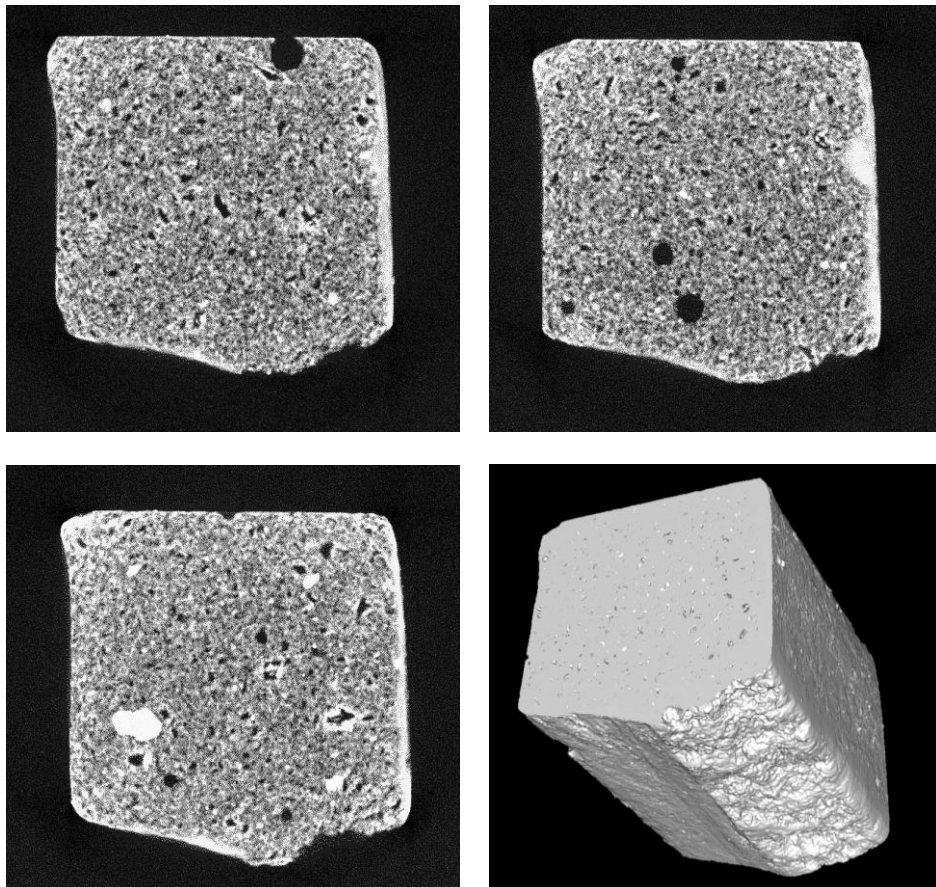


Figura 7.16. TAC dosificación Y0



En las secciones de la muestra Y0 se observa la matriz de la mezcla y la presencia de cierta porosidad, la cual se identifica como la zona más oscura.

Varias tomografías de la mezcla Y1,5I2 se muestran en la Figura 7.17. En comparación con las imágenes de la muestra de referencia se observa un aumento de la porosidad, especialmente de los tamaños más grandes de poros. No se alcanza a diferenciar el residuo de poliuretano en la matriz de yeso y tampoco las fibras de vidrio.

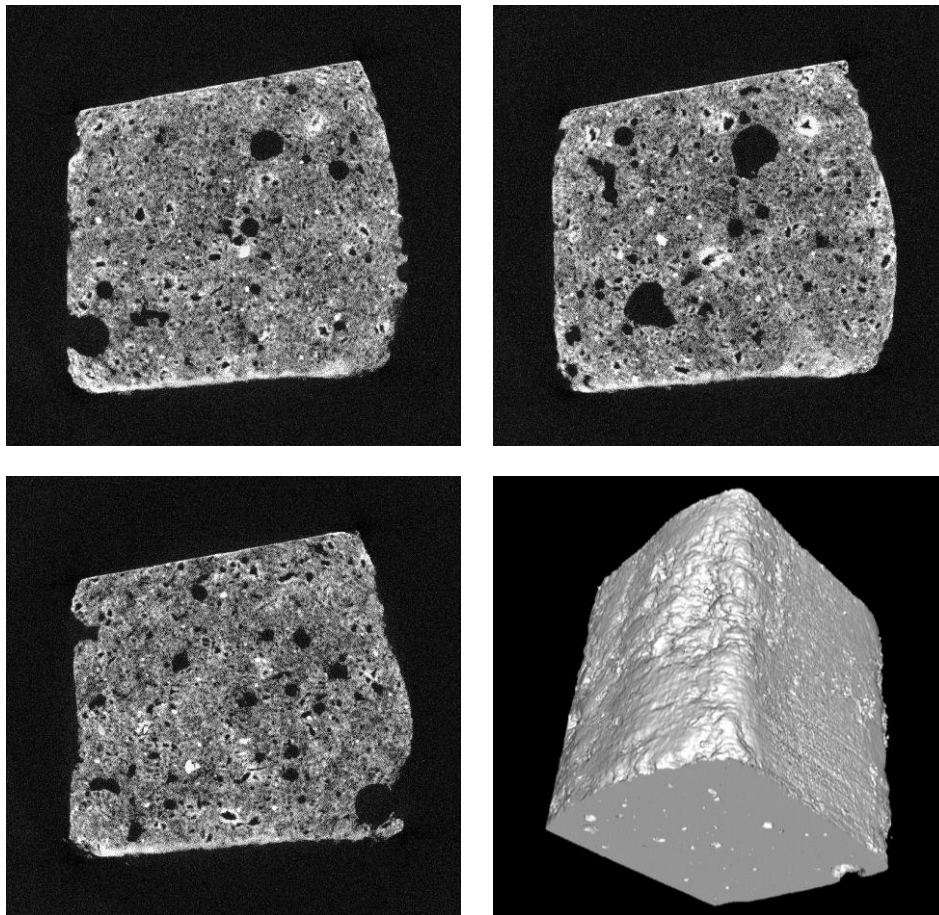


Figura 7.17. TAC dosificación Y1,5I2

El último análisis tomográfico se realiza sobre la mezcla Y1,5B2. La Figura 7.18 incluye varias imágenes con los cortes realizados a través de la probeta. La presencia de poros es aún mayor en cuanto a tamaño y

cantidad en esta dosificación, lo que concuerda con la reducción de densidades aparentes en estado endurecido del apartado de caracterización física.

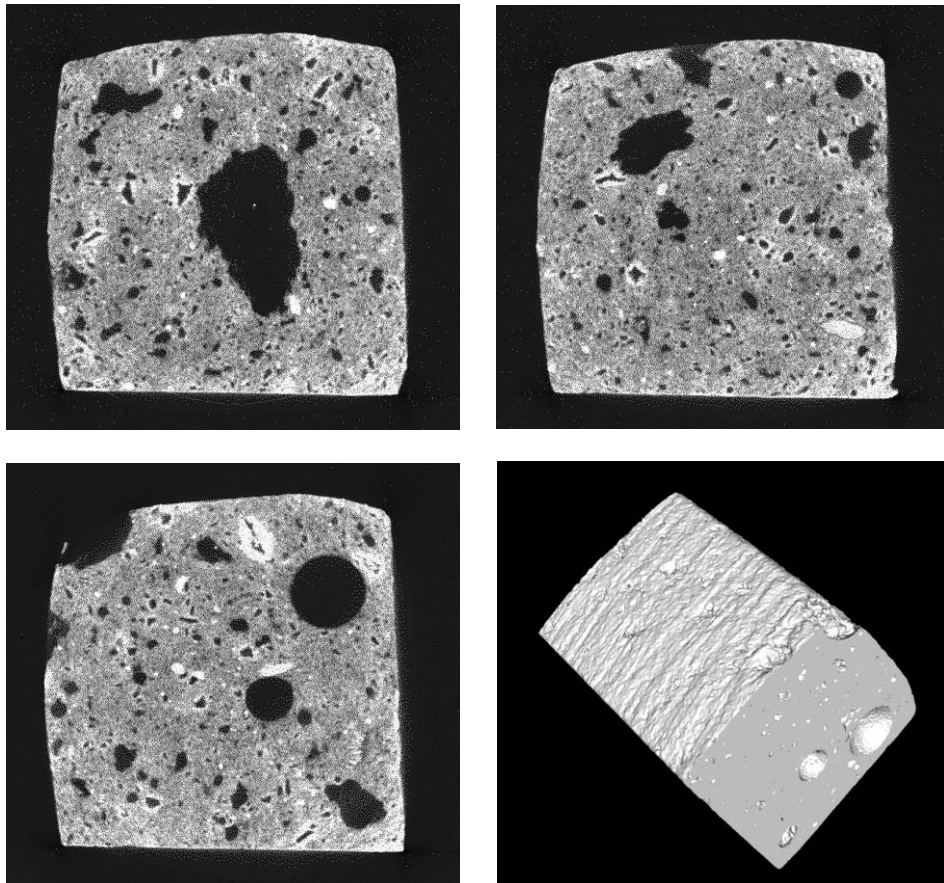


Figura 7.18. TAC dosificación Y1,5B2

### 7.3.5. Caracterización higroscópica

La determinación de las propiedades higroscópicas de las mezclas analizadas en esta fase comprende el análisis de la capacidad de acumulación de agua, la succión de agua, la absorción de agua por inmersión y por capilaridad, la permeabilidad al vapor de agua y la curva de adsorción higroscópica.

### 7.3.5.1. Acumulación de agua

Los resultados relativos a la capacidad de retención de agua de las pastas se detallan en la Tabla 7.13.

Clave	Acumulación de agua (7 días) (%)	Acumulación de agua (28 días) (%)
Y0	58,31	59,26
Y1,5I2	58,75	58,61
Y1,5B2	57,21	60,28
Y1,5P2	59,90	61,69
Y1,5A2	61,18	63,33
Y1,5AT4	40,83	52,43
Y1,5SG2	55,82	61,44
Y1,5BU2	64,78	66,91
Y1,5ES2	67,16	-

Tabla 7.13. Acumulación de agua de las dosificaciones analizadas en la fase de caracterización de las mezclas

Los valores muestran similares capacidades de acumulación de agua para la muestra de referencia Y0 y para las dosificaciones con poliuretano Y1,5I2, Y1,5B2 y Y1,5P2, tanto a 7 como a 28 días. Las muestras Y1,5A2, Y1,5BU2 y Y1,5ES2 presenta valores más altos de entre un 5,5, 12 y 15 %, respectivamente. El poliuretano AT4 reduce significativamente la retención de agua de la pasta en la que se incorpora. Por último, la mezcla con residuo SG2 muestra un comportamiento dispar, a 7 días presenta valores por debajo del material de referencia y a 28 días un dato superior.

La Figura 7.19 muestra la correlación existente entre la acumulación de agua y el tiempo de fraguado de las dosificaciones. Cuanto menor es la capacidad para conservar el agua de la mezcla, menor es el tiempo de principio de fraguado. No obstante, la muestra Y1,5A2 muestra un comportamiento diferente con una alta retención y un tiempo de fraguado reducido.

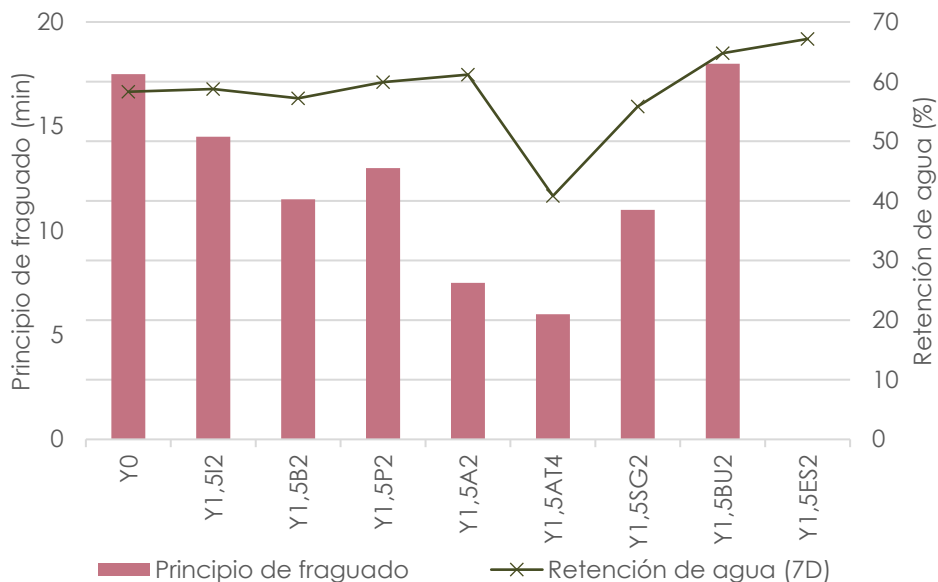


Figura 7.19. Relación entre la acumulación de agua y el tiempo de fraguado de las dosificaciones analizadas en la fase de caracterización de las mezclas

### 7.3.5.2. Absorción de agua por inmersión

El aumento de peso que experimentan las mezclas por absorción al ser introducidas en agua durante 24 horas se muestra en la Figura 7.20.

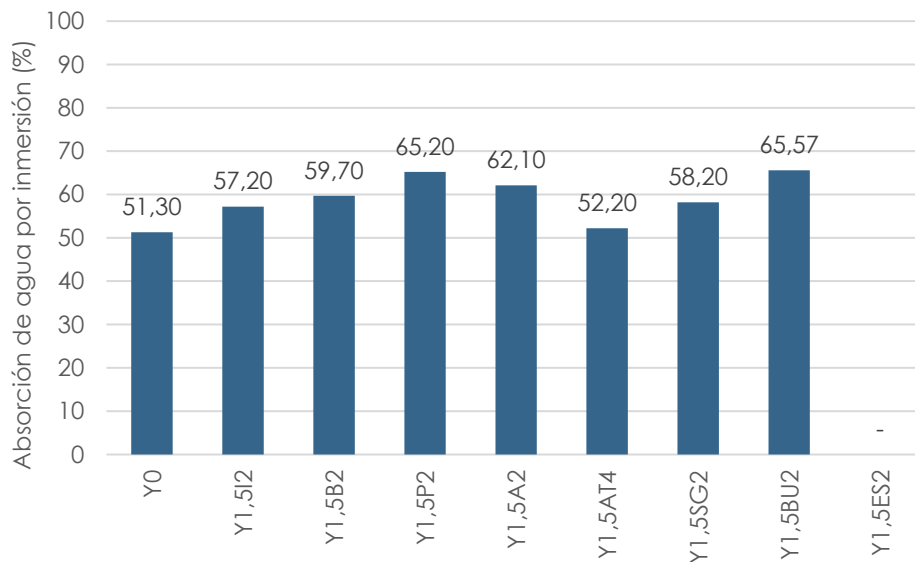


Figura 7.20. Absorción de agua por inmersión de las dosificaciones analizadas en la fase de caracterización de las mezclas

Los valores obtenidos muestran un aumento generalizado de la absorción de agua total con la incorporación de residuo de poliuretano en las mezclas. Los incrementos van desde el 1,75 % de la dosificación Y1,5AT4 al 27 % de las pastas Y1,5P2 y Y1,5BU2.

Esta propiedad está íntimamente relacionada con la porosidad de los materiales, especialmente con la macroporosidad. Ciertamente, en ensayos previos se observa como la introducción de poliuretano y fibra de vidrio en las mezclas de yeso provoca un aumento en la presencia de poros.

Los resultados obtenidos de absorción de agua por inmersión concuerdan con la porosidad observada mediante el TAC para las muestras Y0, Y1,5I2 y Y1,5B2, es decir, a medida que aumenta la cantidad de poros observada en la sección del material se incrementa la capacidad de absorción de agua.

#### **7.3.5.3. Absorción de agua por capilaridad**

La determinación de la absorción de agua por capilaridad se realiza según la metodología descrita en dos normas diferentes.

##### Ensayo según la metodología descrita en la norma RILEM TC 25-PEM

Esta metodología evalúa la absorción de agua por capilaridad del material a los 10 minutos de haberse puesto en contacto con una capa de agua de 2 mm de espesor. Las superficies de las probetas no reciben ningún tratamiento impermeabilizante.

Los resultados obtenidos del ensayo de succión de agua se recogen en la Figura 7.21.

La incorporación de residuo de poliuretano en las mezclas de yeso reduce la succión de agua de la pasta entre un 10 y 19 %, excepto la dosificación Y1,5BU2 cuya succión es un 32 % superior a la de Y0.

En esta propiedad es importante la red capilar del material, especialmente el volumen de microporos y mesoporos, ya que en los macroporos la ascensión o escalada del agua se detiene ante la falta de materia. En este caso vemos que la absorción de agua por capilaridad se reduce en las muestras que incorporan residuo de poliuretano al igual

que el volumen de microporos y mesoporos observado en el ensayo de adsorción de gases.

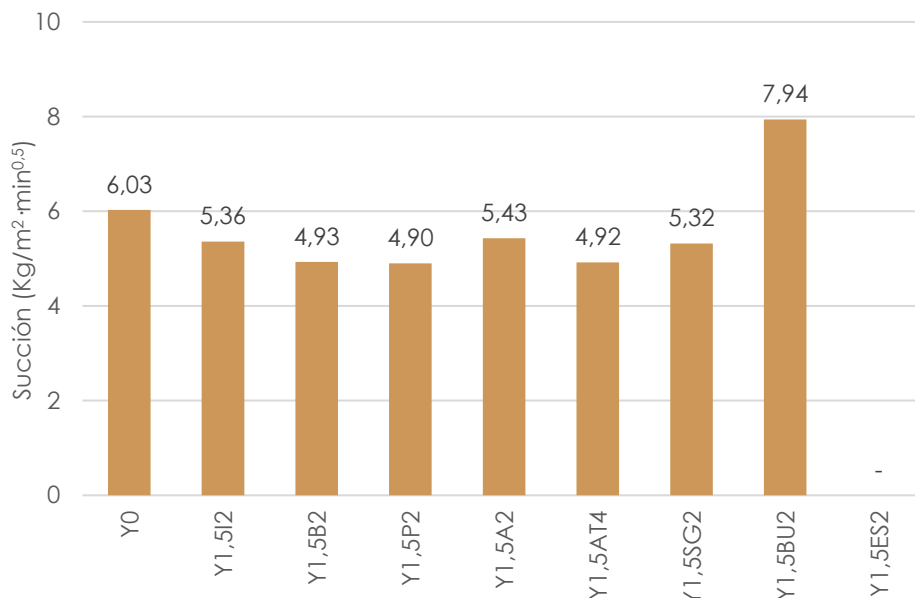


Figura 7.21. Absorción de agua por capilaridad según RILEM TC 25-PEM de las dosificaciones analizadas en la fase de caracterización de las mezclas

Ensayo según la metodología descrita en la norma UNE-EN 1015-18

El coeficiente de absorción de agua por capilaridad se obtiene al pesar las probetas a los 10 y 90 minutos de haber sido puestas en contacto directo con una capa de agua de 5-10 mm. Las superficies laterales de las probetas se protegen con un tratamiento impermeabilizante. Los resultados se muestran en la Tabla 7.14.

Clave	Coefficiente de absorción por capilaridad (C) (kg/(m <sup>2</sup> min <sup>0.5</sup> ))	Altura del agua en la probeta a los 10 min (mm)	Altura del agua en la probeta a los 90 min (mm)
Y0	6,79	66,0	146,7
Y1,5B2	5,88	50,3	122,3
Y1,5AT4	5,93	45,7	119,7
Y1,5BU2	4,76	47,0	108,7

Tabla 7.14. Absorción de agua por capilaridad según UNE-EN 1015-18 de las dosificaciones analizadas en la fase de caracterización de las mezclas

Las mezclas de yeso con residuo de poliuretano muestran una disminución generalizada de la absorción de agua por capilaridad con respecto al material de referencia. Éstas captan entre un 12 % y un 29 % menos de agua cuando están en contacto directo con este líquido.

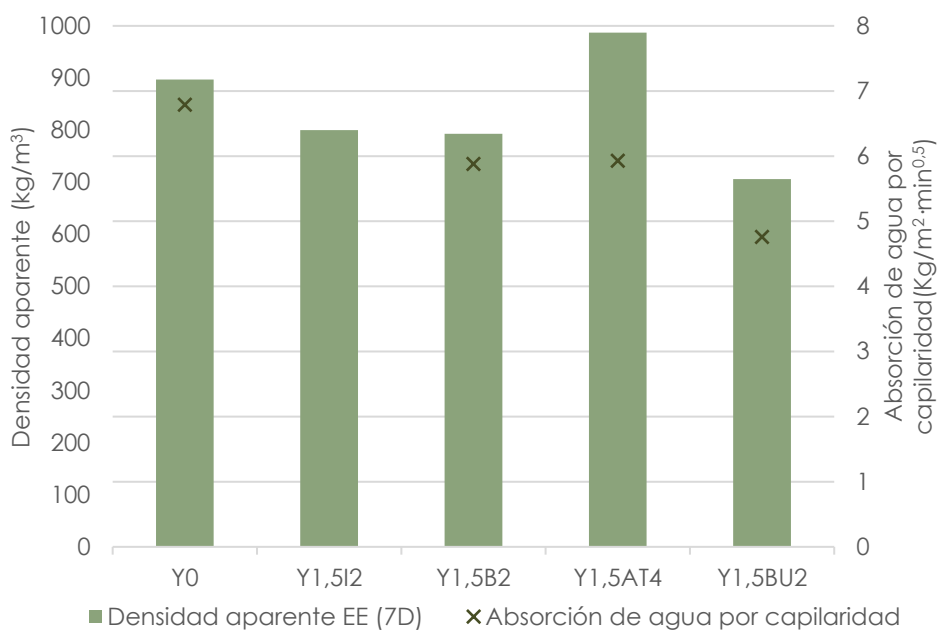


Figura 7.22. Relación entre la absorción de agua por capilaridad y la densidad aparente en EE a 7 días de las dosificaciones analizadas en la fase de caracterización de las mezclas

En la Figura 7.22 se muestra la inesperada correlación entre la densidad aparente y la absorción de agua por capilaridad de los materiales ensayados, excepto para la muestra Y1,5AT4. Este comportamiento es contrario a lo que otros autores señalan<sup>142</sup>. En este caso, la incorporación de residuo de poliuretano produce un descenso de la densidad de la mezcla debido a su mayor ligereza, sin embargo, esta sustitución no necesariamente implica un aumento de la porosidad

<sup>142</sup> Hita, P. R. de, Pérez-Gálvez, F., Morales-Conde, M. J., & Pedreño-Rojas, M. A. (2018). Reuse of plastic waste of mixed polypropylene as aggregate in mortars for the manufacture of pieces for restoring jack arch floors with timber beams. *Journal of Cleaner Production*, 198, 1515-1525. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2018.07.065>

ni, en consecuencia, de la absorción de agua por capilaridad, que no solo depende de la cantidad de poros sino también de su tamaño.

El ensayo se continua hasta pasadas 78 horas de su inicio. Los resultados obtenidos a largo plazo concuerdan con los coeficientes de absorción por capilaridad determinados, siendo la muestra Y0 la de mayor absorción y la mezcla Y1,5BU2 la de menor. En el Anexo 4 se incluye este estudio en profundidad.

#### 7.3.5.4. Permeabilidad al vapor de agua

En ese ensayo no solo se obtienen los resultados de permeabilidad al vapor de agua de las dosificaciones analizadas, también se determina su factor de resistencia al vapor de agua y el espesor de la capa de aire equivalente a la difusión del vapor de agua.

La Tabla 7.15 muestra los valores obtenidos de permeabilidad al vapor de agua según la metodología de ensayo de tina húmeda (20 °C y HR 50-93 %) y según la de tina seca (23 °C y HR 0-50 %).

Clave	Permeabilidad al vapor de agua ( $\delta$ ) (tina húmeda) (20 °C y HR 50-93 %) (Kg/(m · s · Pa))	Permeabilidad al vapor de agua ( $\delta$ ) (tina seca) (23 °C y HR 0-50 %) (Kg/(m · s · Pa))
Y0	$6,55 \times 10^{-11}$	$1,53 \times 10^{-11}$
Y1,5I2	$10,00 \times 10^{-11}$	-
Y1,5B2	$7,89 \times 10^{-11}$	$1,28 \times 10^{-11}$
Y1,5P2	$7,16 \times 10^{-11}$	-
Y1,5A2	$11,10 \times 10^{-11}$	-
Y1,5AT4	$7,35 \times 10^{-11}$	$1,38 \times 10^{-11}$
Y1,5SG2	$10,50 \times 10^{-11}$	-
Y1,5BU2	$7,12 \times 10^{-11}$	$1,37 \times 10^{-11}$
Y1,5ES2	-	-

Tabla 7.15. Ensayo de permeabilidad al vapor de agua de tina húmeda seca (20 °C y HR 50-93 %) y tina seca (23 °C y HR 0-50 %) de las dosificaciones analizadas en la fase de caracterización de las mezclas

En la permeabilidad al vapor de agua en tina húmeda de las mezclas con poliuretano triturado se obtienen valores superiores del orden del 9 al 69 % a los de la muestra de referencia.



En cuanto a los resultados de permeabilidad al vapor de agua en tina seca, la inclusión de residuo polimérico conlleva un descenso generalizado de entre un 10 % y un 16 % de las muestras. Los productos estudiados son menos permeables, es decir, presentan mayor resistencia al paso de vapor de agua a su través. Ello puede suponer la aparición, en los nuevos materiales, de condensaciones intersticiales a una humedad relativa inferior a la que surgirían en la muestra de referencia.

Según estudios previos, la permeabilidad está directamente relacionada con la dimensión de los poros<sup>143</sup>, sin embargo, los datos obtenidos para el ensayo de tina húmeda y tina seca tienen disposiciones contrarias. En el caso de tina húmeda, las muestras que incluyen poliuretano tienen una mayor permeabilidad al vapor de agua que la muestra de referencia, sin embargo, en el caso de tina seca ocurre lo contrario ya que disminuye la permeabilidad de las mismas con respecto de la dosificación Y0.

La Tabla 7.16 incluye los resultados obtenidos en cuanto al espesor de la capa de aire equivalente a la difusión del vapor de agua y el factor de resistencia al vapor de agua del ensayo de tina seca.

Clave	Espesor de la capa de aire equivalente a la difusión del vapor de agua (tina seca) ( $s_d$ ) (m)	Factor de resistencia al vapor de agua (tina seca) ( $\mu$ ) (-)
<b>Y0</b>	0,15	13
<b>Y1,5B2</b>	0,17	15
<b>Y1,5AT4</b>	0,15	14
<b>Y1,5BU2</b>	0,17	14

Tabla 7.16. Factor de resistencia al vapor de agua y espesor de la capa de aire equivalente según tina seca (23 °C y HR 0-50 %) de las dosificaciones analizadas en la fase de caracterización de las mezclas

El espesor de la capa de aire equivalente está directamente relacionado con el factor de resistencia al vapor de agua y el espesor de la muestra, dado que las probetas se fabrican con espesores similares, a

<sup>143</sup> Ferreira, C., de Freitas, V. P., & Delgado, J. M. P. Q. (2020). The Influence of Hygroscopic Materials on the Fluctuation of Relative Humidity in Museums Located in Historical Buildings. *Studies in Conservation*, 65(3), 127-141. <https://doi.org/10.1080/00393630.2019.1638666>

mayor factor de resistencia al vapor de agua mayor es el espesor de la capa de aire equivalente. Con respecto a la dosificación de referencia, este valor aumenta entre el 12 % y el 18 % para las mezclas de yeso con residuo de poliuretano. El factor de resistencia al vapor de agua aumenta entre un 11 % y un 18 % con la incorporación del residuo, lo que concuerda con el análisis realizado sobre los datos de permeabilidad al vapor de agua.

La Figura 7.23 incluye la relación inversa existente entre las propiedades higroscópicas de permeabilidad al vapor de agua y factor de resistencia al vapor de agua.

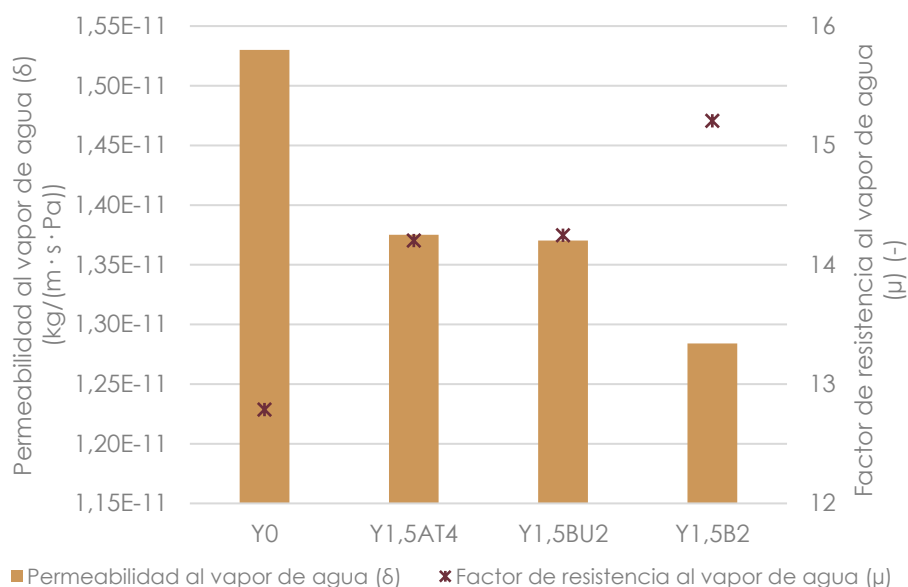


Figura 7.23. Relación entre la permeabilidad al vapor de agua y el factor de resistencia al vapor de agua de las dosificaciones analizadas en la fase de caracterización de las mezclas

### 7.3.5.5. Curva de adsorción higroscópica

La Tabla 7.17 recoge los valores del contenido de humedad de cada muestra analizada para los cuatro ambientes estudiados en cada método de ensayo (método de sala climática y método de desecador).

Clave	Contenido de humedad (u) (Kg/Kg x 100)							
	Método de sala climática				Método de desecador			
	33%	53%	75%	90%	33%	53%	75%	93%
<b>Y0</b>	0,50	1,30	2,19	15,63	0,51	1,83	1,87	15,76
<b>Y1,5B2</b>	0,46	1,17	1,93	13,75	0,41	1,72	1,84	13,85
<b>Y1,5AT4</b>	0,34	1,03	1,77	13,05	0,54	1,74	1,81	13,85
<b>Y1,5BU2</b>	0,46	1,03	1,71	13,18	0,45	1,51	1,58	13,55

Tabla 7.17. Contenido de humedad según el método de sala climática y el método de desecador de las dosificaciones analizadas en la fase de caracterización de las mezclas

Los resultados del método de sala climática muestran, de forma generalizada, un descenso en la absorción de humedad por parte de las muestras con residuo de poliuretano. Si comparamos estas mezclas entre sí, vemos que las de los residuos tipo AT4 y BU2 son las que mayor descenso en el contenido de humedad experimentan, mientras que la dosificación con el residuo B2 se encuentra en un punto de intermedio entre dichas mezclas y la de referencia. Los datos obtenidos del ensayo por el método de desecador también presentan un descenso general en el contenido de humedad de los nuevos materiales, si bien en este caso, la mezcla Y1,5AT4 es la que menor diferencia presenta en el contenido de humedad en relación con el material de referencia.

A este respecto podemos concluir que la incorporación de residuo de poliuretano en mezclas de yeso contribuye a un descenso en el contenido de humedad de las matrices generalizado y que se agrava con el aumento de la humedad relativa. Dada la falta de homogeneidad entre los datos de ambos métodos, no es posible concluir que residuo de poliuretano tiene un mejor comportamiento en esta propiedad.

Las Figura 7.24 y Figura 7.25 incluyen las curvas de adsorción higroscópica de cada material. Los datos reflejan la ganancia de peso porcentual de las muestras con respecto a la masa inicial en estado seco.

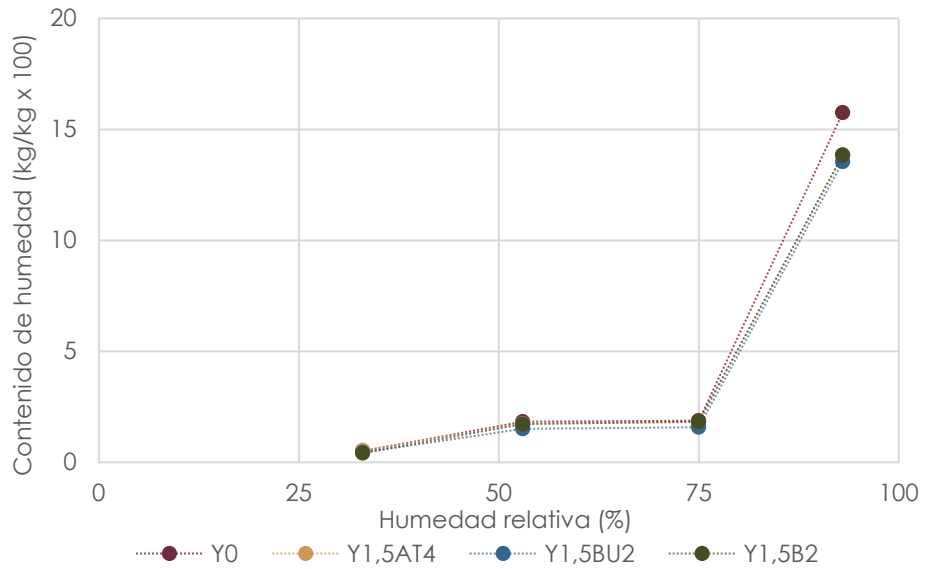


Figura 7.24. Curva de adsorción higroscópica según el método del desecador (Contenido de humedad,  $u$ ) de las dosificaciones analizadas en la fase de caracterización de las mezclas

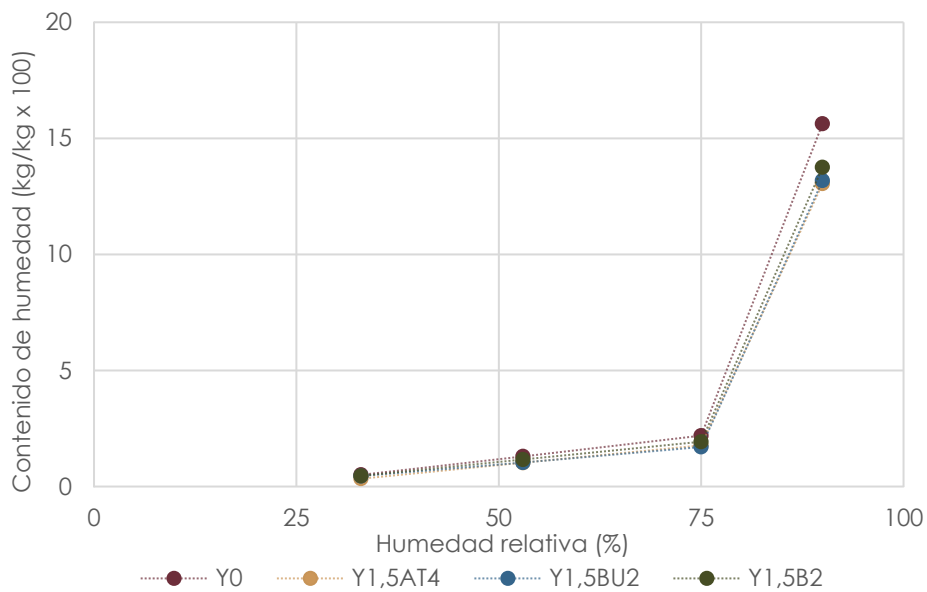


Figura 7.25. Curva de adsorción higroscópica según el método de sala climática (Contenido de humedad,  $u$ ) de las dosificaciones analizadas en la fase de caracterización de las mezclas

Ambos métodos presentan curvas higroscópicas similares para los materiales objeto de estudio, con excepción del punto de análisis del 53 % de humedad relativa en el que difieren ligeramente. En ambos casos se observa un aumento significativo del contenido de humedad de las muestras para humedades relativas superiores al 75 %. Varias investigaciones sugieren que este hecho se deba al fenómeno de condensación capilar del vapor de agua previamente absorbido<sup>144</sup>.

La experiencia en la realización del ensayo hace pensar que el método de la sala climática presenta valores más fiables y homogéneos, dado que la temperatura y la humedad relativa son constantes, estables y están continuamente monitorizadas. El procedimiento de elaboración de las disoluciones y la imposibilidad de conocer la temperatura y humedad relativa en el interior del desecador hacen que este método sea más complejo en su ejecución y que los datos sean menos precisión.

Por otro lado, el contenido de humedad por masa de volumen resulta de multiplicar los datos de contenido de humedad, anteriormente descritos, por la densidad de cada material, lo que permite conocer la ganancia de masa en función del volumen del material en cada ambiente estudiado. La Tabla 7.18 muestra los datos obtenidos en cuanto al contenido de humedad por masa de volumen.

Clave	Humedad por masa de volumen (w) (Kg/m <sup>3</sup> )							
	Método de sala climática				Método de desecador			
	33%	53%	75%	90%	33%	53%	75%	93%
<b>Y0</b>	4,53	11,68	19,73	140,67	4,56	16,49	16,86	141,82
<b>Y1,5B2</b>	3,55	9,00	14,91	106,28	3,19	13,32	14,18	107,04
<b>Y1,5AT4</b>	3,01	9,12	15,76	116,15	4,78	15,49	16,14	123,30
<b>Y1,5BU2</b>	3,11	7,05	11,64	90,00	3,04	10,33	10,82	92,54

Tabla 7.18. Humedad por masa de volumen según el método de sala climática y el método de desecador de las dosificaciones analizadas en la fase de caracterización de las mezclas

<sup>144</sup> Teresa, M., Freire, G., Luísa, A., Lomelino, P., Doctor, V., Manuel, J., Portela Da Costa, A., Flores, S., Colen, B., Do, M., Da, R., Veiga, S., José, A., Grande, E., Doctor, C., Patrício, A. P., Ferreira, T., & França De Santana, P. (2016). Restoration of ancient portuguese interior plaster coatings: Characterization and development of compatible gypsum-based products.

Los datos obtenidos demuestran de nuevo una disminución generalizada de la capacidad de absorción de humedad en diferentes ambientes de los materiales que incorporan poliuretano en su composición. Existe cierta dispersión entre los datos de ambos métodos para la mezcla Y1,5AT4, si bien no ocurre lo mismo para el resto de mezclas que muestran cierta homogeneidad en cuanto a la reducción del contenido de humedad por masa de volumen con respecto al material de referencia (Y0). En este caso, la dosificación Y1,5BU2 obtiene los mejores resultados siendo más notorio a medida que aumenta la humedad relativa a la que se someten las muestras, seguido de la mezcla Y1,5B2.

En las Figura 7.26 y Figura 7.27 se representan los datos de humedad por masa de volumen, obteniendo la curva de adsorción higroscópica de cada material.

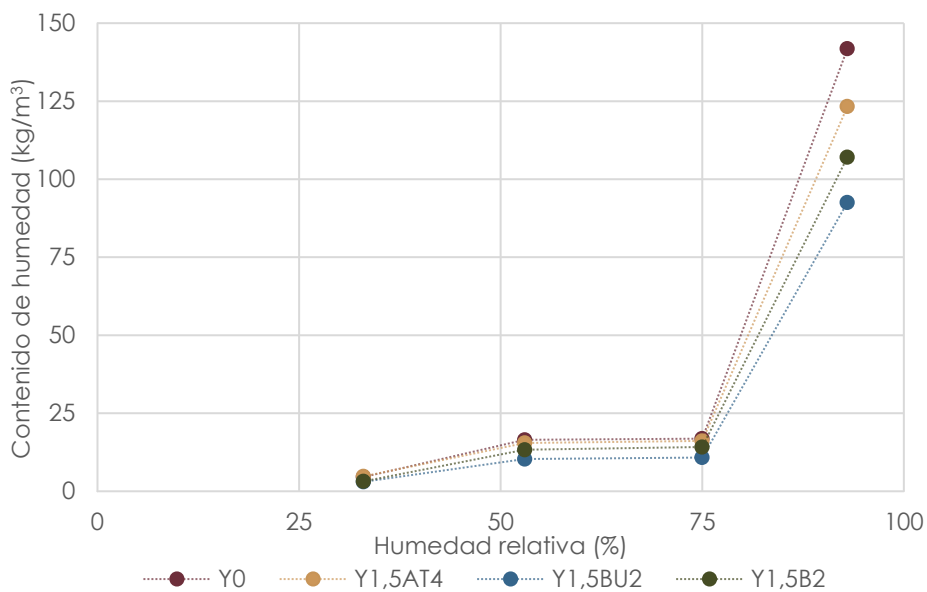


Figura 7.26. Curva de adsorción higroscópica según el método del desecador (Contenido de humedad por masa de volumen,  $w$ ) de las dosificaciones analizadas en la fase de caracterización de las mezclas

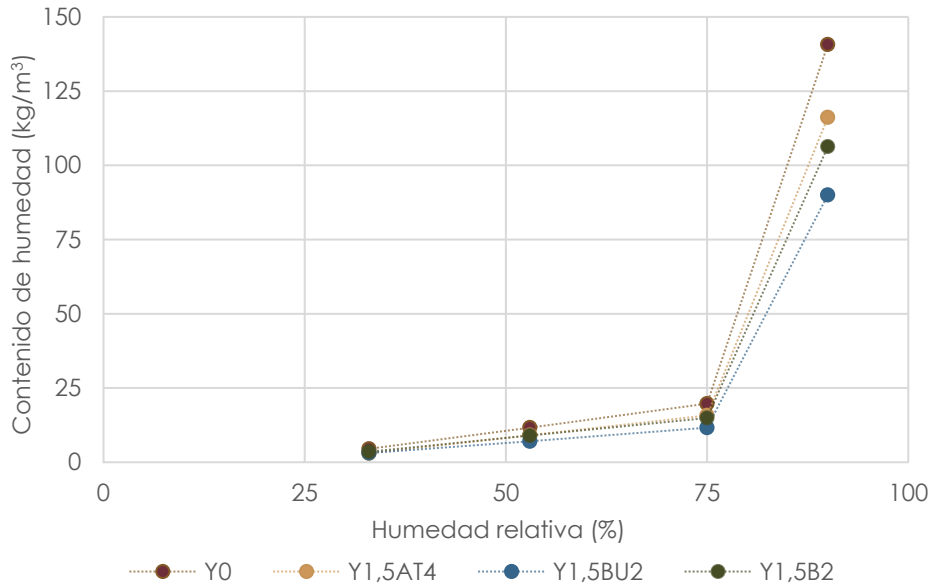
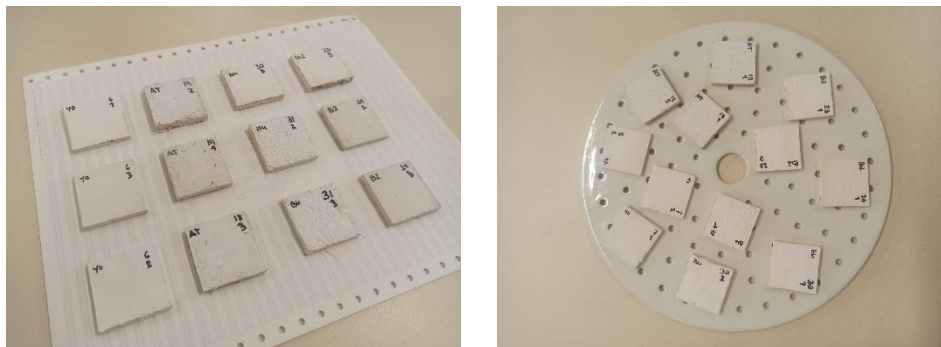


Figura 7.27. Curva de adsorción higroscópica según el método de sala climática (Contenido de humedad por masa de volumen,  $w$ ) de las dosificaciones analizadas en la fase de caracterización de las mezclas

Las curvas de absorción higroscópica subrayan varios puntos de interés concernientes a las humedades relativas del 53 % y a partir del 75 %, mencionados y analizados con anterioridad en el estudio de los resultados del contenido de humedad de cada material.



a) Método sala climática

b) Método desecador

Figura 7.28. Estado final de las probetas de las dosificaciones analizadas en la fase de caracterización de las mezclas una vez terminado el ensayo de curva de adsorción higroscópica por cada método

En la Figura 7.28 se puede observar el estado final de las probetas tras la realización del ensayo. De la inspección visual se concluye que no han aparecido manchas ni rastros fungicidas en el material tras haber sido sometidos a un amplio rango de humedades relativas.

### 7.3.6. Caracterización térmica

La caracterización térmica de las pastas de yeso con residuo de poliuretano comprende la realización de ensayos enfocados a determinar la temperatura de degradación y la clasificación según la reacción al fuego de las mezclas.

#### 7.3.6.1. Termogravimetría (TGA)

El análisis termogravimétrico (TGA) permite conocer la temperatura de degradación de las muestras analizando la pérdida de masa que éstas experimentan en un determinado programa de temperaturas. Se analizan las mezclas Y0, Y1,5I2, Y1,5B2 y Y1,5AT4.

La Tabla 7.19 recoge los resultados del análisis termogravimétrico, incluye los tramos de temperatura en los que las muestras experimentan una degradación considerable y la pérdida de masa correspondiente, así como la temperatura de mayor pérdida de peso en cada intervalo y el residuo restante al finalizar el ensayo.

Clave	Primera degradación (PD) (°C)	Temp. inflexión PD (°C)	Segunda degradación (SD) (°C)	Temp. inflexión SD (°C)	Residuo final (%)
<b>Y0</b>	75-150 (19 %)	125	650-700 (2 %)	669	79,24
<b>Y1,5I2</b>	75-150 (17,5 %)	121	650-750 (5 %)	694	72,05
<b>Y1,5B2</b>	75-150 (18 %)	128	650-750 (4,5 %)	690	73,20
<b>Y1,5AT4</b>	75-150 (18,5 %)	127	650-750 (6,5 %)	700	68,00

Tabla 7.19. Termogravimetría (TGA) de las dosificaciones analizadas en la fase de caracterización de las mezclas

La Figura 7.29 muestra el análisis termogravimétrico de la muestra de referencia. En la gráfica se observa una pérdida de peso significativa, de en torno al 19 %, en el intervalo de 75 a 150 °C. Se experimenta una



segunda degradación de menor impacto en el tramo de 650 a 700 °C con una pérdida del 2 % de la masa.

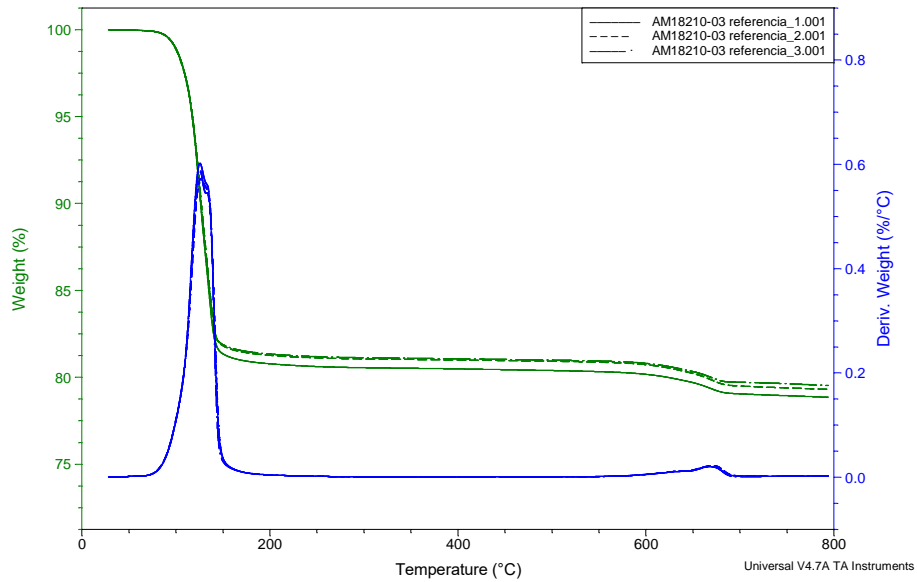


Figura 7.29. Termogravimetría (TGA) de la mezcla Y0

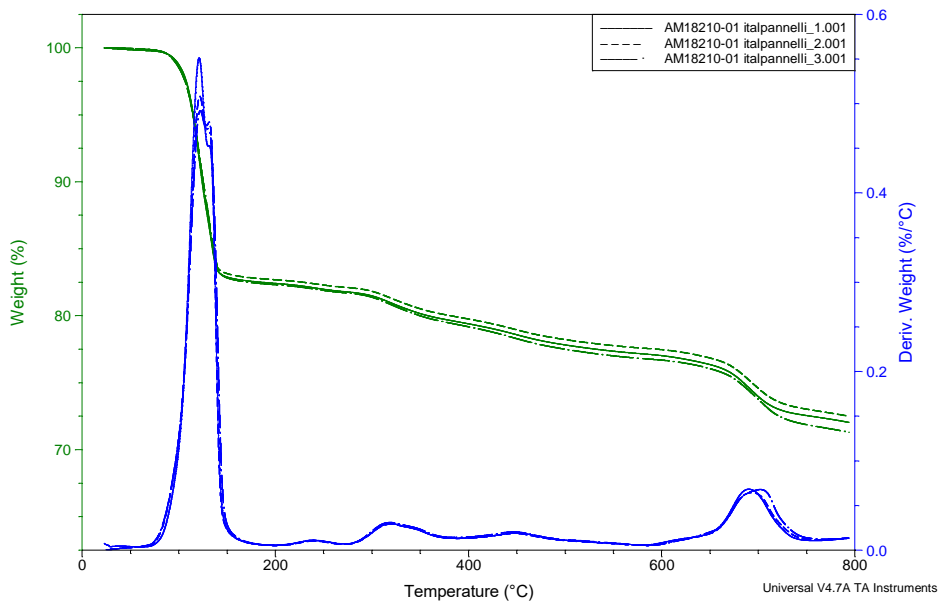


Figura 7.30. Termogravimetría (TGA) de la mezcla Y1,5I2

La gráfica correspondiente al ensayo de termogravimetría de la mezcla Y1,5I2 se incluye en la Figura 7.30. Se aprecia una primera degradación, de entorno al 17,5 %, en el intervalo de temperatura de 75 a 150 °C. Esta dosificación experimenta una progresiva pérdida de masa de los 150 a 650 °C para, a continuación, sufrir una segunda degradación del 5 % de la masa en el tramo de los 650 a 750 °C.

En la Figura 7.31 se observa la gráfica resultante del análisis termogravimétrico de la dosificación Y1,5B2. Ésta experimenta una degradación inicial del 18% en el intervalo de 75 a 150°C, una pérdida de peso gradual en el tramo de 150 a 650 °C y una segunda degradación considerable, de entorno al 4,50 %, entre 650 y 750 °C.

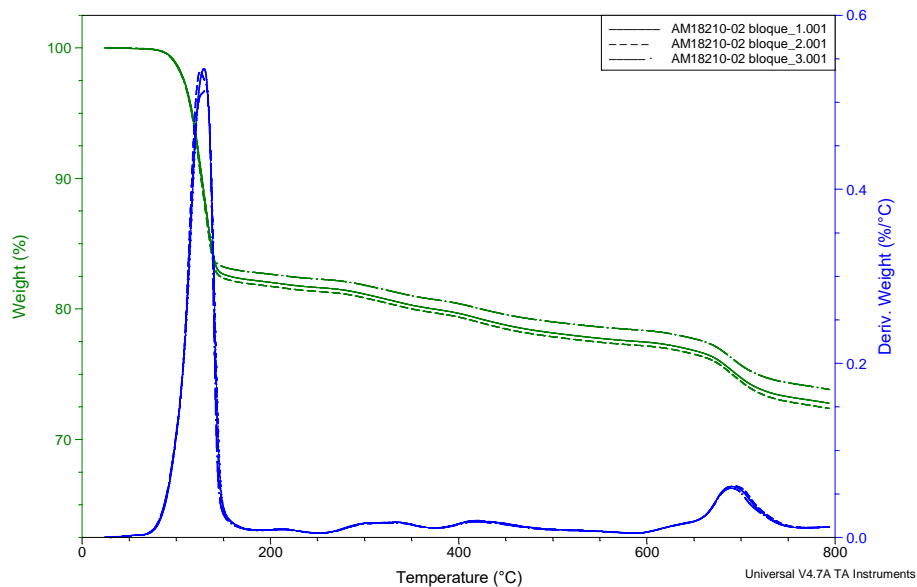


Figura 7.31. Termogravimetría (TGA) de la mezcla Y1,5B2

La gráfica relativa al análisis termogravimétrico de la mezcla Y1,5AT4 se muestra en la Figura 7.32. Se observa una primera degradación, de entorno al 17 %, en el intervalo de temperatura de 75 a 150 °C. Esta dosificación experimenta una paulatina pérdida de masa de los 150 a 650 °C tras la que tiene lugar una segunda degradación del 6 % de la masa en el tramo de los 650 a 750 °C.

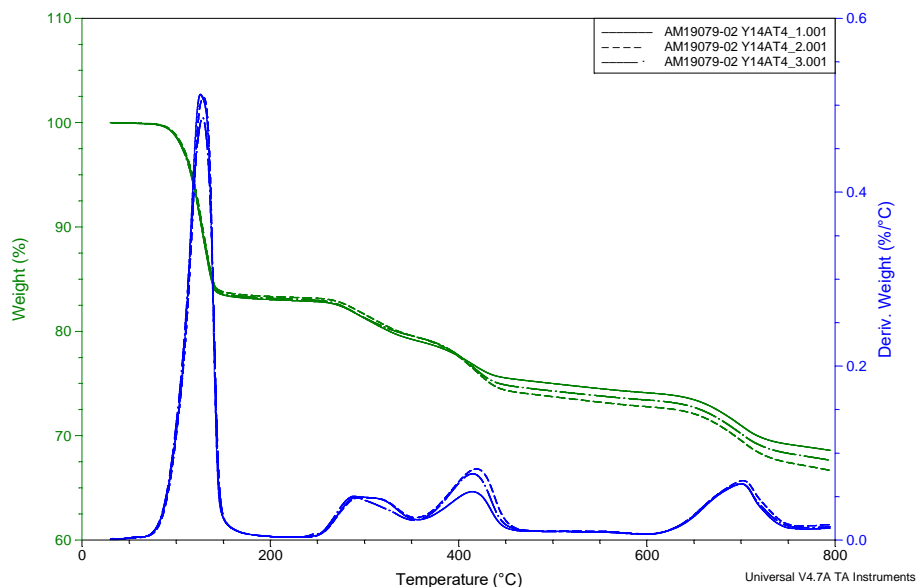


Figura 7.32. Termogravimetría (TGA) de la mezcla Y1,5AT4

Del análisis de las gráficas termogravimétricas y los valores obtenidos se concluye que la degradación inicial es muy similar entre el material de referencia y las mezclas de yeso que incluyen residuo de poliuretano.

Todas ellas experimentan una importante degradación inicial de entorno al 17-20 % de la masa en el tramo de temperatura de 75 a 150 °C debido a la doble pérdida de agua estructural en la que el dihidrato del yeso se transforma en hemihidrato y de este en anhidrita. Si bien, las dosificaciones que incorporan poliuretano triturado experimentan en esta etapa una pérdida de masa ligeramente inferior a la del material de referencia.

En el tramo de 150 a 650 °C únicamente las pastas con polímero muestran una pérdida de peso de alrededor del 5 y 8 %, lo que se debe a la degradación del polímero que, según los análisis termogravimétricos de los diferentes tipos de poliuretano incluidos en el Capítulo 6 del presente documento, se encuentra en esta franja de temperaturas.

La segunda pérdida de masa considerable, situada entre los 650 y 750 °C, está relacionada con la descomposición de la calcita presente

en el yeso<sup>145</sup>. Esta etapa se ve influenciada por la incorporación de poliuretano ya que la pérdida de peso aumenta para estas mezclas entre un 2,5 y 4,5 %, además la degradación se produce para una temperatura de 20-30 °C superior a la de la muestra de yeso tradicional.

Por otro lado, la cantidad de residuo se reduce en las nuevas dosificaciones que incorporan el polímero. Se concluye que la inclusión de residuo de poliuretano en las mezclas de yeso no advierte ninguna anomalía detectable en el análisis termogravimétrico que implique su rechazo.

#### **7.3.6.2. Reacción al fuego. Ensayos de no combustibilidad y calor bruto de combustión**

Del ensayo de no combustibilidad se obtienen los datos relativos al incremento de temperatura del horno, la persistencia de la inflamación y la pérdida de masa. Todas las muestras se someten a este ensayo con excepción de la dosificación de referencia, que por estar compuesta íntegramente de yeso adquiere automáticamente la clasificación A1.

Para completar la clasificación según el comportamiento al fuego de las mezclas es preciso realizar el ensayo de calor bruto de combustión mediante el que se determina el potencial calorífico superior. Este ensayo se realiza únicamente en las muestras Y1,5I2 y Y1,5B2 dado que los datos relativos al ensayo de no combustibilidad previo se encuentran por debajo de los límites máximos permitidos.

Los informes del ensayo obtenidos se incluyen en el Anexo 5.

La Tabla 7.20 muestra los resultados de los ensayos realizados para conocer el comportamiento de reacción al fuego de las muestras.

---

<sup>145</sup> Silva, F. G. S., Junior, R. A. F., Da Silva, J. S., Pinto, K. W., Andrade, H. M. C., Dweck, J., & Gonçalves, J. P. (2015). Hydration of the equilibrium catalyst (Ecat) calcium hydroxide system: Thermogravimetric study of the formation of main hydrated phases. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 120(2), 1089-1098. <https://doi.org/10.1007/s10973-015-4449-8>

Clave	Incremento de la temperatura del horno ( $\Delta T$ ) (°C)	Persistencia de la inflamación (ti) (s)	Pérdida de masa ( $\Delta m$ ) (%)	Potencial calorífico superior (MJ/Kg)	Clase
Y0	-	-	-	-	A1
Y1,5I2	19,50	0	27,72	1,5960	A1
Y1,5B2	15,80	0	26,73	1,0477	A1
Y1,5P2	53,20	1006	32,87	-	-
Y1,5A2	*	*	*	-	-
Y1,5AT4	*	*	*	-	-
Y1,5SG2	*	*	*	-	-
Y1,5BU2	*	*	*	-	-
Y1,5ES2	*	*	*	-	-

Tabla 7.20. Ensayos de combustibilidad y calor bruto de combustión de las dosificaciones analizadas en la fase de caracterización de las mezclas

Analizando los resultados obtenidos para las dosificaciones Y1,5I2, Y1,5B2 y Y1,5P2, se observa que todas ellas cumplen con los requisitos establecidos en la tabla 1 de la norma UNE-EN 13501-1:2007+A1<sup>146</sup> para su clasificación con A1 o A2, con excepción del incremento de la temperatura del horno y la persistencia de la inflamación en la mezcla de yeso con residuo tipo P2.

Las muestras Y1,5A2, Y 1,5AT4, Y1,5SG2, Y1,5BU2 y Y1,5ES2 también se estudian, no obstante, ninguna de estas pruebas llega a su consecución o finalización bien porque la temperatura aumenta por encima de los 900 °C o bien porque la persistencia a la inflamación supera los 20 segundos (máximo según normativa).

Los resultados de potencial calorífico superior de ambas dosificaciones obtenidos del ensayo de calor bruto de combustión permiten la clasificación de las mezclas Y1,5I2 y Y1,5B2 como A1, igualando la prestación de reacción al fuego del material de referencia.

<sup>146</sup> Asociación Española de Normalización (AENOR). (2009). UNE-EN 13501-1:2007+A1 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.

La Figura 7.33 incluye la pérdida de masa que experimentan las muestras en los ensayos de termogravimetría y no combustibilidad en los que son sometidas a gradientes de temperatura similares. Se observa la similitud en los resultados en ambas pruebas, garantizando la correcta ejecución de ambas y avalando los resultados obtenidos.

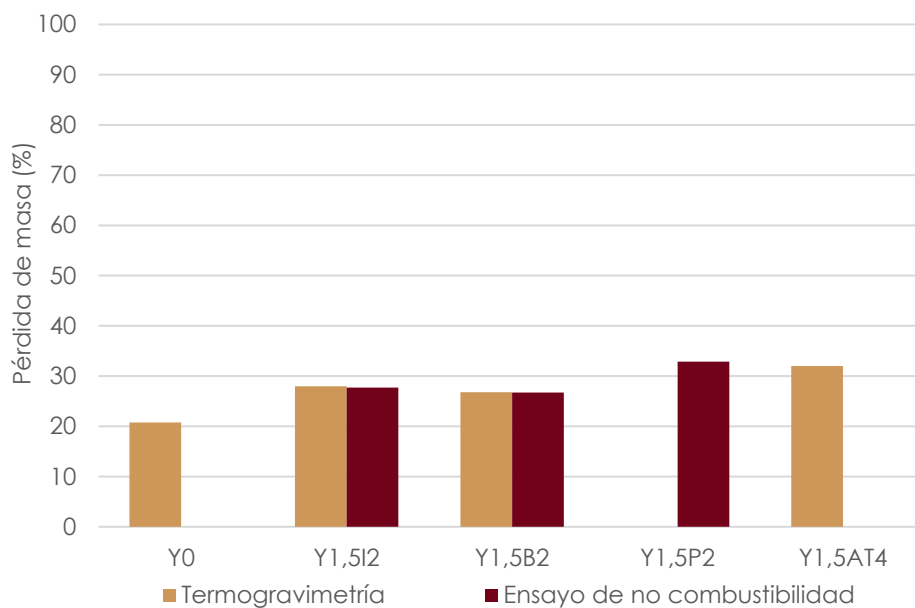


Figura 7.33. Relación entre la pérdida de masa en los ensayos de termogravimetría y de no combustibilidad de las dosificaciones analizadas en la fase de caracterización de las mezclas

### 7.3.7. Conclusiones

El desempeño físico, mecánico, químico, microscópico, higroscópico y térmico de las mezclas de yeso con poliuretano triturado se resume en la Tabla 7.21. En ella se recogen las propiedades evaluadas para cada dosificación según el tipo de polímero y se clasifican en base a su rendimiento.

La mezcla de referencia es excluida del análisis comparativo ya que el objetivo final es determinar cuál de todas aquellas que incorporan poliuretano reciclado es seleccionada para su replicación a nivel industrial.

	Mezcla según el tipo de poliuretano reciclado							
	I2	B2	P2	A2	AT4	SG2	BU2	ES2
<b>Caracterización física</b>								
Densidad aparente EF	4	3	2	6	7	5	1	-
Densidad aparente EE (7D)	6	5	2	4	8	7	3	1
Densidad aparente EE (28D)	7	4	2	6	8	5	3	1
Densidad real	-	-	-	-	-	-	-	-
Granulometría por d. láser	-	-	-	-	-	-	-	-
Adsorción física de gases	5	4	3	2	-	1	-	-
Conductividad térmica (UBU)	1	3	-	-	4	-	2	-
Conductividad térmica (FEUP)	-	1	-	-	3	-	2	-
Conductividad térmica (ISOMET)	-	1	-	-	3	-	2	-
Colorimetría	x	x	x	x	x	x	x	x
Viscosidad aparente	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Caracterización mecánica</b>								
Resistencia flexión (7D)	3	2	7	6	1	5	3	8
Resistencia flexión (28D)	3	2	7	4	1	5	6	8
Resistencia compresión (7D)	3	1	7	5	4	2	6	8
Resist. compresión (28D)	2	3	7	5	1	4	6	8
Dureza Shore C (7D)	5	4	7	2	1	3	6	8
Dureza Shore C (28D)	3	4	7	2	1	5	6	8
Adherencia	2	4	5	3	1	7	6	-
Deformación bajo carga	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Caracterización química</b>								
Análisis elemental (CHNS)	-	-	-	-	-	-	-	-
Lixiviación	-	-	-	-	-	-	-	-
Principio de fraguado	6	4	5	2	1	3	7	-
<b>Caracterización microscópica</b>								
M. Elect. de Barrido (MEB)	x	x	-	-	x	-	-	-
Tomografía Axial Comp. (TAC)	x	x	-	-	-	-	-	-
<b>Caracterización higroscópica</b>								
Acumulación de agua (7D)	4	3	5	6	1	2	7	8
Acumulación de agua (28D)	2	3	5	6	1	4	7	-
Absorción por inmersión	2	4	6	5	1	3	7	-
Absorción por capilaridad-RILEM	5	3	1	6	2	4	7	-
Absorción por capilaridad-UNE	-	2	-	-	3	-	1	-
Permeabilidad al vapor (HÚMEDA)	3	4	6	1	5	2	7	-
Permeabilidad al vapor (SECA)	-	3	-	-	1	-	2	-
C. adsorción higroscópica	-	x	-	-	x	-	x	-
<b>Caracterización térmica</b>								
Termogravimetría (TGA)	2	1	-	-	3	-	-	-
Reacción al fuego (No comb.)	2	1	x	x	x	x	x	x
Reacción al fuego (CBC)	2	1	-	-	-	-	-	-
<b>Caracterización acústica</b>								
Absorción acústica	-	-	-	-	-	-	-	-

1, 2 y 3: Rendimiento bueno

4 y 5: Rendimiento medio

6, 7 y 8: Rendimiento malo

x: propiedad analizada pero no evaluable cuantitativamente

Tabla 7.21. Clasificación según los resultados obtenidos de las dosificaciones analizadas en la fase de caracterización de las mezclas

Las propiedades de adherencia, adsorción de gases y caracterización higroscópica no se consideran relevantes a la hora de seleccionar una dosificación para su replicación industrial. Por ello, en la tabla se incluye su clasificación sin colorear.

Por otro lado, de los ensayos de colorimetría, Microscopía Electrónica de Barrido (MEB), Tomografía Axial Computarizada (TAC) y curva de adsorción higroscópica se obtienen resultados cualitativos no evaluables de forma cuantitativa.

Con respecto a la caracterización física se entiende un mejor rendimiento del producto cuanto menor sea su peso o densidad y su conductividad térmica. A este respecto se concluye que:

- Las dosificaciones más ligeras tienen lugar en las pastas con residuos tipo B2, P2, BU2 y ES2.
- En el ensayo de adsorción de gases se notifica un menor volumen de microporos y mesoporos con la inclusión de cualquier tipo de poliuretano en la mezcla.
- La conductividad térmica se reduce en todos los casos analizados con respecto al material de referencia, excepto para la pasta Y1,5AT4.

Con respecto a las propiedades mecánicas, se valora positivamente cuanto mayor sea su resistencia. En consecuencia, se concluye que:

- La inclusión de residuo de poliuretano triturado en las mezclas supone un descenso generalizado del rendimiento a nivel mecánico.



- Los resultados de resistencia flexión y compresión a 7 y 28 días se sitúan por encima de los requerimientos normativos, con excepción de la mezcla Y1,5ES2 que se descarta de la investigación.
- La dureza Shore C disminuye en todas las dosificaciones con respecto a la dureza superficial de la mezcla Y0, excepto la Y1,5AT4.

Con respecto a la caracterización química, los tiempos de fraguado cortos se entienden más favorables. Por lo tanto, se concluye que:

- Todas las mezclas fraguan antes del tiempo máximo de principio de fraguado establecido por la planta de fabricación industrial.

Con respecto a la caracterización microscópica se concluye que:

- El ensayo de microscopía electrónica de barrido corrobora la cohesión entre las diferentes materias primas incluidas en las pastas.
- De la Tomografía Axial Computarizada (TAC) se concluye una mayor presencia de macroporos en las muestras que incluyen el residuo polimérico.

Con respecto a la caracterización higroscópica, de forma general se considera como positivo la resistencia del material a la penetración de agua en su interior. Por otra parte, valores elevados de permeabilidad se consideran favorables en ciertos materiales de revestimiento. En resumen, se concluye que:

- Las diferentes propiedades higroscópicas analizadas están íntimamente relacionadas con la porosidad de los materiales. Las mezclas de yeso y residuo de poliuretano presentan menor cantidad de microporos y mesoporos con respecto a la mezcla de yeso estándar, mientras que la superan en el volumen de macroporos, de ahí que la tendencia sea cambiante según el tipo de ensayo realizado.
- La acumulación de agua de las mezclas varía según el tipo de poliuretano incorporado, superando en ocasiones a la del material de referencia y siendo inferior en otras.

- La absorción de agua por inmersión de este tipo de dosificaciones aumenta con la inclusión del polímero en su matriz.
- La absorción de agua por capilaridad es inferior a la del material de referencia en todos los casos con excepción de la mezcla Y1,5BU2.
- La permeabilidad al vapor de agua en tina húmeda es superior para las mezclas de yeso con poliuretano, mientras que en la tina seca muestra valores inferiores a los de la muestra de yeso de referencia.
- En cuanto a la curva de adsorción higroscópica tanto la muestra de yeso como las dosificaciones que incorporan poliuretano tienen tendencias similares, notificando un importe aumento en el contenido de humedad a partir de una humedad relativa del 75 %.

Con respecto a las propiedades térmicas, se entiende un mejor rendimiento cuanto más alta sea su clasificación frente al fuego. Finalmente, se concluye que:

- En el ensayo de termogravimetría no se notifica ningún comportamiento anómalo por parte de las muestras analizadas.
- Únicamente las dosificaciones Y1,5I2 y Y1,5B2 obtienen la clasificación pretendida de reacción al fuego A1. La presencia de pequeñas partículas metálicas en el resto de poliuretanos puede constituir el impedimento para lograr dicha clasificación.

La caracterización térmica, específicamente los ensayos de reacción al fuego y poder calorífico, resulta determinante en la selección de la dosificación a replicar a nivel industrial. La mezcla Y1,5B2+1%F+0,5%A es la escogida dado que de entre las posibles es la que mejores resultados en la fase de caracterización presenta, no obstante, la dosificación Y1,5I2+1%F+0,5%A es igual de válida.

Fruto de esta investigación es el modelo de utilidad U201931952 – Prefabricado de yeso aligerado con residuos de espuma de poliuretano, su procedimiento de fabricación y utilización del mismo.

**Industrialización  
de placas de  
yeso con residuo  
de poliuretano**

**08**



## **CAPÍTULO 8. INDUSTRIALIZACIÓN DE PLACAS DE YESO CON RESIDUO DE POLIURETANO**

El objetivo principal de la fase de industrialización consiste en demostrar la viabilidad productiva a escala industrial de la dosificación óptima seleccionada en la fase experimental.

El presente capítulo recoge las medidas y modificaciones necesarias en la planta para lograr la fabricación del producto. Se detalla el proceso de fabricación de la placa de yeso con residuo de poliuretano, así como el análisis de sus propiedades principales. Por último, se crea un protocolo de gestión de residuos de poliuretano con la finalidad de mejorar las oportunidades de valorización.

Durante la fase experimental, el fabricante realiza un exhaustivo seguimiento de la investigación y de la evolución de las mezclas. No obstante, previo a la instalación del nuevo equipamiento en la planta y a la fabricación en línea del nuevo modelo de placa, se realizan varias comprobaciones de la pasta en el propio laboratorio de la fábrica. El examen realizado permite asegurar la idoneidad de la mezcla antes de proceder a la elaboración del producto en cadena.

### **8.1. Implementación a nivel industrial**

La puesta en marcha de la elaboración del nuevo producto en la fábrica se realiza llevando a cabo varias adaptaciones en una de las líneas habituales para la manufactura de placas de yeso de techo. Por otro lado, es preciso incorporar en la planta los procesos relativos al tratamiento previo de la nueva materia prima, así como disponer de un espacio específico para su recepción, acopio y triturado.

#### **8.1.1. Adaptación de la planta para el procesado del residuo de poliuretano**

En primer lugar, se habilita un espacio exterior de la planta para la descarga y acopio del residuo de poliuretano, el cual se recibe en su formato original de bloque (Figura 8.1)



Figura 8.1. Zona de carga-descarga y acopio del residuo de poliuretano

En una zona próxima a la de acopio, y protegida de la intemperie, se dispone la zona de procesamiento del polímero. Este emplazamiento se encuentra relativamente alejado de la zona de producción para evitar la concentración de partículas en suspensión en la atmósfera de las zonas de trabajo. Se dispone de una zona de corte previo, en la que un operario reduce el tamaño de los paneles con ayuda de una sierra mecánica, y de la máquina trituradora adquirida para el procesado final del polímero (Figura 8.2).



Figura 8.2. Proceso de corte y trituración y poliuretano en polvo

El equipo de trituración cuenta con un tamiz integrado e imantando y un mecanismo de succión que evita la volatilización de las partículas de polímero. Tiene una potencia de 20 kW y una capacidad de trituración de 150 Kg/h.

El polvo obtenido se almacena en big-bags listo para ser utilizado en la línea de producción para placas de yeso-PU. El poliuretano triturado tiene una densidad de entre 80 y 100 Kg/m<sup>3</sup> y presenta un tamaño de partícula inferior a 2 mm, adecuado para su inclusión en la mezcla final.

### 8.1.2. Modificaciones en la línea de producción

La incorporación de poliuretano en la fabricación de las placas y, por tanto, en la línea de producción, implica la instalación de un nuevo equipamiento al comienzo de la línea. Esta instalación se encarga de preparar la mezcla en seco de la escayola y el poliuretano en las proporciones adecuadas.

El nuevo equipamiento consiste en una mezcladora o sistema de dosificación continuo cuyo esquema de funcionamiento se incluye en la Figura 8.3. En ella se observan dos líneas de dosificación idénticas para escayola y poliuretano que se unifican en un tornillo sin-fin común donde tiene lugar la mezcla final en seco, según la dosificación establecida.

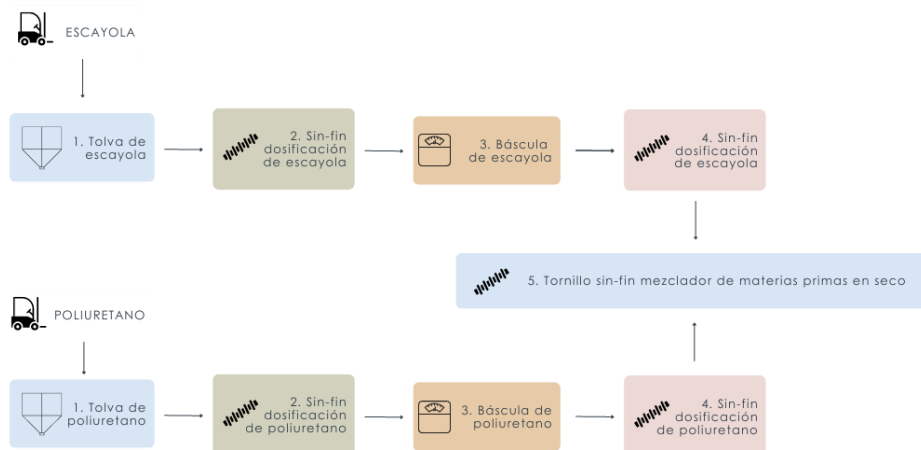


Figura 8.3. Esquema de funcionamiento del sistema de dosificación para mezcla en seco de escayola y poliuretano triturado

Se trata de un sistema de dosificación continuo por pérdida de peso y consta de diferentes elementos (Figura 8.4), los cuales se detallan a continuación. La numeración de los equipos se corresponde con el orden en el que discurren las materias primas en el interior de la instalación.



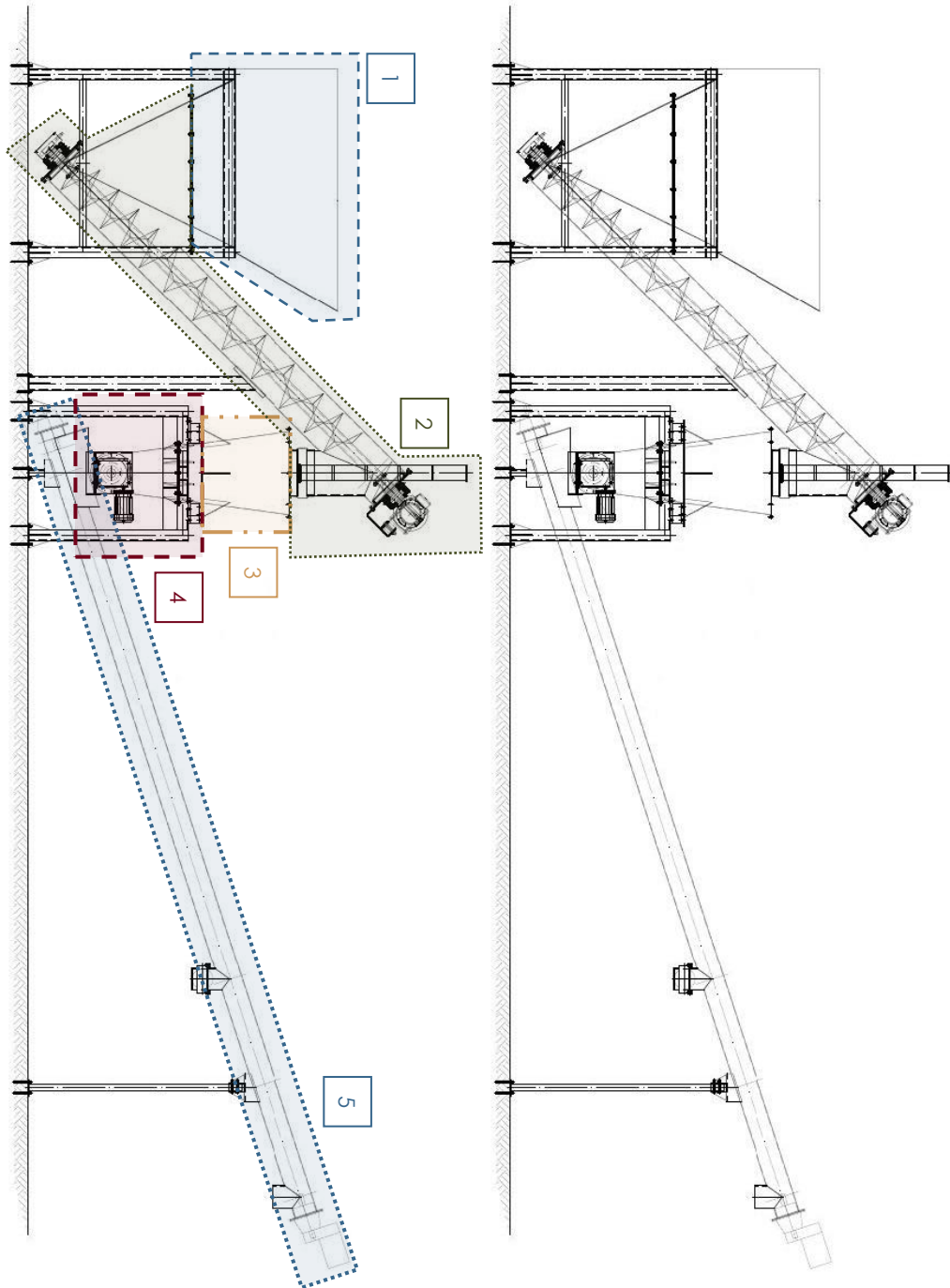


Figura 8.4. Sistema de dosificación para mezcla en seco de escayola y poliuretano triturado

El elemento número 1 se corresponde con dos tolvas de recepción de escayola y poliuretano triturado (Figura 8.5). Se fabrican con perfiles tubulares de acero y chapa metálica y su diseño permite su carga mediante carretilla elevadora y contenedor adaptado.

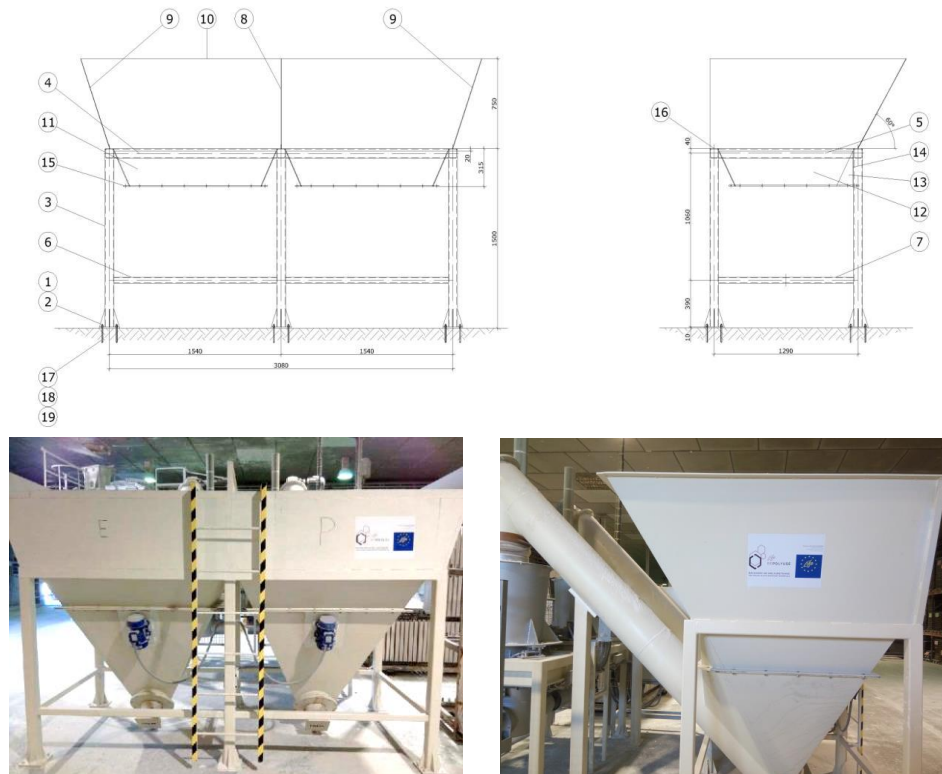


Figura 8.5. Tolvas de recepción de materias primas (escayola y poliuretano triturado)

El componente número 2 son dos tornillos sin-fin para la dosificación de cada una de las materias primas incorporadas en este proceso (Figura 8.6). Se diseñan de forma que carguen las básculas correspondientes cuando éstas lleguen a su nivel mínimo programado. Tienen un diámetro de 0,30 metros y una potencia de 5,5 Kw.

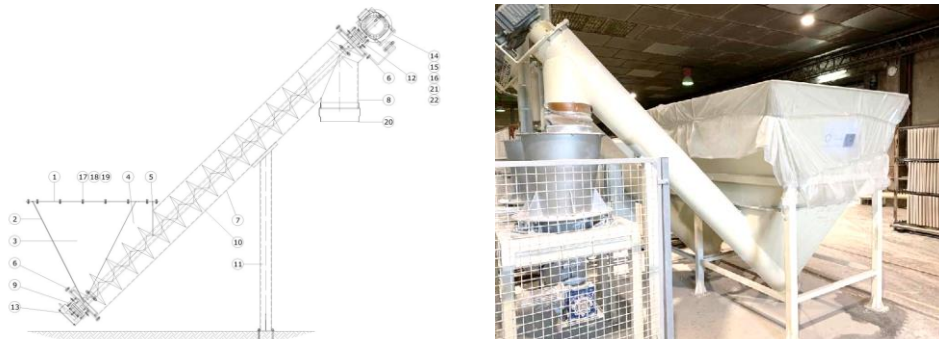


Figura 8.6. Tornillos sin-fin de dosificación de materias primas (escayola y poliuretano triturado)

La pieza número 3 está formada por dos básculas de aluminio, una para escayola y otra para residuo de poliuretano en polvo (Figura 8.7). Tienen una capacidad de 150 litros.

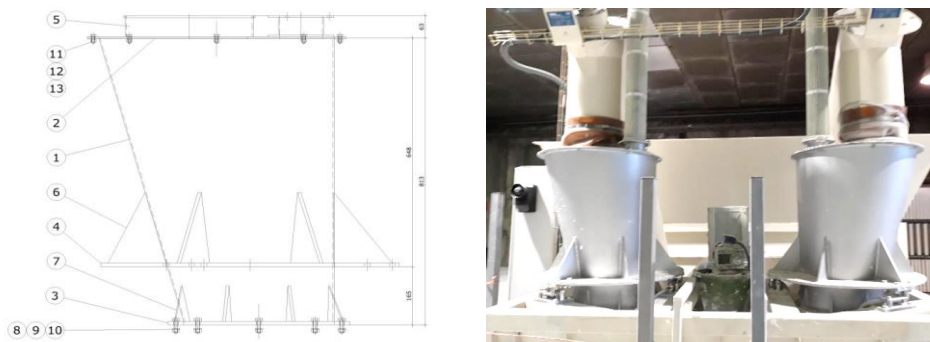


Figura 8.7. Báscula de pesaje de materias primas (escayola y poliuretano triturado)

El elemento número 4 se corresponde con dos tornillos sin-fin de dosificación perdida regulables por variador de velocidad (Figura 8.8).

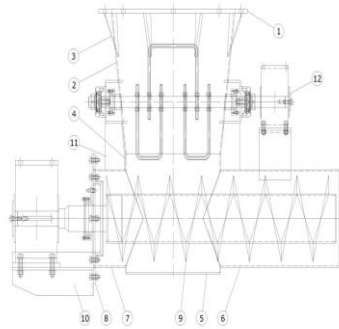


Figura 8.8. Tornillo sin-fin de dosificación perdida de materias primas (escayola y poliuretano triturado)

El componente número 5 se compone de un tornillo sin-fin mezclador en el que se vierten ambas materias primas (Figura 8.9). Tiene una longitud de 6 metros y una potencia de 4 Kw. Este elemento constituye la última pieza del sistema de dosificación, la mezcla en seco de escayola y poliuretano el polvo resultante se vierte en la dosificadora-mezcladora existente en el comienzo de la línea de producción habitual de forma que el proceso de fabricación del prefabricado de yeso-PU continúe de igual manera que se elaboran las placas de yeso estándar.

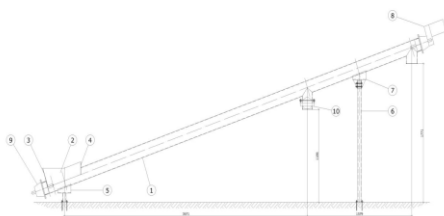


Figura 8.9. Tornillo sin-fin mezclador de materias primas (escayola y poliuretano triturado)

## 8.2. Fabricación

La Figura 8.10 detalla el proceso de elaboración de las placas de escayola con poliuretano reciclado según la línea de producción.



Figura 8.10. Esquema de fabricación de la placa de escayola con residuo de poliuretano para techos suspendidos desmontables

En primer lugar, se procede con la mezcla en seco de la escayola y el poliuretano triturado, este proceso se realiza en la nueva mezcladora. Tal como se describe previamente, este equipo se compone de dos tolvas de almacenamiento (escayola y poliuretano triturado), las cuales deben cubrirse para evitar la volatilización de las materias primas en forma de polvo, un dosificador volumétrico con control de peso, que funciona de manera continuada y proporciona las cantidades adecuadas de escayola y poliuretano, y un tornillo sin fin, que garantiza la mezcla homogénea de ambas materias primas (Figura 8.11).



Figura 8.11. Nueva mezcladora de materias primas en seco

Una vez realizada la mezcla en seco de la escayola y el poliuretano procesado, el resto del proceso de producción es idéntico al de la fabricación de cualquier otro modelo de placa para techos desmontables.

El mix de escayola y polímero se transporta por el tornillo sin fin hasta la entrada en la línea de producción. La mezcladora existente en el inicio de la línea suministra el mix seco, las fibras de vidrio, la cal, el aditivo fluidificante y el agua. La pasta húmeda se vierte en los moldes, con ayuda de una bomba adaptada a la densidad y viscosidad de la mezcla, y se prensa para eliminar la masa sobrante (Figura 8.12).



Figura 8.12. Inicio de la línea de producción con la mezcladora existente para producto seco y húmedo y los moldes utilizados

Una vez que la pasta adquiere una consistencia adecuada, ésta se retira de los moldes y se dispone de forma vertical en diferentes carros con ruedas para ser transportadas a la zona de secado (Figura 8.13). Ocasionalmente, los carros se disponen en el exterior de la nave industrial para su secado, prescindiendo del horno y consiguiente consumo de gas y electricidad.



Figura 8.13. Desmoldado de placas y colocación en carros para el secadero

Las dimensiones de las placas son de 600 x 600 x 15 mm, idénticas a las de otros modelos comercializados, así como, a los fabricados en la misma industria, dado que utilizan en muchos casos los mismos moldes. El empaquetado se realiza en pallets de varias cajas de 8 unidades, siguiendo el mismo método que el resto de modelos, de tal forma que, queden preparadas para su transporte y comercialización (Figura 8.14).

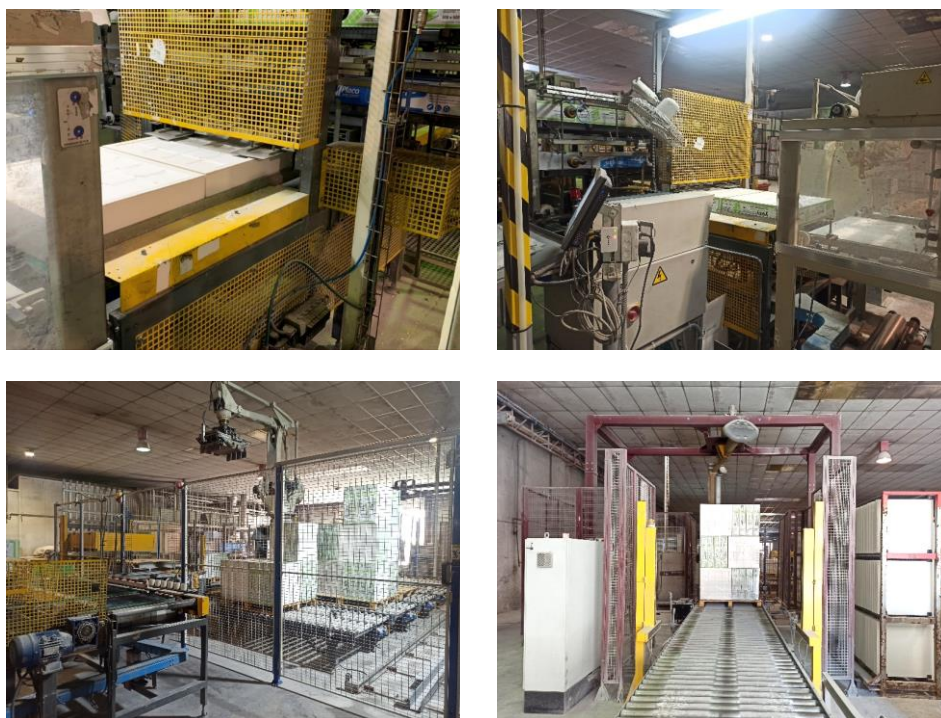


Figura 8.14. Empaquetado y paletizado del producto terminado

### 8.3. Caracterización de la placa de yeso con residuo de poliuretano

En esta sección se incluye la evaluación de la viabilidad técnica de la placa de yeso con residuo de poliuretano fabricada a nivel industrial, siendo el fabricante el responsable de su ejecución. Esta caracterización da lugar a la ficha técnica del producto y, además, permite la obtención de otros etiquetados.

Las prestaciones técnicas del nuevo producto se comparan con los de una placa de yeso estándar elaborada por el mismo fabricante y con la misma función.

La Figura 8.15 muestra un detalle del producto de placa de yeso-Pu terminado y cuyas propiedades se analizan en el presente apartado.



Figura 8.15. Producto de placa de yeso-PU terminado

#### 8.3.1. Caracterización

Los ensayos dirigidos a determinar las propiedades de la placa de escayola con residuo de poliuretano son la evaluación de la densidad, la conductividad térmica, la resistencia a flexión, la dureza Shore C, la deformación bajo carga, la composición química mediante el análisis elemental, la estructura a nivel microscópico (MEB y TAC), la absorción de agua por inmersión, el análisis termogravimétrico, la reacción al fuego y la absorción acústica (Tabla 8.1).

La interpretación de los ensayos de caracterización se incluye en apartado 8.3.4. en el que se compara el rendimiento del nuevo modelo de placa con el modelo estándar.



	Prefabricados	
	Placa de yeso estándar	Placa de yeso-PU
<b>Caracterización física</b>		
Densidad aparente	x	x
Densidad real	-	-
Granulometría por difracción láser	-	-
Adsorción física de gases	-	-
Conductividad térmica	x	x
Colorimetría	-	-
Viscosidad aparente	-	-
<b>Caracterización mecánica</b>		
Resistencia a flexión	x	x
Resistencia a compresión	-	-
Dureza Shore C	x	x
Adherencia	-	-
Deformación bajo carga	x	x
<b>Caracterización química</b>		
Análisis elemental (CHNS)	-	x
Lixiviación	-	-
Principio de fraguado	-	-
<b>Caracterización microscópica</b>		
M. Electrónica de Barrido (MEB)	-	x
Tomografía Axial Comput. (TAC)	-	x
<b>Caracterización higroscópica</b>		
Acumulación de agua	-	-
Absorción de agua por inmersión	-	x
Absorción de agua por capilaridad	-	-
Permeabilidad vapor	-	-
Curva de adsorción higroscópica	-	-
<b>Caracterización térmica</b>		
Termogravimetría (TGA)	-	x
Reacción al fuego	x	x
<b>Caracterización acústica</b>		
Absorción acústica	x	x

Tabla 8.1. Esquema de los ensayos realizados en la caracterización de prefabricados en forma de placa

El procedimiento a seguir para la realización de estas pruebas, así como el equipamiento utilizado, se describen en el Capítulo 5. Metodología.

### 8.3.1.1. Densidad aparente en estado endurecido

La densidad aparente del producto se calcula teniendo en cuenta las dimensiones nominales y el peso de una unidad de placa de yeso-PU (Tabla 8.2).

<b>Dimensiones nominales</b>	593x593x15 mm ( $\pm 2$ mm)
<b>Peso por unidad</b>	2,50 Kg/ud ( $\pm 5$ %)
<b>Peso por superficie</b>	6,93 Kg/m <sup>2</sup> ( $\pm 5$ %)
<b>Densidad aparente</b>	462,00 Kg/m <sup>3</sup> ( $\pm 5$ %)

Tabla 8.2. Densidad aparente de la placa de yeso-PU

### 8.3.1.2. Conductividad térmica

Esta propiedad se determina a través del método del medidor de flujo de calor. La Tabla 8.3 incluye el resultado de conductividad térmica obtenido para la placa de yeso-PU fabricada en una industria específica para placas de techos suspendidos.

<b>Conductividad térmica</b>	0,22 W/mK
------------------------------	-----------

Tabla 8.3. Conductividad térmica de la placa de yeso-PU

### 8.3.1.3. Resistencia a flexión

La Tabla 8.4 recoge los datos relativos a la resistencia a flexión de la placa de yeso-PU fabricada a nivel industrial.

<b>Resistencia a flexión</b>	$\geq 6$ Kg
------------------------------	-------------

Tabla 8.4. Resistencia a flexión de la placa de yeso-PU

### 8.3.1.4. Dureza Shore C

Este ensayo se realiza con el objetivo de analizar la dureza superficial de las placas. El resultado obtenido para la placa de yeso-PU fabricada a nivel industrial se incluye en la Tabla 8.5.

<b>Dureza superficial</b>	> 35 Shore C
---------------------------	--------------

Tabla 8.5. Dureza Shore C de la placa de yeso-PU

### 8.3.1.5. Deformación bajo carga

La Figura 8.16 incluye la gráfica deformación-carga del ensayo de resistencia a flexión de la placa de yeso-PU. Comparándola con la de otros materiales se puede concluir acerca de la fragilidad o ductilidad de estos.

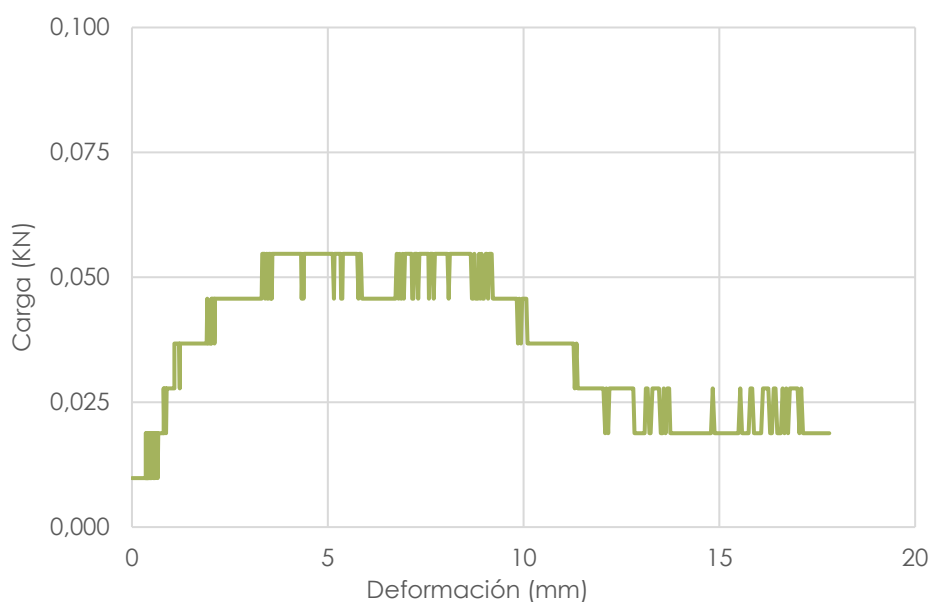


Figura 8.16. Gráfica deformación-carga del ensayo de resistencia a flexión de la placa de yeso-PU

### 8.3.1.6. Análisis Elemental (CHNS)

La proporción de carbono, hidrógeno, nitrógeno y azufre presente en el nuevo prefabricado se detalla en la Tabla 8.6.

Elemento químico (%)				
C	H	N	S	Otros
4,14	2,28	0,42	9,83	83,33

Tabla 8.6. Análisis elemental (CHNS) de la placa de yeso-PU

La escayola se compone fundamentalmente de sulfato cálcico ( $\text{CaSO}_4$ ), mientras que la fibra de vidrio tiene un alto contenido en dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ), entre otros. De ahí, que la proporción de elementos químicos no detectados en el ensayo supere el 80 %.

En el análisis elemental de la fase de caracterización de los residuos de poliuretano se notifica la presencia en su composición de altos valores de carbono y bajos índices de hidrógeno y nitrógeno. También se observa la ausencia de azufre, por lo que la presencia de este elemento en la placa de yeso-PU analizada puede deberse a la escayola.

### 8.3.1.7. Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)

La Figura 8.17 incluye diferentes imágenes de la placa de yeso y residuo de poliuretano, obtenidas del ensayo de Microscopía Electrónica de Barrido (MEB). En ellas se puede diferenciar la red de cristales debida a la hidratación de la escayola, agrupaciones de fibras de vidrio y fragmentos relativos a la pared celular del residuo de poliuretano. Se observa una correcta interacción entre las diferentes materias primas.

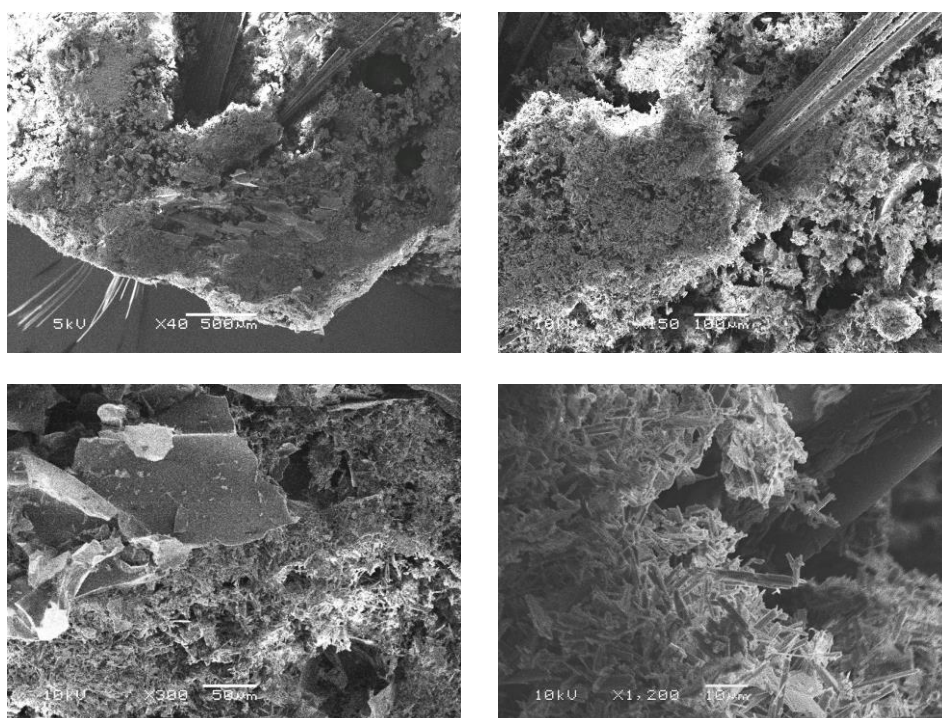


Figura 8.17. MEB de la placa de yeso-PU (40x, 150x, 300x y 1200x)

La Figura 8.18 muestra un detalle de la porosidad de la mezcla, e indica la medida de dos de los poros, con un resultado de 315 µm y 409 µm de diámetro.

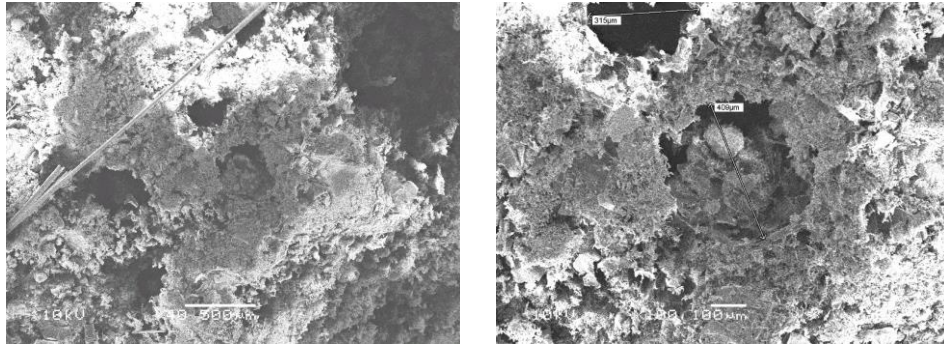


Figura 8.18. MEB de la placa de yeso-PU (40x y 100x)

### 8.3.1.8. Tomografía Axial Computarizada (TAC)

La Figura 8.19 incluye las imágenes obtenidas del análisis de Tomografía Axial Computarizada (TAC) del nuevo modelo de placa.

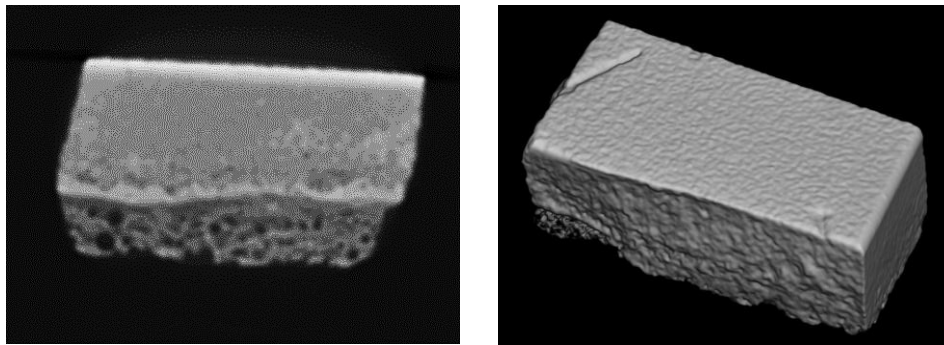


Figura 8.19. TAC placa de yeso-PU

La calidad y alcance de las imágenes no permite observar la distribución de las diferentes materias primas en la matriz. En el corte o sección sí se aprecia la distribución y volumen de poros de la mezcla.

### 8.3.1.9. Absorción de agua por inmersión

La Tabla 8.7 recoge los valores obtenidos en cuanto a absorción de agua por inmersión de la placa de yeso-PU fabricada a nivel industrial.

<b>Absorción de agua por inmersión</b>	<b>92,0 %</b>
--	---------------

Tabla 8.7. Absorción de agua por inmersión de la placa de yeso-PU

### 8.3.1.10. Termogravimetría (TGA)

Se incluye la gráfica resultante del análisis termogravimétrico de la placa de yeso-PU (Figura 8.20). En ella se observa una primera degradación del 18 % del peso de la muestra en el tramo de temperaturas de 100 a 150 °C, y una segunda pérdida de masa del 5 % en el intervalo de 650 a 750 °C.

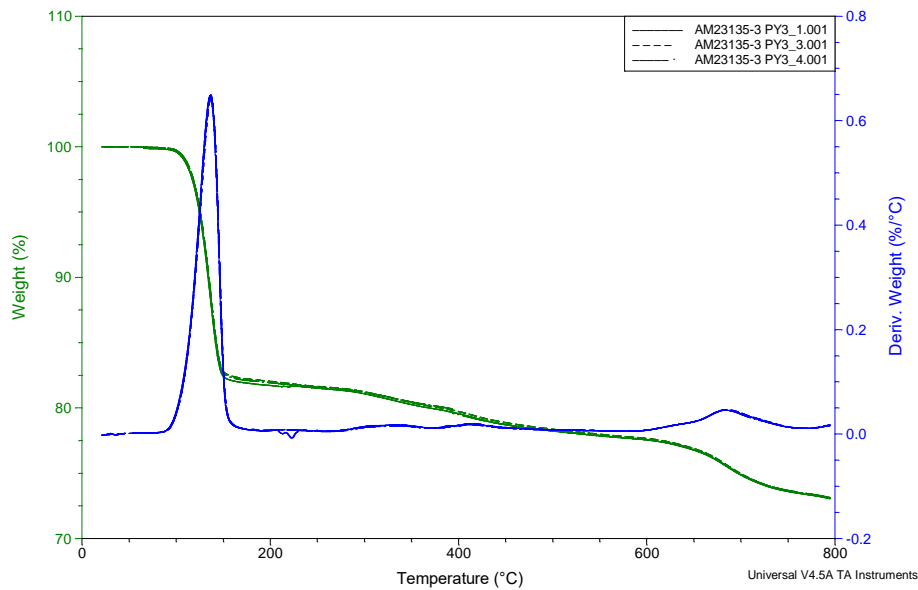


Figura 8.20. Termogravimetría (TGA) de la placa de yeso-PU

La Tabla 8.8 incluye los resultados obtenidos de la realización del ensayo, muy similares a los presentados por las mezclas de yeso con residuo de poliuretano analizadas en el Capítulo 7.

Primera degradación (PD) (°C)	Temp. inflexión PD (°C)	Segunda degradación (SD) (°C)	Temp. inflexión SD (°C)	Residuo final (%)
100-150 (18 %)	136	650-700 (5 %)	684	73,15

Tabla 8.8. Termogravimetría (TGA) de la placa de yeso-PU

### 8.3.1.11. Reacción al fuego. Ensayo de no combustibilidad y calor bruto de combustión

Este ensayo se realiza con el propósito de valorar la idoneidad de la reacción al fuego del prefabricado en función de los requerimientos exigidos a los materiales de revestimiento para el interior de una edificación.

El informe del ensayo obtenido se incluye en el Anexo 6.

Los parámetros obtenidos para la placa de yeso-PU fabricada a nivel industrial se recogen en la Tabla 8.9.

<b>Incremento de la temperatura del horno (<math>\Delta T</math>)</b>	15,80 °C
<b>Persistencia de la inflamación (<math>t_f</math>)</b>	-
<b>Pérdida de masa (<math>\Delta m</math>)</b>	26,73 %
<b>Potencial calorífico superior</b>	1,0477 MJ/Kg
<b>Reacción al fuego</b>	<b>Clase A1</b>

Tabla 8.9. Reacción al fuego de la placa de yeso-PU

### 8.3.1.12. Absorción acústica

Se entiende por coeficiente de absorción sonora al cociente entre el área de absorción sonora equivalente y el área de la muestra. La norma UNE-EN ISO 354<sup>147</sup> establece el procedimiento a seguir para su determinación, el cual consiste en medir el tiempo de reverberación promedio en una cámara reverberante con y sin muestra de ensayo. La muestra se compone de 21 placas de yeso-PU lisas y sin perforaciones, colocadas a 30 cm del suelo (cámara de aire) y sin material absorbente en el interior. Los resultados se incluyen en la Tabla 8.10.

El informe del ensayo obtenido se incluye en el Anexo 7.

<b>Coefficiente de absorción acústica medio (<math>a_m</math>)</b>	0,08
<b>Coefficiente de reducción del sonido (NRC)</b>	0,12
<b>Coefficiente de absorción sonora ponderado (<math>a_w</math>)</b>	0,10

Tabla 8.10. Absorción acústica de la placa de yeso-PU

<sup>147</sup> Asociación Española de Normalización (AENOR). (2004). UNE-EN ISO 354 Acústica. Medición de la absorción acústica en una cámara reverberante.

Estos resultados pueden considerarse normales para un techo liso y sin perforaciones, los materiales con la misma funcionalidad tienen parámetros similares.

### 8.3.2. Ficha técnica del producto

A continuación, se incluye la ficha técnica de la placa de escayola con residuo de poliuretano para techos suspendidos fabricada a nivel industrial (Figura 8.21). En ella se recogen varios de los datos técnicos de la fase de caracterización.



Fecha: 04.04.2019 Página 1 de 1	<b>ESPECIFICACIONES PRODUCTO</b> <b>TECHNICAL DATA</b> VASARI SQUARE EDGE PU																					
																						
<b>RAW MATERIAL:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Plaster powder E-35 mark N Aenor. Resistance to compression &gt; 35 kg/cm<sup>2</sup></li> <li>- Fiber glass 2400 Tex</li> <li>- Lightweight Polymeric Aggregates</li> </ul>																						
<b>TECHNICAL CHARACTERISTICS:</b> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; margin-top: 10px;"> <tr> <td style="width: 50%;">NOMINAL DIMENSIONS</td> <td style="width: 50%;">593X593X15 MM (±2 mm)</td> </tr> <tr> <td>WEIGHT PER UNIT</td> <td>2,50 Kg (±5%)</td> </tr> <tr> <td>WEIGHT PER SQM</td> <td>6,93 Kg (±5%)</td> </tr> <tr> <td>FLATNESS</td> <td>&lt; 1 mm in 1000 mm</td> </tr> <tr> <td>ANGULAR DEVIATION</td> <td>&lt;1 mm in all of the sides</td> </tr> <tr> <td>FLEXURAL RESISTENCE</td> <td>&gt;/=6 kg</td> </tr> <tr> <td>THERMAL CONDUCTIVITY</td> <td>0,22W/mK</td> </tr> <tr> <td>SUPERFICIAL HARDNESS</td> <td>&gt;35 Shore C. On a 100 scale</td> </tr> <tr> <td>REACTION TO FIRE</td> <td>Euroclass A1 (Incombustible)</td> </tr> <tr> <td>RESISTANCE TO HUMIDITY</td> <td>90 % HR continuously</td> </tr> </table>			NOMINAL DIMENSIONS	593X593X15 MM (±2 mm)	WEIGHT PER UNIT	2,50 Kg (±5%)	WEIGHT PER SQM	6,93 Kg (±5%)	FLATNESS	< 1 mm in 1000 mm	ANGULAR DEVIATION	<1 mm in all of the sides	FLEXURAL RESISTENCE	>/=6 kg	THERMAL CONDUCTIVITY	0,22W/mK	SUPERFICIAL HARDNESS	>35 Shore C. On a 100 scale	REACTION TO FIRE	Euroclass A1 (Incombustible)	RESISTANCE TO HUMIDITY	90 % HR continuously
NOMINAL DIMENSIONS	593X593X15 MM (±2 mm)																					
WEIGHT PER UNIT	2,50 Kg (±5%)																					
WEIGHT PER SQM	6,93 Kg (±5%)																					
FLATNESS	< 1 mm in 1000 mm																					
ANGULAR DEVIATION	<1 mm in all of the sides																					
FLEXURAL RESISTENCE	>/=6 kg																					
THERMAL CONDUCTIVITY	0,22W/mK																					
SUPERFICIAL HARDNESS	>35 Shore C. On a 100 scale																					
REACTION TO FIRE	Euroclass A1 (Incombustible)																					
RESISTANCE TO HUMIDITY	90 % HR continuously																					
<b>OTHER TECHNICAL CHARACTERISTICS:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Non emitter of Rn or Ra isotopes. This material does not cause radioactive reactions. Asbestos free.</li> <li>- Not proliferation of microorganisms not bacteria.</li> </ul>																						
<b>LOGISTICAL DATA:</b> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; margin-top: 10px;"> <tr> <td style="width: 50%;">AVAILABLE SYSTEM</td> <td style="width: 50%;">SQUARE EDGE</td> </tr> <tr> <td>UNITS/BOX</td> <td>8</td> </tr> <tr> <td>BOXES/PALET</td> <td>48</td> </tr> <tr> <td>UNITS/PALET</td> <td>384</td> </tr> <tr> <td>SQM / PALET</td> <td>138,24</td> </tr> </table>			AVAILABLE SYSTEM	SQUARE EDGE	UNITS/BOX	8	BOXES/PALET	48	UNITS/PALET	384	SQM / PALET	138,24										
AVAILABLE SYSTEM	SQUARE EDGE																					
UNITS/BOX	8																					
BOXES/PALET	48																					
UNITS/PALET	384																					
SQM / PALET	138,24																					
<b>CERTIFICATES AND TEST REPORTS:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- ER Aenor Certificate. Certificate number ER-0245/1999.</li> <li>- IQNET Certificate. Quality Management System Certificate UNE-EN-ISO 9001:2008</li> <li>- CE mark .</li> <li>- Test Report Reaction to Fire. AFITI-LICOF. Nº 3603T18-2</li> </ul>																						

Figura 8.21. Ficha técnica correspondiente a la placa de escayola y residuo de poliuretano para techos suspendidos



### 8.3.3. Mercado CE

El mercado CE es una declaración de conformidad obligatoria para la comercialización de determinados productos en el espacio europeo, entre los que se encuentran los productos de construcción. Su obtención está condicionada al cumplimiento de ciertos requisitos en materia de seguridad, salud y medio ambiente, exigidos por la Unión Europea para este tipo de materiales.

El fabricante del producto es el responsable de su materialización, para la cual se elabora un informe técnico de evaluación y verificación de las prestaciones que demuestra que se satisfacen los requerimientos pertinentes. La Figura 8.22 incluye el mercado CE obtenido para la placa de escayola con residuo de poliuretano para techos suspendidos desmontables.

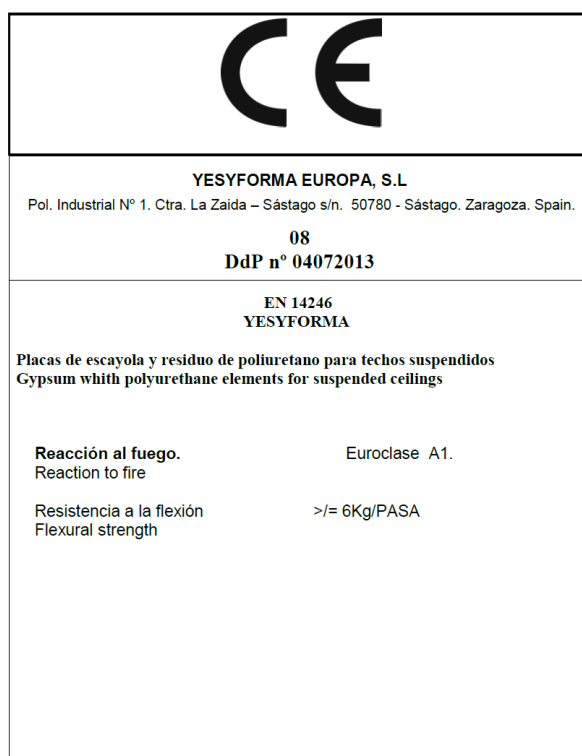


Figura 8.22. Mercado CE correspondiente a la placa de escayola y residuo de poliuretano para techos suspendidos

### 8.3.4. Análisis comparativo entre la placa de yeso con residuo de poliuretano y la placa de yeso estándar

Los resultados obtenidos durante el proceso de caracterización de la placa de yeso-PU se comparan con los de una placa de yeso estándar. Ambos modelos se fabrican en la misma industria y por el mismo fabricante, tienen la misma funcionalidad (sistema visto) y son modelos idénticos, con la excepción de que la placa más novedosa incluye residuo de poliuretano en su composición.

El propósito de este análisis comparativo es la evaluación del rendimiento técnico del nuevo prefabricado en relación con otro producto que desempeñe la misma función, y se emplee de forma recurrente en el sector de la construcción.

La Tabla 8.11 incluye las características técnicas recogidas en la ficha técnica de cada uno de los productos analizados.

	Placa de yeso estándar	Placa de yeso-PU
<b>Dimensiones nominales</b>	593x593x15 mm ( $\pm 2$ mm)	593x593x15 mm ( $\pm 2$ mm)
<b>Peso por unidad</b>	3,49 Kg/ud ( $\pm 5$ %)	2,50 Kg/ud ( $\pm 5$ %)
<b>Peso por superficie</b>	9,69 Kg/m <sup>2</sup> ( $\pm 5$ %)	6,93 Kg/m <sup>2</sup> ( $\pm 5$ %)
<b>Planicidad</b>	< 1 mm en 1000 mm	< 1 mm en 1000 mm
<b>Ortogonalidad</b>	< 1 mm	< 1 mm
<b>Resistencia a flexión</b>	$\geq 6$ Kg	$\geq 6$ Kg
<b>Conductividad térmica</b>	0,26 W/mK	0,22 W/mK
<b>Dureza superficial</b>	> 75 Shore C	> 35 Shore C
<b>Reacción al fuego</b>	Clase A1	Clase A1
<b>Resistencia humedad</b>	90 % HR continuada	90 % HR continuada
<b>Contenido humedad</b>	< 1,2 %	-

Tabla 8.11. Comparativa de las características técnicas de la placa de yeso estándar y de la placa de yeso-PU

El nuevo prefabricado es un 28,40 % más ligero y presenta una reducción del 15,40 % de la conductividad térmica. Ambas propiedades constituyen mejoras de la nueva solución con respecto a la placa de referencia, especialmente si se tiene en cuenta la funcionalidad específica de las placas de yeso para falso techo.

Por el contrario, la dureza superficial disminuye un 53,30 %. No obstante, dada la altura a la que se disponen este tipo de productos se considera que esta merma tiene una connotación de menor envergadura.

El resto de características tienen el mismo rendimiento técnico.

La Figura 8.23 incluye las gráficas de deformación-carga del ensayo de flexión obtenidas para una placa de yeso estándar y una placa de yeso con residuo de poliuretano.

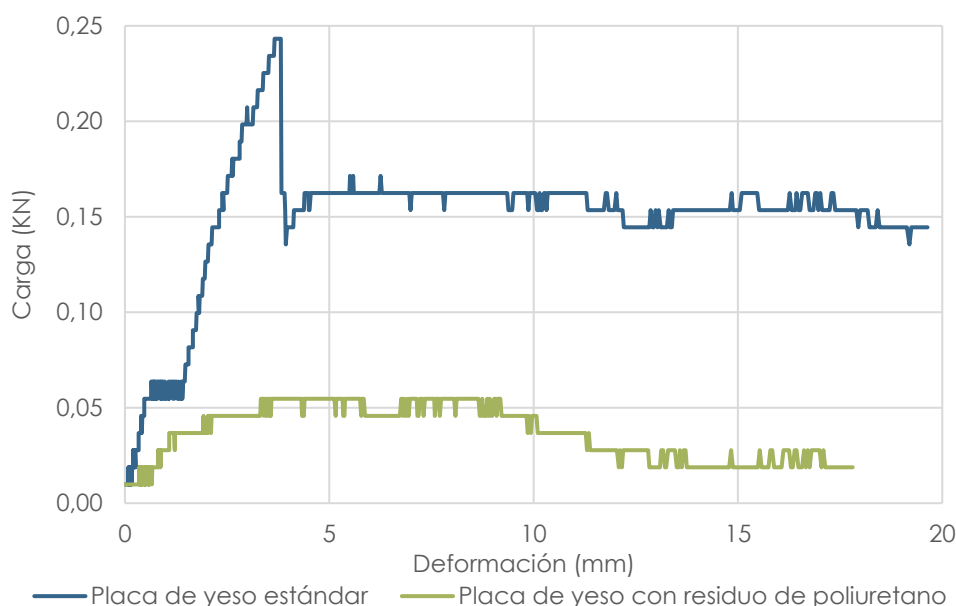


Figura 8.23. Comparativa de la gráfica deformación-carga del ensayo de resistencia a flexión de la placa de yeso estándar y de la placa yeso-PU

La gráfica deformación-carga permite conocer el comportamiento mecánico de la placa en profundidad. En ella se observa una mayor capacidad de resistencia a flexión de la placa de yeso estándar con respecto a la placa que incorpora residuo de poliuretano, tal y como se comenta a lo largo del documento.

Por otro lado, a partir del punto de carga máxima soportada se notifica un cambio en la tendencia de ambos materiales. El modelo estándar experimenta un notorio descenso de su capacidad portante, la cual posteriormente se estabiliza gracias al aporte de las fibras de vidrio.

Sin embargo, el nuevo modelo de prefabricado muestra una mayor capacidad de deformación sin rotura frágil, manteniendo un elevado porcentaje de la capacidad portante de la placa tras su rotura.

La Figura 8.24 muestra el aspecto de ambas placas tras la realización del ensayo de resistencia a flexión. A simple vista se puede observar la diferencia entre ambos tipos de fractura, más frágil en el caso de la placa de yeso estándar ya que se rompe por diferentes partes, mientras que la placa de yeso con residuo de poliuretano muestra la fractura en la zona de aplicación de la carga de flexión.



Figura 8.24. Inspección visual de la placa de yeso estándar (izquierda) y de la placa yeso-PU (derecha) tras el ensayo de resistencia a flexión

En cuanto a la logística para el transporte del producto (Tabla 8.12), ésta es muy similar en ambos modelos, con excepción del descenso de peso de la placa de yeso-PU. La reducción de carga implica que se pueda trasladar una mayor cantidad de producto para el mismo tipo de transporte, siempre y cuando la limitación se deba a la carga y no al espacio disponible.

	Placa de yeso estándar	Placa de yeso-PU
<b>Sistema disponible</b>	Apoyo – borde cuadrado	Apoyo – borde cuadrado
<b>Unidades por caja</b>	8	8
<b>Cajas por pallet</b>	48	48
<b>Unidades por pallet</b>	384	384
<b>m<sup>2</sup> por pallet</b>	138,24	138,24
<b>Peso por pallet (Kg)</b>	1.340,16	960

Tabla 8.12. Comparativa de las características de logística para el transporte de la placa de yeso estándar y la placa de yeso-PU

### **8.3.5. Conclusiones**

A la vista de los resultados obtenidos en los diferentes ensayos, se puede concluir que la placa de yeso con residuo de poliuretano cumple con los estándares comerciales establecidos.

La reducción de peso del nuevo modelo, en comparación con el prefabricado, estándar conlleva una disminución de la carga transportada, instalada, en uso y desmontada. Ello implica una disminución en el impacto ambiental que supone su transporte debido a un menor consumo de combustible, un mejor manejo y posible aumento del rendimiento durante su instalación y el requerimiento de una estructura portante de menor envergadura.

La clasificación A1 de reacción al fuego permite que el producto compita en el mercado en mejores condiciones con otros similares.

## **8.4. Políticas medioambientales, protocolo y guía de aplicación de la gestión del residuo de poliuretano para su valorización**

En base a la experiencia recogida en el desarrollo de la presente investigación, se crea un protocolo y guía de aplicación de la gestión de residuo de poliuretano, con el propósito de que sirva de orientación para la industria, y cuyo seguimiento garantice el éxito del proceso de valorización de este tipo de residuo polimérico. Ambos documentos tienen en cuenta la normativa existente a nivel nacional y europeo para la gestión y transporte de residuos.

### **8.4.1. Políticas medioambientales de aplicación en la gestión del residuo de poliuretano**

Con el objetivo de lograr una correcta gestión del residuo de poliuretano para su reutilización y valorización, es preciso tener en cuenta la legislación en vigor existente al respecto.

La configuración de la política de gestión de residuos de la Unión Europea se basa en un enfoque de jerarquía de residuos que establece el siguiente orden de prioridad: prevención, preparación para la reutilización, reciclado y otros tipos de valorización (incineración, disposición en vertedero, etc.). El marco de regulación específico se

divide por sectores. Conforme a la lista europea de residuos (LER)<sup>148</sup>, los residuos de poliuretano se clasifican según los códigos descritos en la Tabla 8.13 en función de su origen.

<b>02 01 04</b>	<b>Residuos de la agricultura, horticultura, acuicultura, silvicultura, caza y pesca</b> Residuos de plástico (excepto embalajes)
<b>07 02 13</b>	<b>Residuos de la FFDU de plásticos, caucho sintético y fibras artificiales</b> Residuos de plástico
<b>12 01 05</b>	<b>Residuos del moldeado y tratamiento físico y mecánico de superficie de metales y plásticos</b> Virutas y rebabas de plástico
<b>15 01 02</b>	<b>Envases (incluidos los residuos de envases de la recogida selectiva municipal)</b> Plástico
<b>16 01 19</b>	<b>Vehículos de diferentes medios de transporte (incluidas las máquinas no de carretera) al final de su vida útil y residuos de desguace de vehículos al final de su vida útil y del mantenimiento de vehículos</b> Plástico
<b>17 02 03</b>	<b>Residuos de la construcción y demolición</b> Plástico
<b>17 02 04*</b>	<b>Residuos de la construcción y demolición</b> Vidrio, plástico y madera que contienen sustancias peligrosas o están contaminados por ellas
<b>19 12 04</b>	<b>Residuos del tratamiento mecánico de residuos no especificados en otra categoría</b> Plástico y caucho
<b>20 01 39</b>	<b>Fraciones recogidas selectivamente de residuos municipales</b> Plástico

Tabla 8.13. Clasificación de los residuos de poliuretano según la Decisión de la Comisión, de 18 de diciembre de 2014, 2014/955/UE

<sup>148</sup> Decisión de la Comisión, de 18 de diciembre de 2014, por la que se modifica la Decisión 2000/532/CE, sobre la lista de residuos, de conformidad con la Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo (2014/955/UE) (DOUE L núm. 370/44, de 30 de diciembre de 2014).

El Real Decreto 110/2015 codifica el poliuretano procedente de los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEEs) (Tabla 8.14)<sup>149</sup>.

**19 12 10 Espuma de poliuretano procedente del tratamiento de RAEEs**

Tabla 8.14. Clasificación de los residuos de poliuretano según el Real Decreto 110/2015

A nivel nacional, los residuos se gestionan según la Ley 22/2011 de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados<sup>150</sup>. En ella se define el concepto de residuo como “cualquier sustancia u objeto que su poseedor deseche o tenga la intención o la obligación de desechar” y de subproducto como “una sustancia u objeto, resultante de un proceso de producción, cuya finalidad primaria no sea la producción de esa sustancia u objeto, puede ser considerada como subproducto y no como residuo [...]”. La Orden APM/397/2018 determina de forma específica cuando los recortes de espuma de poliuretano se consideran subproductos<sup>151</sup>. En consecuencia, dependiendo de la clasificación del poliuretano como residuo o subproducto, la gestión y la tramitación es una u otra (Figura 8.25).

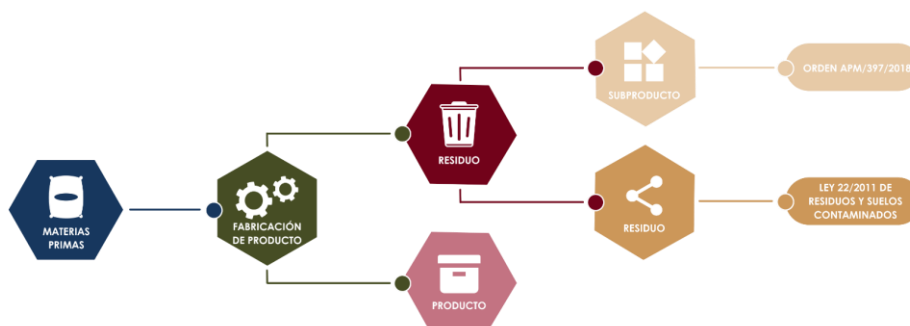


Figura 8.25. Normativa de aplicación al residuo de poliuretano según su clasificación como residuo o subproducto

<sup>149</sup> Real Decreto 110/2015, de 20 de febrero, sobre residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (BOE núm. 45, de 21 de febrero de 2015).

<sup>150</sup> Ley 22/2011, de 28 de julio, de Residuos y suelos contaminados (BOE núm. 181, de 29 de julio de 2011).

<sup>151</sup> Orden APM/397/2018, de 9 de abril, por la que se determina cuándo los recortes de espuma de poliuretano utilizados en la fabricación de espuma compuesta, se consideran subproductos con arreglo a la Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados (BOE núm. 95, de 19 de abril de 2018).

De acuerdo con la normativa, la valorización del residuo de poliuretano clasificado como residuo implica que el fabricante del prefabricado de yeso-PU deba darse de alta como gestor de residuos. En este caso, el transporte del polímero del generador del residuo al gestor debe hacerse siguiendo el Reglamento (CE) nº 1013/2006 de la Unión Europea y el Real Decreto 553/2020, en caso de que el traslado sea nacional<sup>152,153</sup>. Sin embargo, para el caso en el que el polímero es clasificado como subproducto no es preciso tener en cuenta esta regulación, tal y como recoge la Orden APM/397/2018.

Aplicando estas políticas medioambientales en el presente estudio, los residuos de poliuretano analizados se clasifican como subproductos en el caso del tipo I y tipo B y como residuos no peligrosos los tipo P, tipo A, tipo AT, tipo SG, tipo BU y tipo ES, ya que éstos últimos están contaminados por otras sustancias, bien durante el proceso de fabricación o bien, por tratarse de residuos post-consumo.

#### **8.4.2. Protocolo para la gestión del residuo de poliuretano en las instalaciones del generador del residuo**

El objetivo del protocolo para la gestión del residuo de poliuretano es establecer un procedimiento para la diligencia de este tipo de residuo polimérico generado en la industria nacional. El cumplimiento de este protocolo supone garantizar la confianza en la trazabilidad desde el origen de los residuos hasta los fabricantes de placa de yeso-PU. Esta información es de aplicación a cualquier residuos de poliuretano y se dirige a los productores de este tipo de desecho.

Un elevado grado de contaminación del poliuretano por materiales de diferentes naturalezas, afecta de forma negativa en su tasa de reciclabilidad, especialmente los elementos de carácter metálico. En consecuencia, previo a su acopio y agrupación en una zona específica

---

<sup>152</sup> Reglamento (CE) nº 1013/2006 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 14 de junio de 2006, relativo a los traslados de residuos (DOUE L núm. 190/1, de 12 de julio de 2006).

<sup>153</sup> Real Decreto 553/2020, de 2 de junio, por el que se regula el traslado de residuos en el interior del territorio del Estado (BOE núm. 171, de 19 de junio de 2020).



de la fábrica generadora del residuo, es preciso eliminar aquellos elementos de diferente composición al poliuretano.

En este punto del proceso de gestión existen dos alternativas. La primera de ellas consiste en enviar directamente el residuo al fabricante del prefabricado, sin ningún tipo de procesado previo. Ello supone el transporte de un gran volumen de material en comparación con su peso, dada la baja densidad que presenta el poliuretano. Esta opción se considera factible siempre y cuando las instalaciones de ambas empresas, generador de residuo y fabricante de prefabricado, se encuentren próximas de forma que el traslado sea rentable y aceptable en términos económicos.

La segunda opción trata de triturar el poliuretano en la planta generadora del residuo, convirtiéndolo en polvo y transportándolo listo para su incorporación en la mezcla de yeso. Esta alternativa, conocida como valorización, permite el transporte de una mayor cantidad de material, dada la reducción de su volumen, rentabilizando el coste del transporte aun para largas distancias. También existe la opción de prensar el polvo en forma de pellet antes de su transporte, no obstante, esta medida implica la necesidad de que el residuo sea tratado y triturado de nuevo en la fábrica de placas de yeso. No obstante, supone una inversión en maquinaria para el generador de residuos.

La Figura 8.26 incluye un detalle del protocolo de gestión del residuo, desde su generación hasta su recepción por parte del fabricante de placas de yeso-PU, teniendo en cuenta los posibles tratamientos intermedios.



Figura 8.26. Protocolo de gestión de residuos de poliuretano según su formato

Garantizar la trazabilidad de todas las fases del proceso de gestión del residuo de poliuretano genera confianza en los productos y en los procesos, incluso ayuda a mitigar cualquier posible impacto ambiental. Se entiende por trazabilidad al conjunto de procedimientos que permiten seguir la evolución de un producto en cada una de sus etapas. En el caso de los residuos es preciso documentar desde el momento en el que se

genera hasta su tratamiento final, de forma que sea posible reconstruir su historial completo. La Tabla 8.15 recoge una plantilla tipo para documentar los datos relativos al transporte de los residuos, desde la empresa generadora hasta la empresa fabricante de la nueva placa. El documento debe ser cumplimentado por el gestor del residuo y formado por el fabricante en su recepción.

<b>Datos de origen</b>	<b>Empresa generadora del residuo</b>	Nombre:		
		Dirección:		
	<b>Fecha de generación</b>	Fecha:		
			<b>Si</b>	<b>No</b>
	<b>Tipo de residuo</b>	Polyuretano (PUR)		
Poliisocianurato (PIR)				
<b>Formato original del residuo</b>	Bloque			
	Polvo			
	Otro:			
<b>Datos relativos al procesado del residuo</b>	<b>Tipo de procesamiento</b>	Trituración		
		Otro:		
	<b>Formato final del residuo</b>	Bloque		
		Pellet		
		Polvo		
		Otro:		
	<b>Formato de transporte</b>	Saco		
		Pallet		
		Caja		
		Otro:		
<b>Datos de destino</b>	<b>Empresa de transporte</b>	Nombre:		
		Dirección:		
	<b>Fecha de transporte</b>	Fecha:		
	<b>Empresa de destino del residuo</b>	Nombre:		
		Dirección:		

Tabla 8.15. Plantilla para el registro de la trazabilidad del residuo de poliuretano en los procesos de transporte

Una buena planificación del sistema o proceso de gestión de residuos es indispensable para lograr altas tasas de valorización del material. En este caso, el residuo de poliuretano se reutiliza en la fabricación de placas de yeso-PU para techos suspendidos. Una adecuada trazabilidad del residuo genera confianza en el nuevo modelo

de prefabricado, equiparándose en este aspecto con la placa de yeso estándar tradicionalmente usada en el sector de la construcción.

### **8.4.3. Guía de aplicación para la integración del residuo de poliuretano en prefabricados de yeso a nivel industrial**

La guía de aplicación está dirigida a los fabricantes de productos de yeso, que deseen implementar en sus instalaciones la tecnología desarrollada en la presente investigación. En este apartado se resumen las cuestiones y puntos clave necesarios para una correcta y eficaz replicabilidad.

En primer lugar, es preciso que la fábrica receptora del residuo disponga de un espacio de almacenaje y acopio específico, preferiblemente a cubierto. Una misma industria puede utilizar residuos de poliuretano de diferente naturaleza y procedencia, en ese caso, es conveniente disponer de barreras físicas que los separe, ya que posiblemente el acondicionamiento y procesado previo sea diferente. El formato en el que se recibe el polímero puede ser múltiple, pudiendo presentarse en forma de paneles de gran formato, en polvo, comprimido en forma de pellets, etc.

En segundo lugar, para lograr una exitosa incorporación del residuo en las mezclas de yeso, es preciso transformarlo en un material pulverulento. Este tratamiento se realiza con una máquina de trituración, siendo preferible su instalación y colocación en una zona próxima a la de acopio y separada físicamente de la cadena de producción, para evitar la contaminación del producto final con partículas en suspensión. En el caso en el que el poliuretano se recepcione en formato de tipo polvo listo para ser incorporado en la línea de producción, esta fase no es necesaria.

La trituradora debe contar con un tamiz integrado y mecanismo de succión que evite la dispersión del polvo triturado, también es recomendable la incorporación de un imán que retenga las posibles partículas metálicas con las que el residuo este contaminado.

El poliuretano triturado puede almacenarse en contenedores, silos, tolvas, etc., o conducirse directamente al depósito previo a la mezcladora. En todos los casos, el almacenaje y transporte se realiza en elementos cerrados.

En tercer lugar, es necesario disponer de un equipamiento extra en el que se lleva a cabo la mezcla previa del yeso con el residuo de poliuretano. Esta mezcladora en seco se compone de dos tolvas cerradas, para escayola y poliuretano respectivamente, de dos dosificadores por volumen con control de peso y un tornillo sin-fin, que homogeniza la mezcla de materias primas.

A partir de este momento, el proceso, la maquinaria y la mano de obra necesarios para la fabricación de las placas yeso-PU es idéntico al de las placas de yeso estándar. La mezcla en seco de yeso y poliuretano se transporta hasta la mezcladora existente en el inicio de la línea de producción donde se mezcla con las fibras, el aditivo y el agua. La pasta se vierte en los moldes, situados en una cinta continua, y se prensa para eliminar el sobrante de masa. Una vez alcanzada la consistencia adecuada, las placas se desmoldan y se colocan en carros para su secado y eliminación de la humedad restante. Por último, se empaquetan y paletizan para su transporte y comercialización.

Según la experiencia obtenida durante la fase de industrialización del prefabricado, se enumeran una serie de recomendaciones con respecto al poliuretano que mejoran el rendimiento y la eficiencia del sistema:

- Realizar el proceso de trituración en las instalaciones del productor del residuo conlleva una reducción considerable del volumen del material en el transporte y elimina la posible contaminación de las líneas de producción por el polvo en suspensión. En este caso, se evita duplicar en ambas instalaciones el espacio de almacenamiento y acopio y la instalación trituradora se desplaza de las instalaciones del fabricante de placas a la del generador del poliuretano.
- La utilización de residuos de poliuretano de pequeño formato, es decir, en forma de gránulo, polvo, pellet, etc., evitan la necesidad de mano de obra que corte previamente el polímero y reduce los tiempos de trituración.
- La proximidad entre la fábrica del generador del residuo de poliuretano y la planta de elaboración de la placa de yeso es relevante de cara al desempeño medio ambiental y económico del producto final.

## 8.5. Conclusiones

De la transferencia a nivel industrial de la investigación realizada previamente a nivel de laboratorio se concluye que:

- La planta de prefabricados de yeso precisa de ligeras modificaciones para la recepción de la nueva materia prima y su incorporación en el producto. El resto de procesos son los mismos que los de la placa de yeso estándar.
- La tecnología implementada a nivel industrial permite la fabricación de placas de escayola con residuo de poliuretano.
- El nuevo prefabricado presenta prestaciones técnicas similares a los productos comerciales con la misma finalidad que se emplean actualmente en el sector de la construcción. Además, este cuenta con el valor añadido debido a la reutilización del residuo de poliuretano y el descenso en el consumo de materias primas.
- Entre las propiedades del novedoso material desarrollado destacan la reducción del 28 % de su peso, del 15 % en cuanto a la conductividad térmica y su menor fragilidad. La clasificación de reacción al fuego se mantiene en A1.
- La obtención del marcado CE permite su comercialización en el espacio europeo.
- Las pruebas piloto de puesta en obra demuestran el funcionamiento del nuevo modelo de prefabricado a escala real y en edificaciones de diferente tipología.
- Se desarrollan un protocolo y guía de aplicación para la optimización del proceso de gestión de residuos de poliuretano.

**Puesta en obra**

**09**





## CAPÍTULO 9. PUESTA EN OBRA

El objetivo principal de la fase de puesta de obra es demostrar la viabilidad a escala real de la investigación mediante la instalación del producto innovador en diferentes edificaciones y, en consecuencia, del proceso de reducción y reutilización de poliuretano de origen industrial integrándolo en nuevos prefabricados de yeso.

Una vez lograda la fabricación de la placa de escayola con poliuretano reciclado, se procede con la elaboración de un lote específico de 2.576 placas para ser instaladas en tres edificios diferentes revistiendo una superficie horizontal de techo de 900 m<sup>2</sup> en total. El número de placas fabricadas supera las estrictamente necesarias en cuanto a superficie, no obstante, este excedente está motivado por los recortes que sufre este tipo de producto e imprevistos que puedan surgir durante su colocación.

Un segundo objetivo contempla la monitorización de los espacios en los que se instala este novedoso producto con el propósito de evaluar el confort interior y compararlo con el que proporcionan las placas de yeso estándar.

Se seleccionan emplazamientos con diferentes tipologías de intervención (nueva construcción y rehabilitación), lo que permite extender el campo de aplicación y actuación del producto, demostrando la posibilidad de uso en diferentes etapas del edificio incluyendo la rehabilitación y mejora de la eficiencia energética del parque de inmuebles existente. Por otro lado, los edificios tienen diferentes sistemas constructivos y se ubican en países con normativa y clima diferentes.

El transporte de las placas de yeso con poliuretano triturado se realiza desde las instalaciones de Yesyforma en Sástago, Zaragoza (España) hasta la ubicación de los emplazamientos determinados. Cada pallet contiene entre 32 y 48 paquetes de 8 unidades agrupados y apilados en vertical, éste se protege de la humedad y riego accidental con una lámina de film plástico.

Una vez recepcionados en obra, las placas de techo deben mantenerse limpias, secas y protegidas de la intemperie en un espacio interior. El producto se debe desembalar 24 horas antes de su instalación

para su correcta aclimatación a las condiciones interiores del espacio (Figura 9.1).



Figura 9.1. Placa de yeso-PU recepcionada en los diferentes emplazamientos

Para la colocación de este material de construcción en el falso techo de un edificio es preciso disponer de una estructura portante previa. En el caso que nos ocupa, ésta se instala en las obras de nueva construcción (Álava) mientras que en las obras de rehabilitación (Burgos y Coventry) se reaprovecha la estructura existente.

Finalmente, se instalan las placas de yeso-PU sobre la estructura portante, previa preparación y corte del prefabricado para la inclusión de los elementos de iluminación, los sistemas de protección contra incendios y otros elementos similares.

El proceso de monitorización contempla la toma de datos de temperatura y humedad de los espacios interiores y de las condiciones ambientales exteriores. El objetivo de esta etapa es comparar las condiciones de confort registradas para el mismo espacio con la placa de yeso existente. Tras la instalación del nuevo modelo y, en el caso de obra nueva, se comparan espacios afines, en unos se coloca un falso techo de placa de yeso tradicional y en otros el mismo sistema con placa de yeso-PU.

El sistema seleccionado para la monitorización de las instalaciones está basado en un sistema de monitorización IOT (Figura 9.2). Los sensores seleccionados son sensores IQ Home y están conectados a través de una puerta de enlace industrial con conexión 4G que permite supervisar la adquisición de datos a través de internet. Los sensores son herramientas de medición inalámbricas alimentadas por baterías de iones de litio de

larga duración diseñadas para su uso en la monitorización y control de procesos, en este caso se obtienen diferentes parámetros de humedad y temperatura para evaluar las condiciones de confort de los espacios. Los sensores se conectan a la puerta de enlace a través de la conexión inalámbrica y la puerta de enlace a su vez se conecta a la nube a través de la conexión 4G de una tarjeta SIM. La puerta de enlace IQ Home utilizada es el modelo GW-IND-01-4G diseñado para aplicaciones IoT, cuyo propósito es tender un puente entre los dispositivos IQRF DPA en campo y la nube de la forma más sencilla. La puerta de enlace está optimizada para redes IQRF DPA de forma que se pueda gestionar y controlar en entornos complejos.

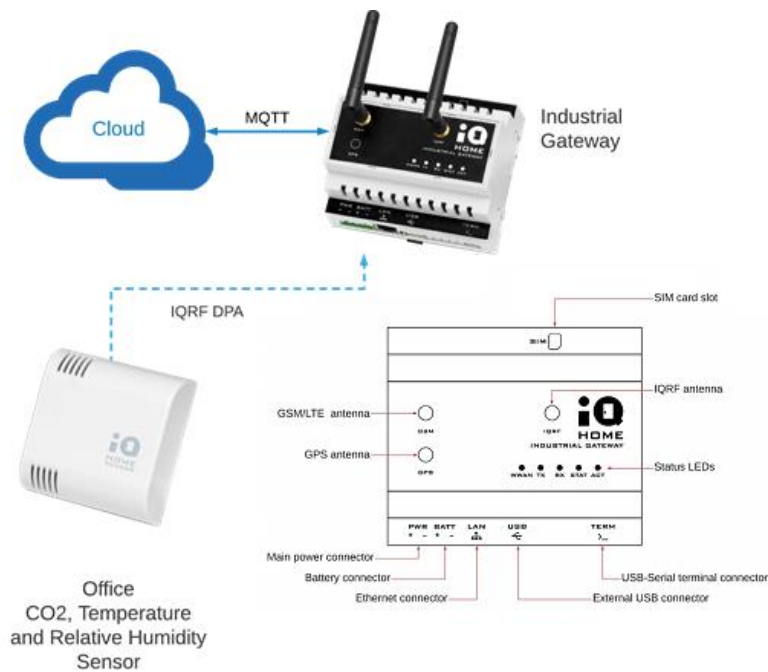


Figura 9.2. Esquema del sistema de monitorización

### 9.1. Puesta en obra en Burgos (España)

La primera localización en la que se contempla la instalación de las placas de yeso-PU es en el edificio de la Escuela Politécnica Superior (Milanera), en la Universidad de Burgos (UBU), ubicada en la Calle Villadiego, s/n de Burgos (España). Se proyecta una obra de rehabilitación en la que se plantea la sustitución de las actuales placas del sistema de falso techo discontinuo por el nuevo prefabricado. La UBU

se encarga del desmontaje del sistema de revestimiento anterior y de la instalación del modelo más novedoso.

El edificio en el que se realiza la puesta en obra consta de cuatro plantas (planta baja, entreplanta, planta primera y planta segunda) distribuidas en entradas, pasillos, aulas, laboratorios, cafetería, salones de actos, zonas de administración, despachos, aseos, etc., (Figura 9.3).



Figura 9.3. Edificio de la Escuela Politécnica Superior (Milanera) de la Universidad de Burgos en Burgos (España)

La superficie de sustitución proyectada es de 350 m<sup>2</sup>. No obstante, no se retiran las placas con luminarias, sistemas de incendios, etc., por lo que finalmente el área de intervención es de 292 m<sup>2</sup>. La zona de intervención se sitúa en la segunda planta del edificio y comprende espacios de pasillos, despachos y una sala de reuniones (Figura 9.4).



Figura 9.4. Área de actuación en el edificio de la Escuela Politécnica Superior (Milanera) de la Universidad de Burgos en Burgos (España)

Se trasladan un total de tres pallets con 107 cajas y 8 placas por caja, lo que hace un total de 856 placas de yeso-PU, de las cuales un 3,27 % se consideraron defectuosas por fisuras o manchas y hubo un 2 % de pérdidas por recortes. En este caso, no se precisa de la instalación o sustitución de la estructura portante del falso techo, dado el carácter de la obra y la reutilización de la existente.

El rendimiento de la instalación de las placas sin incluir la preparación y corte de piezas especiales es de 21 m<sup>2</sup>/hora, lo que equivale a 58 ud/hora.





Figura 9.5



Figura 9.5. Instalación de placas de yeso-PU en el edificio de la Escuela Politécnica Superior (Milanera) de la Universidad de Burgos en Burgos (España)

La Figura 9.5 incluye imágenes específicas del proceso de instalación.

En este centro se plantea una monitorización previa con la placa de yeso existente de la temperatura y humedad, dado que, al tratarse de una obra de rehabilitación, es un edificio en funcionamiento y con unas condiciones de confort establecidas. Se realiza una segunda monitorización de las mismas estancias una vez que se sustituye el revestimiento existente en el falso techo por el prefabricado nuevo a base de yeso y residuo de poliuretano (Figura 9.6).



Figura 9.6. Instalación de los sensores de monitorización en el edificio de la Escuela Politécnica Superior (Milanera) de la Universidad de Burgos en Burgos (España)

## 9.2. Puesta en obra en Álava (España)

La segunda puesta en obra de las placas de yeso-PU se realiza en un edificio de nueva construcción para empresas tecnológicas, situado en el Parque Tecnológico de Álava en Miñano (España). La empresa TECSA se encarga de la construcción de dicho edificio y de la instalación del prefabricado.

El edificio objeto consta de dos plantas y está dividido en dos zonas, el edificio de entrada y el edificio principal (Figura 9.7). La primera planta

del edificio de entrada se distribuye en un vestíbulo de acceso y varias salas de instalaciones y almacenamiento, mientras que en el edificio principal se encuentran los almacenes. En cuanto a la segunda planta, el edificio de entrada cuenta con algunas instalaciones, aseos y varias salas de reuniones, en cambio, el edificio principal alberga diez oficinas.



Figura 9.7. Edificio del centro de empresas del Parque Tecnológico de Álava en Miñano (España)

La zona de actuación se localiza en el edificio de entrada en diferentes salas y pasillos con una superficie total de 200 m<sup>2</sup>. En la Figura 9.8 se muestran en detalle las áreas de intervención.





Figura 9.8. Áreas de actuación en el edificio del Parque Tecnológico de Álava en Miñano (España)

Dado que se trata de una obra de nueva construcción, es preciso la instalación de una estructura suspendida previa sobre la que se colocan las placas (Figura 9.9). El procedimiento operatorio consiste en planificar la disposición de la cuadrícula de las placas, marcar las líneas de remate del perímetro, colocar los remates perimetrales y los ángulos de pared, marcar las posiciones de los colgadores, instalar las guías principales y transversales y, por último, colocar el prefabricado.

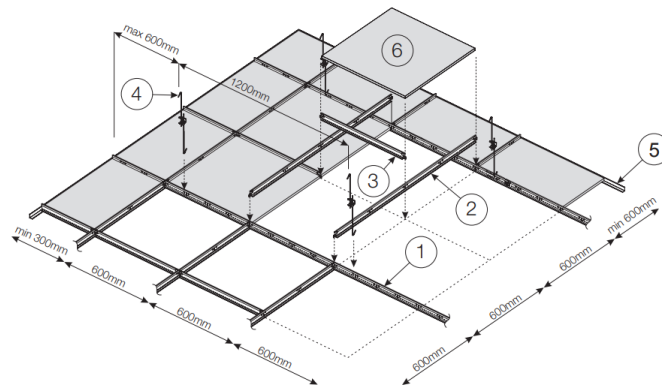


Figura 9.9. Esquema del sistema constructivo de estructura portante para falso techo suspendido

En la instalación completa de placas de yeso-PU en este emplazamiento se emplean dos pallets con un total de 75 cajas y 8 placas por caja, lo que suponen 600 placas de yeso-PU, de las cuales, un 2,5 % se consideraron defectuosas por fisuras o manchas, y hubo menos de un 2 % de pérdidas por recortes y colocación de instalaciones.

El rendimiento de la instalación de las placas, incluyendo la preparación y corte de piezas especiales fue de 5 m<sup>2</sup>/hora, lo que equivale a 14 ud/hora.

La Figura 9.10 incluye la documentación gráfica relativa a la instalación de la estructura portante y las placas de falso techo.



Figura 9.10. Instalación de estructura portante y placas de yeso-PU en el edificio del Parque Tecnológico de Álava en Miñano (España)

Los operarios encargados de su instalación mencionan una manipulación similar al producto estándar y una correcta aceptación de los recortes por parte de la placa. Por otro lado, valoran positivamente el descenso de peso del producto ya que ayuda a una instalación más fácil y ergonómica.

Por último, se procede a la instalación del sistema de monitorización encargado de tomar medidas de humedad y temperatura de diferentes

estancias. En las Figura 9.11Figura 9.12 se puede comprobar que se instalan un total de diez sensores, algunos en espacios con techo de placa de yeso estándar (color azul) y otros en estancias y pasillos con techo de placa de yeso-PU (color granate). La puerta de enlace de recepción y transmisión de datos (color verde) se ubica en la sala de comunicaciones de la planta baja.

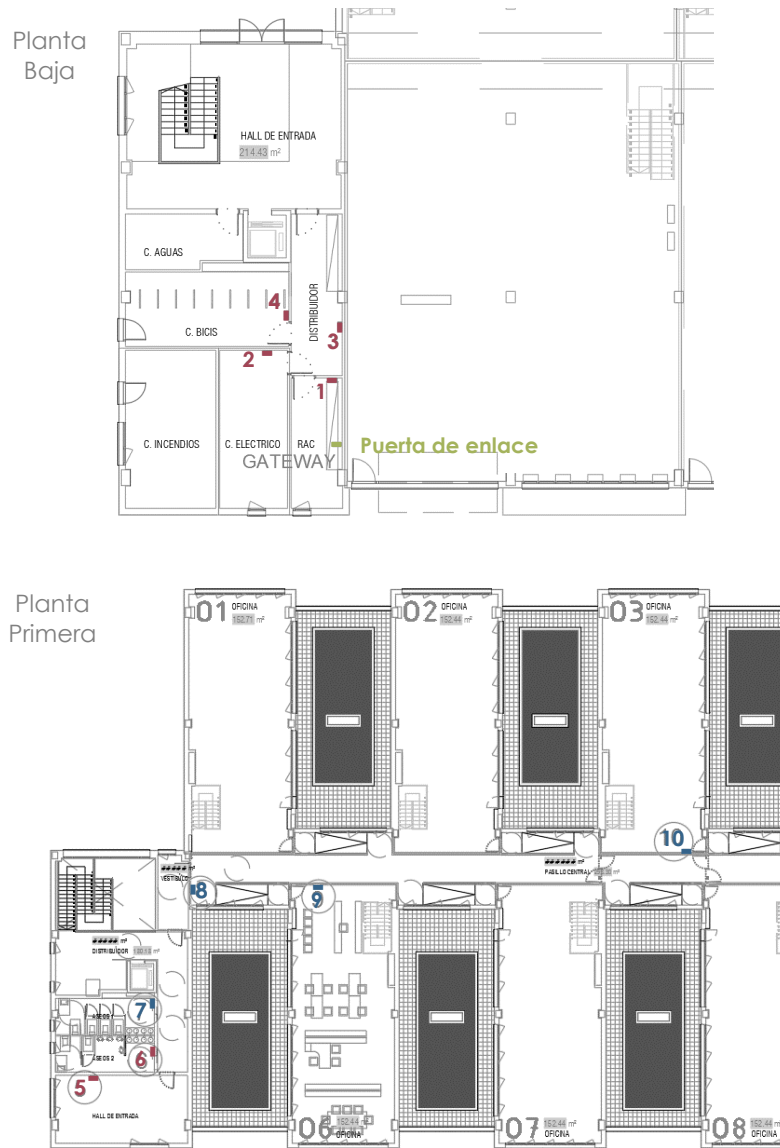


Figura 9.11. Plano de ubicación de planta baja y planta primera de los sensores de monitorización en el edificio del Parque Tecnológico de Álava en Miñano (España)

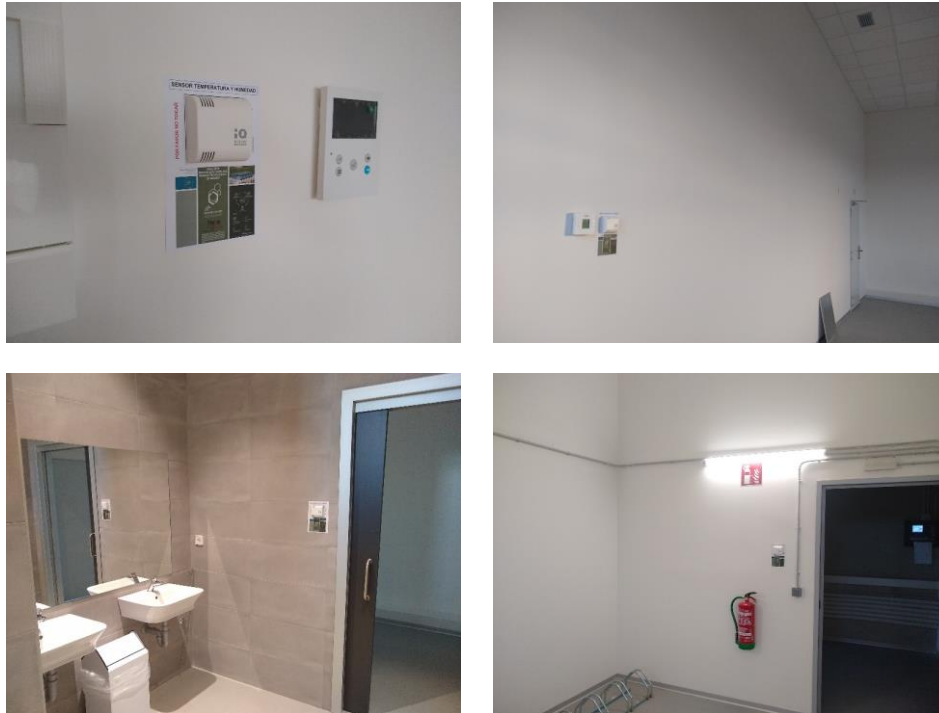


Figura 9.12. Instalación de los sensores de monitorización en el edificio del Parque Tecnológico de Álava en Miñano (España)

### 9.3. Puesta en obra en Coventry (Reino Unido)

El tercer emplazamiento tiene lugar en el edificio Sir Jhon Laing en la Universidad de Coventry, ubicado en la calle Much Park, CV1 2LT en Coventry (Reino Unido). Se trata de una obra de rehabilitación cuyo responsable de su ejecución es la empresa TECSA.

El edificio se construye en 1970 y, en la actualidad, alberga la Facultad de Ingeniería, Medio Ambiente y Computación (Figura 9.13). Consta de dos plantas, la planta baja se distribuye en el espacio de recepción y gestión y los laboratorios, mientras que en la planta superior se localizan varias clases, despachos y cuartos de instalaciones.



Figura 9.13. Edificio Sir Jhon Laing de la Universidad de Coventry en Coventry (Reino Unido)

El área disponible, para la instalación de las placas de yeso-PU, se localiza en la segunda planta e incluye espacios como pasillos y aulas con una superficie total de 400 m<sup>2</sup> (Figura 9.14).

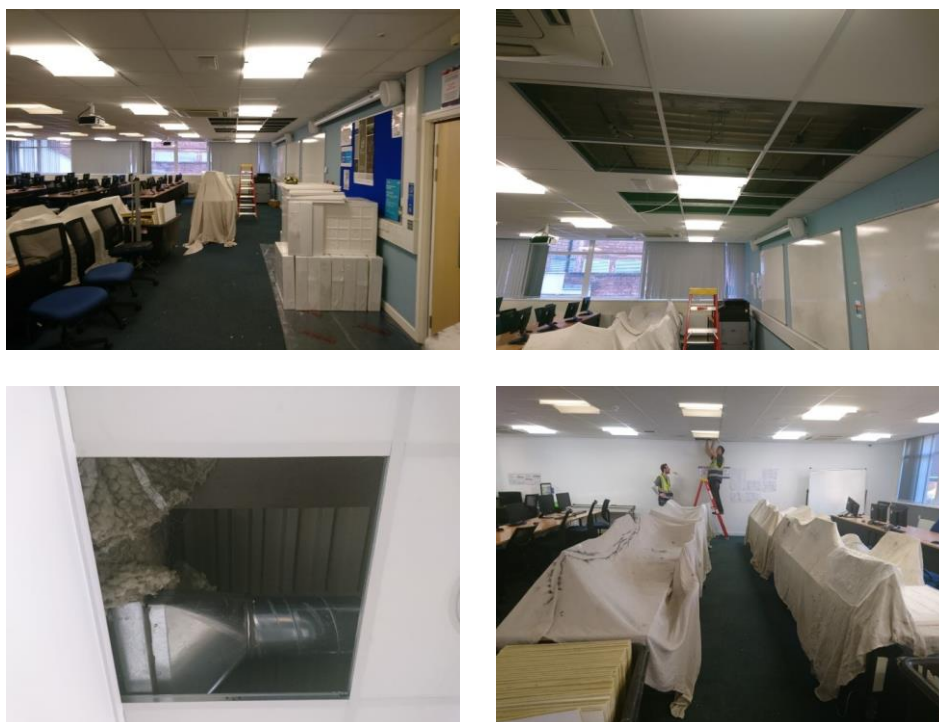


Figura 9.14. Instalación de placas de yeso-PU en el edificio Sir Jhon Laing de la Universidad de Coventry en Coventry (Reino Unido)

Para este emplazamiento, se fabrican cuatro pallets con un total de 140 cajas y 8 placas por caja, lo que hace un total de 1.120 placas de yeso-PU.

En este caso, se plantean dos procesos de monitorización. El primero se lleva a cabo la toma de datos de temperatura y humedad de las estancias con el revestimiento de techo existente. En la segunda, se monitorizan los mismos espacios habiéndose sustituido previamente el falso techo existente por la nueva palca de escayola con residuo de poliuretano. El sistema de monitorización es de tipo IOT con sensores que permiten la obtención de datos a través de internet (Figura 9.15).

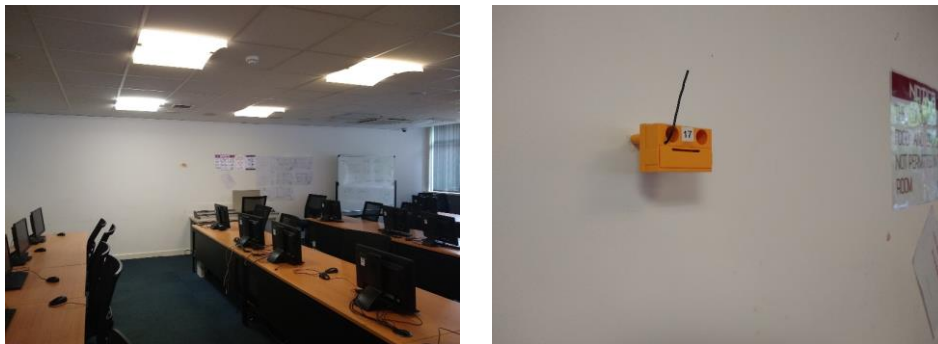


Figura 9.15. Instalación de los sensores de monitorización en el edificio Sir Jhon Laing de la Universidad de Coventry en Coventry (Reino Unido)

#### 9.4. Resultados del proceso de monitorización

Cada emplazamiento es monitoreado durante 12 meses en los que se recogen los parámetros ambientales relacionados con la humedad relativa y temperatura de varios espacios del edificio con falsos techo de placa de yeso estándar y placa-PU, con el objetivo de comparar de forma simultánea las condiciones de confort. Los sistemas de monitorización instalados constan de 19 sensores y 2 puertas de enlace en el emplazamiento de Burgos y de 10 sensores y 1 puerta de enlace tanto en Miñano (Álava) como en Coventry.

Con el fin de dar soporte a los procesos de gestión, análisis e interpretación de los datos se crea una plataforma online de gestión de datos. La información de los tres emplazamientos se recoge en un único servidor de comunicaciones IoT de forma que la información sea accesible y esté disponible en tiempo real.

Con el propósito de optimizar el rendimiento de la plataforma, únicamente incluye campos relativos a los sensores (id y puerto), datos relacionados con la humedad y temperatura interior y la fecha y hora de la lectura, datos meteorológicos (humedad y temperatura exterior y la fecha y hora de la lectura), el tipo de placa (yeso-PU o estándar) y el cálculo de los datos de diferencia de humedad y temperatura entre la medición de los sensores y los datos meteorológicos. La Figura 9.16 muestra el aspecto de la plataforma online de gestión de datos y la forma en la que se visualizan los valores.

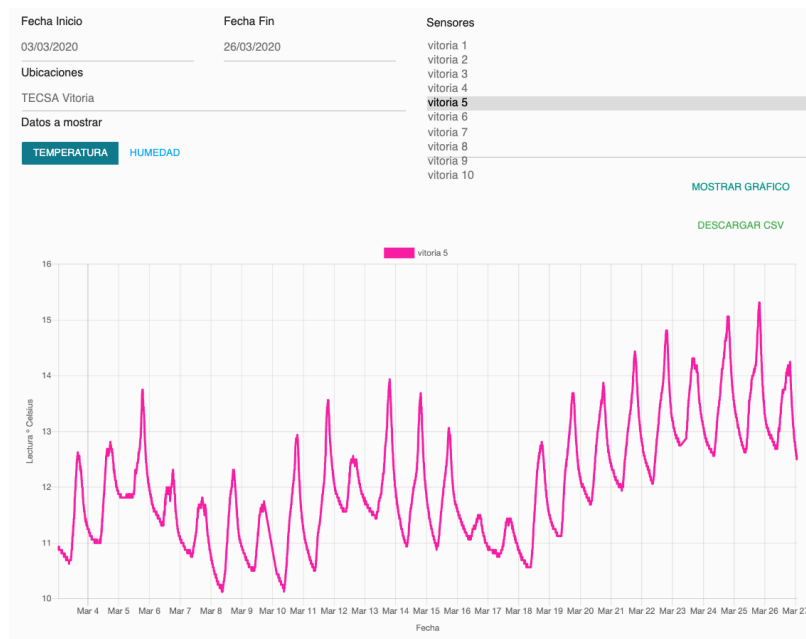


Figura 9.16. Visualización de la Plataforma online de Gestión de Datos

Las conclusiones sobre las prestaciones de confort del nuevo material de construcción monitorizado se analizan y extraen gracias a la creación de un módulo de análisis y explotación de los datos que utiliza tecnología Big Data.

Los resultados de monitorización se analizan de dos maneras diferentes en función del tipo de obra realizada. En los emplazamientos de Burgos y Coventry se lleva a cabo una intervención en el falso techo del edificio existente, en consecuencia, se monitorizan las áreas objeto de actuación antes y después de la sustitución del falso techo previo por



las nuevas placas de yeso-PU. En cuanto a la puesta en obra de Miñano (Álava), se trata de un edificio de nueva construcción por lo que no es posible monitorear previamente los espacios, en este caso, se comparan los datos de diferentes estancias en los que se instalan bien la placa de yeso-PU o bien la placa de yeso estándar.

El período de evaluación seleccionado comprende los meses de enero y febrero del año 2019 y 2020 para las puestas en obra de Burgos y Coventry, produciéndose el cambio de placas en el falso techo entre dichos períodos. En la puesta en obra de Miñano (Álava) se analizan los datos de los meses de enero y febrero de 2020. Se escogen estos períodos por tratarse de los más desfavorables en cuanto a diferencia de humedad y temperatura entre las condiciones de confort interiores y las climatológicas del exterior. Además, únicamente se tienen en cuenta los valores relativos a los días sábado y domingo en aquellos edificios con presencia de trabajadores, a fin de evitar las interferencias debidas a la presencia del ser humano. Los resultados se muestran en la Tabla 9.1.

Temperatura (°C)						
Ubicación	Fecha	T. interior	T. exterior	Dif. T. interior	Dif. T. exterior	Dif. T. total
<b>Burgos</b>	2019 (control)	16,06	3,84	1,86	1,64	0,22
	2020 (yeso-PU)	17,92	5,48			
<b>Álava</b>	2020 (estándar)	6,50	4,21	0,15	0,02	0,13
	2020 (yeso-PU)	6,65	4,23			
<b>Coventry</b>	2019 (control)	18,18	5,99	2,34	1,34	1,00
	2020 (yeso-PU)	20,52	7,33			

Humedad relativa (% HR)						
Ubicación	Fecha	HR interior	HR exterior	Dif. HR interior	Dif. HR exterior	Dif. HR total
<b>Burgos</b>	2019 (control)	33,20	76,32	8,07	9,13	-1,14
	2020 (yeso-PU)	41,27	85,45			
<b>Álava</b>	2020 (estándar)	74,63	85,70	-0,22	-0,05	0,16
	2020 (yeso-PU)	74,41	85,65			
<b>Coventry</b>	2019 (control)	37,55	86,24	5,20	-1,96	7,16
	2020 (yeso-PU)	42,75	84,28			

Tabla 9.1. Proceso de monitorización de los diferentes emplazamientos de puesta en obra

Los tres emplazamientos presentan el mismo comportamiento en cuanto a la temperatura. La temperatura interior en el año 2020 (placa de yeso-PU) aumenta entre 0,15 y 2,34 °C mientras que la temperatura exterior únicamente lo hace entre 0,02 y 1,64 °C. En este caso, dadas las fechas en las que realiza la evaluación se entiende como favorable la contribución al aumento de la temperatura interior de los espacios, no obstante, la idoneidad o aptitud depende en gran medida del uso específico de cada estancia.

En lo que respecta a los valores de humedad relativa, el edificio de Álava experimenta una variación de los datos prácticamente despreciable, mostrando un comportamiento similar para el producto de yeso-PU y la placa de yeso estándar. En Burgos se notifica un aumento de la humedad relativa similar tanto en el interior de las estancias con la placa de yeso-PU como en el exterior. Los resultados de monitorización en Coventry muestran un descenso de la humedad relativa del ambiente exterior mientras que en el interior aumenta. Dados los diferentes comportamientos observados para cada emplazamiento, no es posible obtener una conclusión uniforme en lo que se refiere a la influencia de las nuevas placas en el parámetro de humedad relativa.

El presente estudio pretende analizar el confort global de los espacios comparando las variaciones de humedad y temperatura interiores con las condiciones climáticas exteriores. No obstante, en estos parámetros no sólo afecta el material de revestimiento del falso techo, sino que también depende de otros factores como el régimen de climatización, de actividad, etc., por lo que no se pueden extraer conclusiones absolutas. Obtener conclusiones respecto del comportamiento aislado de un producto resulta complejo y, en ocasiones, irrealizable cuando influyen otros aspectos o elementos.

Por otro lado, según el uso de cada estancia, ésta requiere de unas condiciones específicas de confort por lo que agrupar y evaluar de forma global todos los espacios no es lo aconsejable. Lo que pueden ser unas condiciones de confort óptimas para un tipo de espacio, pueden no serlo para otros. No obstante, la multiplicidad de datos obtenidos dada la frecuencia de toma de datos y la cantidad de sensores obliga al tratamiento de los datos de esta manera.

Por último, de la monitorización del edificio de Miñano (Álava) se concluye que la comparación de los datos de humedad relativa y temperatura entre diferentes estancias es desacertada dado que varían sus perfiles de uso, orientación, superficie de envolvente térmica, materiales, etc. En definitiva, el nivel de certidumbre de los resultados y conclusiones obtenidos para este emplazamiento es bajo.

### 9.5. Conclusiones

De la puesta en obra de la placa de yeso-PU en diferentes emplazamientos se deduce que:

- Queda demostrada la viabilidad de su instalación a escala real tanto en obras de nueva construcción como en obras de rehabilitación.
- Puede colocarse sobre estructuras portantes existentes.
- Los operarios o instaladores del prefabricado perciben la pérdida de peso y mejor manejabilidad de la placa de yeso-PU con respecto a la placa de yeso estándar.
- No es posible llevar a cabo una evaluación certera de los datos de confort obtenidos del sistema de monitorización. Los valores de humedad y temperatura de los espacios interiores no sólo se deben al material de revestimiento del falso techo, sino que son múltiples los actores que contribuyen, por lo que no es posible tratar la influencia de la placa de yeso-PU de forma aislada e individualizada del sistema al que pertenece.



**Desarrollo  
sostenible.  
Análisis de ciclo  
de vida y análisis  
del coste del  
ciclo de vida**

**10**



## **CAPÍTULO 10. DESARROLLO SOSTENIBLE. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA Y ANÁLISIS DEL COSTE DEL CICLO DE VIDA**

Uno de los principales propósitos del presente trabajo de investigación es la evaluación de la sostenibilidad del producto innovador obtenido.

En este capítulo se desarrolla el estudio del desempeño ambiental de las mezclas de yeso con poliuretano reciclado de la fase experimental. Con respecto de la placa de yeso-PU resultante de la fase de industrialización, se analiza su rendimiento ambiental, económico y ecoeficiente.

### **10.1. Análisis de Ciclo de Vida (ACV)**

La creciente concienciación social acerca de la problemática medioambiental actual y los impactos derivados de los productos, conllevan al desarrollo, cada vez más sofisticado, de herramientas de análisis de los daños ocasionados. La Sociedad de Toxicología y Química Ambiental (SETAC) introduce por primera vez el concepto de Análisis de Ciclo de Vida (ACV), Life Cycle Assessment (LCA) en inglés, en la década de 1990.

Actualmente, el ACV es una de las técnicas de gestión ambiental, que consiste en reunir y evaluar las entradas, las salidas y los impactos ambientales de un sistema de producto a través de su ciclo de vida.

La normativa general de aplicación la constituyen las normas UNE-EN ISO 14040<sup>154</sup> y UNE-EN ISO 14040:2006/A1<sup>155</sup>, en las que se recogen los principios y marco de referencia a tener en cuenta en la realización de este tipo de evaluaciones. Los preceptos UNE-EN ISO 14044<sup>156</sup> y UNE-EN

---

<sup>154</sup> Asociación Española de Normalización (AENOR). (2006). UNE-EN ISO 14040 Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Principios y marco de referencia (ISO 14040:2006).

<sup>155</sup> Asociación Española de Normalización (AENOR). (2021). UNE-EN ISO 14040:2006/A1 Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Principios y marco de referencia. Modificación 1 (ISO 14040:2006/Amd 1:2020).

<sup>156</sup> Asociación Española de Normalización (AENOR). (2006). UNE-EN ISO 14044 Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Requisitos y directrices (ISO 14044:2006).

ISO 14044:2006/A1<sup>157</sup> recogen los requisitos y directrices a seguir para su consecución.

Este método permite una correcta identificación de oportunidades, aporta información relevante en la toma de decisiones, contribuye a la transparencia en términos ecológicos e impulsa la comercialización de productos que incorporan criterios de sostenibilidad.

El campo de aplicación del ACV comprende el cálculo de las huellas de carbono, hídrica, de agua, ecológica, ambiental de la UE, etc., la incorporación de criterios de eco-diseño en las fases iniciales de desarrollo de un producto, la obtención de etiquetas ambientales que impulsen la fase de comercialización, la promoción de la compra verde o compra verde pública, entre otros.

Los nuevos materiales innovadores, a priori considerados más ecológicos dada la incorporación de materiales reciclados en su composición, y el material de referencia, elaborado exclusivamente con materias primas extraídas de la naturaleza, se analizan y comparan con el propósito de cuantificar y verificar su desempeño ambiental. Este tipo de ACV se conoce como aseveración comparativa que consiste en una declaración ambiental en la que se relaciona la superioridad o equivalencia de un producto con respecto a otro que realiza la misma función.

### **10.1.1. Metodología**

El procedimiento para determinar el impacto ambiental de un producto comprende cuatro etapas consecutivas e interrelacionadas: definición del objetivo y el alcance, análisis de inventario, evaluación del impacto e interpretación (Figura 10.1).

---

<sup>157</sup> Asociación Española de Normalización (AENOR). (2018). UNE-EN ISO 14044:2006/A1 Gestión ambiental. Evaluación del ciclo de vida. Requisitos y directrices. Modificación 1 (ISO 14044:2006/Amd 1:2017).





Figura 10.1. Etapas del Análisis de Ciclo de Vida (ACV)

La fase de definición del objetivo y el alcance incluye la determinación de los límites del sistema, el nivel de detalle del estudio, el uso o público previsto y la unidad funcional, entendida como la magnitud de referencia para la cuantificación de los flujos ambientales.

La segunda fase es el análisis de inventario del ciclo de vida (ICV) y consiste en recopilar y cuantificar todas las entradas y salidas de materia, energía, emisiones, vertidos, etc., de los procedimientos unitarios considerados dentro de los límites del sistema.

La fase de evaluación del impacto de ciclo de vida (EICV) es la tercera etapa del estudio y en ella se analizan los datos obtenidos en la fase de ICV, así como su magnitud y trascendencia. Estos datos se asignan a las diferentes categorías de impacto objeto de análisis, para lo cual es importante el modelo de caracterización utilizado. Los procesos de normalización, agrupación y ponderación pertenecen a esta fase y son optativos, no obstante, permiten una mejor comprensión de los valores obtenidos.

La interpretación es la cuarta y última fase del estudio, en ella se evalúan los resultados obtenidos de las fases de ICV y EICV de acuerdo al objetivo y alcance definidos. Sirve de base para las conclusiones, recomendaciones y toma de decisiones.

### 10.1.2. Análisis de ciclo de vida de la fase experimental

En este apartado se recoge el estudio ambiental de las mezclas de yeso con diferentes tipos de residuo de poliuretano analizadas en la fase experimental, también se incluye la mezcla de referencia. La mezcla Y1,5ES2 es omitida del ACV comparativo dado su bajo rendimiento en la fase de caracterización previa.

El desarrollo completo de este ACV se recoge en Anexo 8.

#### 10.1.2.1. Definición del objetivo y el alcance del estudio

El objetivo principal es llevar a cabo una aseveración comparativa cuantificando el rendimiento ambiental de las diferentes mezclas de yeso con poliuretano reciclado y el material de referencia de cara a una posible toma de decisiones.

Se pretende identificar los procesos del ciclo de vida más influyentes o significativos en el desempeño ambiental, así como determinar la mezcla que presenta un comportamiento más respetuoso con la naturaleza.

Los límites del sistema considerados se muestran en el sistema de producto incluido en la Figura 10.2. Se tienen en cuenta las fases del ciclo de vida correspondientes a la adquisición y transporte de materias primas y a la fabricación de los diferentes compuestos. La mezcla de referencia no incluye los procesos relativos a la incorporación del residuo polimérico.

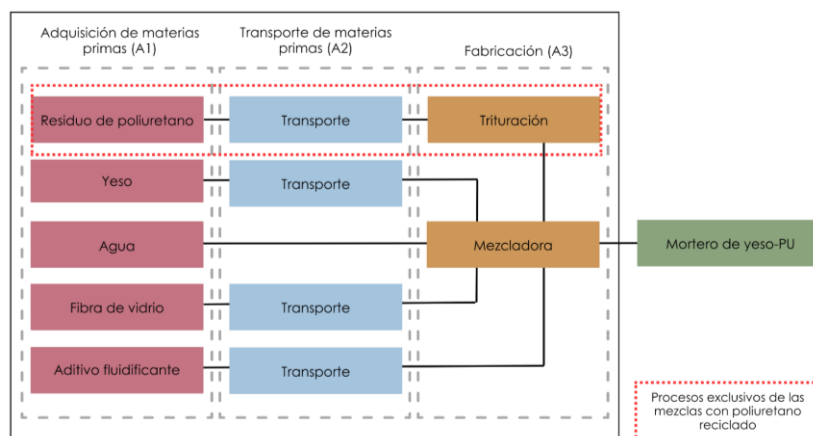


Figura 10.2. Sistema de producto de la mezcla de yeso y de las dosificaciones de yeso con poliuretano reciclado

Dados los límites del sistema considerados, el tipo de análisis realizado es de la “cuna a la puerta”.

Los datos primarios se obtienen de la información propia de la investigación con referencia al año 2022, los secundarios se extraen de la base de datos de Ecoinvent (v3.6).

Los cálculos se realizan con ayuda del software SimaPro (v 9.1). El modelo de impacto utilizado es el EN 15804+A2 (v 1.00)<sup>158</sup>.

La unidad funcional seleccionada, en base a la cual se realiza el inventario de datos y se muestran los resultados, es “1 m<sup>2</sup> de revestimiento de pasta de yeso de 15 mm de espesor”.

La Tabla 10.1 incluye las categorías de impacto evaluadas junto con su clave y unidad de medición.

Categoría de impacto	Clave	Unidad
<b>Cambio climático</b>	CC	Kg CO <sub>2</sub> eq
<b>Agotamiento de la capa de ozono</b>	ODP	Kg CFC <sub>11</sub> eq
<b>Radiación ionizante</b>	IR	KBq U-235 eq
<b>Formación de ozono fotoquímico</b>	POF	Kg NMVOC eq
<b>Partículas en suspensión</b>	PM	Disease inc.
<b>Toxicidad humada - no cancerígena</b>	HTOX-NC	CTU <sub>h</sub>
<b>Toxicidad humada - cancerígena</b>	HTOX-C	CTU <sub>h</sub>
<b>Acidificación</b>	AC	Mol H <sup>+</sup> eq
<b>Eutrofización, agua dulce</b>	FEU	Kg P eq
<b>Eutrofización, marina</b>	MEU	Kg N eq
<b>Eutrofización, terrestre</b>	TEU	Mol N eq
<b>Ecotoxicidad, agua dulce</b>	ECOTOX	CTU <sub>e</sub>
<b>Uso del suelo</b>	LU	Pt
<b>Uso del agua</b>	WU	m <sup>3</sup>
<b>Uso de recursos, fósiles</b>	FRD	MJ
<b>Uso de recursos, minerales y metales</b>	MRD	Kg Sb eq

Tabla 10.1. Detalle de las categorías de impacto empleadas en el análisis de ciclo de vida de la fase experimental

<sup>158</sup> Comisión Europea. (2023, julio). European Platform on LCA | EPLCA - EN 15804 reference package. <https://eplca.jrc.ec.europa.eu/LCDN/EN15804.xhtml>

El criterio de asignación de las entradas y salidas del sistema a cada producto es de tipo físico (masa).

### **10.1.2.2. Análisis del inventario (ICV)**

Se recopilan las entradas y salidas de forma cualitativa y cuantitativa de los procesos unitarios incluidos en el sistema de producto.

#### **Adquisición de materias primas (A1)**

Incluye la extracción de los recursos naturales, así como la fabricación del aditivo y la fibra. Las materias primas empleadas en la fabricación de la unidad funcional son: escayola, (residuo de poliuretano), agua, fibra de vidrio y aditivo fluidificante.

La carga ambiental considerada para el residuo de poliuretano es nula, ésta queda asignada al material primario del que resulta.

#### **Transporte de materias primas (A2)**

Se considera el traslado de todas las materias primas consideradas en la etapa A1, desde el lugar de extracción, fabricación o tratamiento hasta las instalaciones del centro de investigación.

#### **Fabricación (A3)**

En este módulo se consideran los procesos de fabricación necesarios para satisfacer la unidad funcional. Estos procesos son la trituración del residuo de poliuretano, el mezclado de la pasta y el secado del producto, incluyendo el consumo de agua y energía.

No se considera embalaje ni residuos procedentes del embalaje de las materias primas.

### **10.1.2.3. Evaluación del impacto de ciclo de vida (EICV)**

La Tabla 10.2 recoge los datos obtenidos de las mezclas de la fase experimental para las diferentes categorías de impacto en base al ICV previo.

	Y0	Y1,5I2	Y1,5B2	Y1,5P2	Y1,5A2	Y1,5AT4	Y1,5SG2	Y1,5BU2
<b>CC (Kg CO<sub>2</sub> eq)</b>	0,70	0,83	0,84	1,35	0,78	0,68	1,50	0,61
<b>ODP (Kg CFC<sub>11</sub> eq)</b>	8,90 · 10 <sup>-8</sup>	1,29 · 10 <sup>-7</sup>	1,29 · 10 <sup>-7</sup>	2,49 · 10 <sup>-7</sup>	9,62 · 10 <sup>-8</sup>	9,09 · 10 <sup>-8</sup>	2,11 · 10 <sup>-7</sup>	7,78 · 10 <sup>-8</sup>
<b>IR (KBq U-235 eq)</b>	0,10	0,16	0,17	0,18	0,28	0,33	0,59	0,15
<b>POF (Kg NMVOC eq)</b>	3,78 · 10 <sup>-3</sup>	4,51 · 10 <sup>-3</sup>	4,54 · 10 <sup>-3</sup>	7,74 · 10 <sup>-3</sup>	3,78 · 10 <sup>-3</sup>	3,25 · 10 <sup>-3</sup>	7,17 · 10 <sup>-3</sup>	3,16 · 10 <sup>-3</sup>
<b>PM (Disease inc.)</b>	3,52 · 10 <sup>-8</sup>	5,28 · 10 <sup>-8</sup>	5,28 · 10 <sup>-8</sup>	1,11 · 10 <sup>-7</sup>	3,15 · 10 <sup>-8</sup>	2,31 · 10 <sup>-8</sup>	7,23 · 10 <sup>-8</sup>	2,83 · 10 <sup>-8</sup>
<b>HTOX-NC (CTU<sub>h</sub>)</b>	1,31 · 10 <sup>-8</sup>	1,27 · 10 <sup>-8</sup>	1,28 · 10 <sup>-8</sup>	1,82 · 10 <sup>-8</sup>	1,20 · 10 <sup>-8</sup>	5,54 · 10 <sup>-9</sup>	1,91 · 10 <sup>-8</sup>	1,04 · 10 <sup>-8</sup>
<b>HTOX-C (CTU<sub>h</sub>)</b>	3,47 · 10 <sup>-10</sup>	6,14 · 10 <sup>-10</sup>	6,13 · 10 <sup>-10</sup>	1,39 · 10 <sup>-9</sup>	3,19 · 10 <sup>-10</sup>	1,38 · 10 <sup>-10</sup>	8,47 · 10 <sup>-10</sup>	2,86 · 10 <sup>-10</sup>
<b>AC (Mol H<sup>+</sup> eq)</b>	4,93 · 10 <sup>-3</sup>	5,48 · 10 <sup>-3</sup>	5,58 · 10 <sup>-3</sup>	7,94 · 10 <sup>-3</sup>	5,93 · 10 <sup>-3</sup>	5,45 · 10 <sup>-3</sup>	1,09 · 10 <sup>-2</sup>	4,49 · 10 <sup>-3</sup>
<b>FEU (Kg P eq)</b>	1,10 · 10 <sup>-4</sup>	1,15 · 10 <sup>-4</sup>	1,20 · 10 <sup>-3</sup>	1,13 · 10 <sup>-4</sup>	1,80 · 10 <sup>-4</sup>	1,65 · 10 <sup>-4</sup>	3,32 · 10 <sup>-4</sup>	1,18 · 10 <sup>-4</sup>
<b>MEU (Kg N eq)</b>	1,23 · 10 <sup>-3</sup>	1,43 · 10 <sup>-3</sup>	1,44 · 10 <sup>-3</sup>	2,35 · 10 <sup>-3</sup>	1,27 · 10 <sup>-3</sup>	1,13 · 10 <sup>-3</sup>	2,36 · 10 <sup>-3</sup>	1,04 · 10 <sup>-3</sup>
<b>TEU (Mol N eq)</b>	1,39 · 10 <sup>-2</sup>	1,59 · 10 <sup>-2</sup>	1,60 · 10 <sup>-2</sup>	2,62 · 10 <sup>-2</sup>	1,39 · 10 <sup>-2</sup>	1,25 · 10 <sup>-2</sup>	2,56 · 10 <sup>-2</sup>	1,16 · 10 <sup>-2</sup>
<b>ECOTOX (CTU<sub>e</sub>)</b>	24,77	19,77	19,89	22,21	20,49	19,38	26,15	18,79
<b>LU (Pt)</b>	0,44	0,63	0,68	0,61	1,20	1,25	2,52	0,66
<b>WU (m<sup>3</sup>)</b>	0,48	0,43	0,44	0,46	0,59	0,54	0,85	0,46
<b>FRD (MJ)</b>	11,46	13,75	14,03	20,89	14,78	13,51	28,66	10,85
<b>MRD (Kg Sb eq)</b>	1,14 · 10 <sup>-5</sup>	8,13 · 10 <sup>-6</sup>	8,14 · 10 <sup>-6</sup>	8,17 · 10 <sup>-6</sup>	8,16 · 10 <sup>-6</sup>	1,45 · 10 <sup>-7</sup>	8,28 · 10 <sup>-6</sup>	8,12 · 10 <sup>-6</sup>

Tabla 10.2. Resultados obtenidos en las categorías de impacto del análisis de ciclo de vida para las dosificaciones de la fase experimental

#### 10.1.2.4. Interpretación

Dada la multiplicidad de categorías de impacto analizadas y de resultados obtenidos en la fase EICV, se representan los datos de forma relativa y porcentual con el fin de facilitar su análisis (Figura 10.3).

Las categorías de impacto incluidas en el ACV se interpretan de forma que cuanto mayor es su resultado más elevado es el impacto ambiental. Por lo tanto, en los gráficos se asigna el 100 % a aquella

dosificación con el valor más alto para una categoría de impacto y el resto se relativizan en función de sus valores.

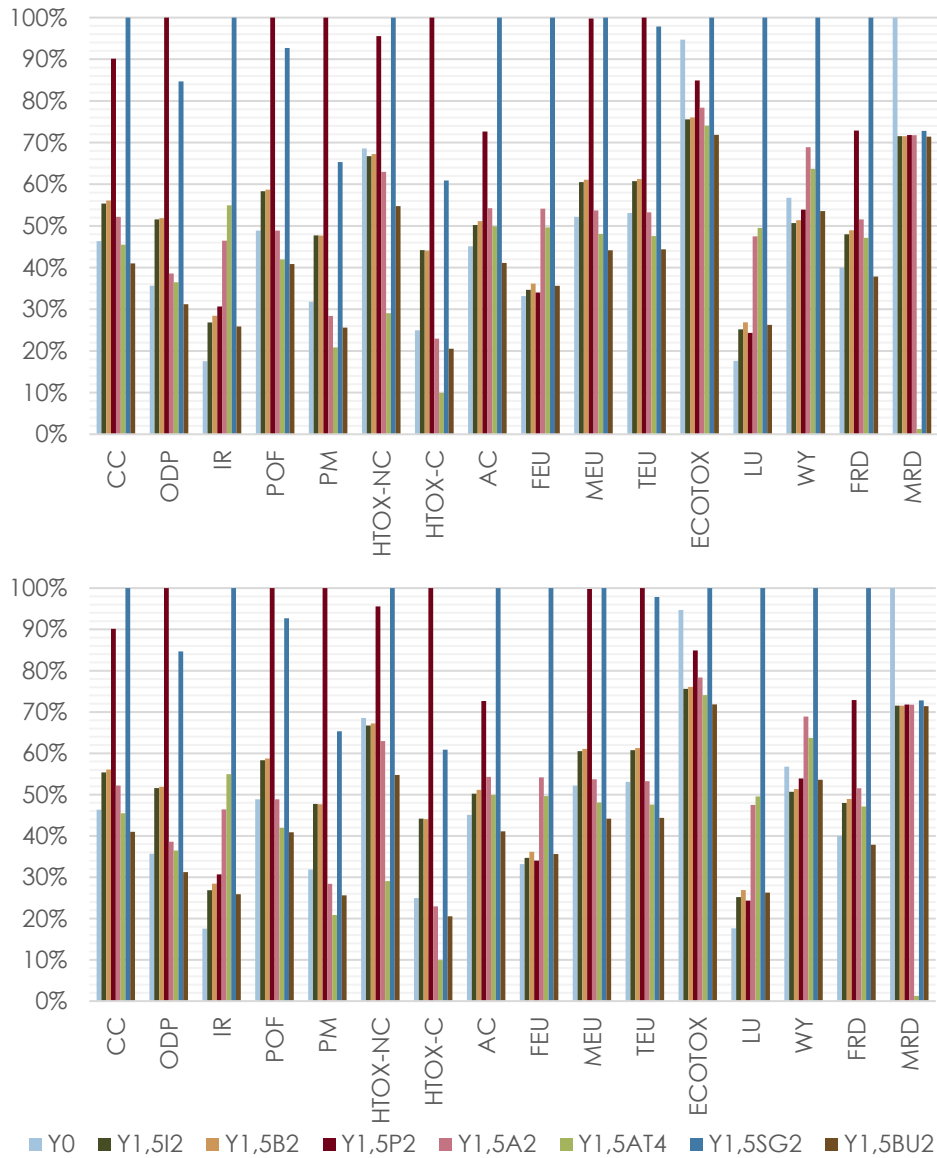


Figura 10.3. Comparativa de los resultados obtenidos en las categorías de impacto del análisis de ciclo de vida para las dosificaciones de la fase experimental

La mezcla Y1,5SG2 presenta los datos más altos en 10 de las 16 categorías de impacto. Le sigue la muestra Y1,5P2 con los resultados más elevados en 5 categorías. Por último, la dosificación de referencia Y0 es la que peor rendimiento muestra en la categoría de uso de recursos (minerales y metales) (MRD).

En el análisis de los resultados de forma individualizada, varias dosificaciones presentan impactos inferiores al material de referencia en algunas categorías mientras que en otras no debido a la huella asociada a los procesos de transporte y trituración del polímero. Destaca el buen rendimiento de la mezcla Y1,5BU2.

Los resultados obtenidos en la fase de EICV se someten a un proceso de ponderación. Este método opcional permite calcular una puntuación única y obtener un indicador global del impacto para cada dosificación. Las Figura 10.4 y Figura 10.5 incluyen los resultados obtenidos según la contribución de las categorías de impacto y las materias primas respectivamente.

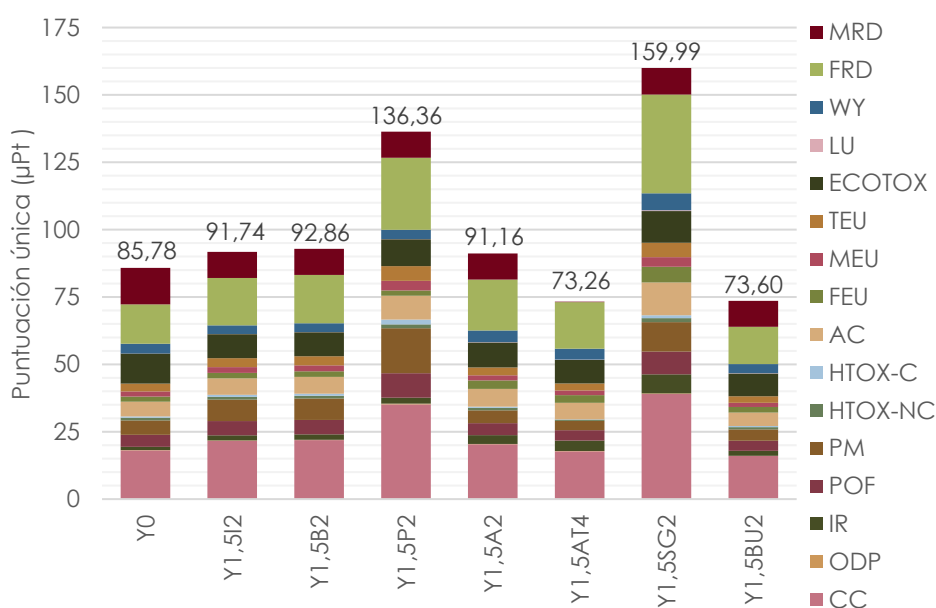


Figura 10.4. Puntuación única del ACV para las dosificaciones de la fase experimental según las categorías de impacto analizadas

Las mezclas Y1,5P2 y Y1,5SG2 superan en un 59 % y 87 %, respectivamente, el impacto ambiental de la muestra de referencia, debido a las cargas específicas de esos tipos de residuo de poliuretano.

Las dosificaciones Y1,5I2, Y1,5B2 e Y1,5A2 tienen un impacto de entorno al 6-8 % superior al de Y0.

La dosificación Y1,5AT4 obtiene el mejor rendimiento ambiental debido a la ausencia de fibra de vidrio en su composición. Su impacto es un 15 % menor al de la mezcla de referencia, seguida de la mezcla Y1,5BU2 con una huella un 14 % inferior.

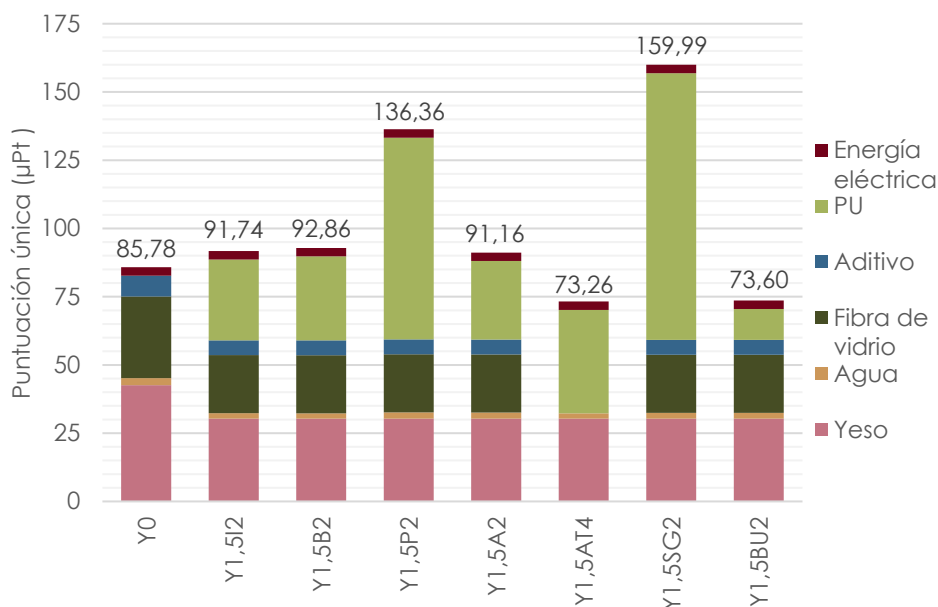


Figura 10.5. Puntuación única del ACV para las dosificaciones de la fase experimental según las materias primas incluidas en su fabricación

Los procesos que más influyen en el desempeño ambiental son el yeso, la fibra de vidrio y el residuo de poliuretano. La incorporación de agua y aditivo fluidificante tiene una menor relevancia.

La incorporación de poliuretano en sustitución de yeso provoca un descenso en el impacto del conglomerante, de la fibra de vidrio y del aditivo del 29 %. El impacto por el consumo de agua se reduce un 18 %. El consumo eléctrico es muy similar para todas las mezclas, el correspondiente debido al proceso de trituración se incluye en los datos de la materia prima de poliuretano.

El impacto ambiental de cada dosificación varía según sean las características del residuo de poliuretano que incorporan. Los procesos



más influyentes son la distancia de transporte y el tiempo de trituración (consumo de energía).

Se concluye que la incorporación de residuo de poliuretano en mezclas de yeso es factible desde el punto de vista medioambiental, si bien es preciso prestar atención al impacto que conllevan los nuevos procesos.

### 10.1.2.5. Análisis de sensibilidad

Se realiza una nueva evaluación con el propósito de analizar la sensibilidad del ACV con respecto a la distancia de transporte del residuo. En este caso, se establece un valor uniforme de 10 Km para todos los desechos. Las Figura 10.6 y Figura 10.7 incluyen los resultados obtenidos según la contribución de las categorías de impacto y las materias primas respectivamente.

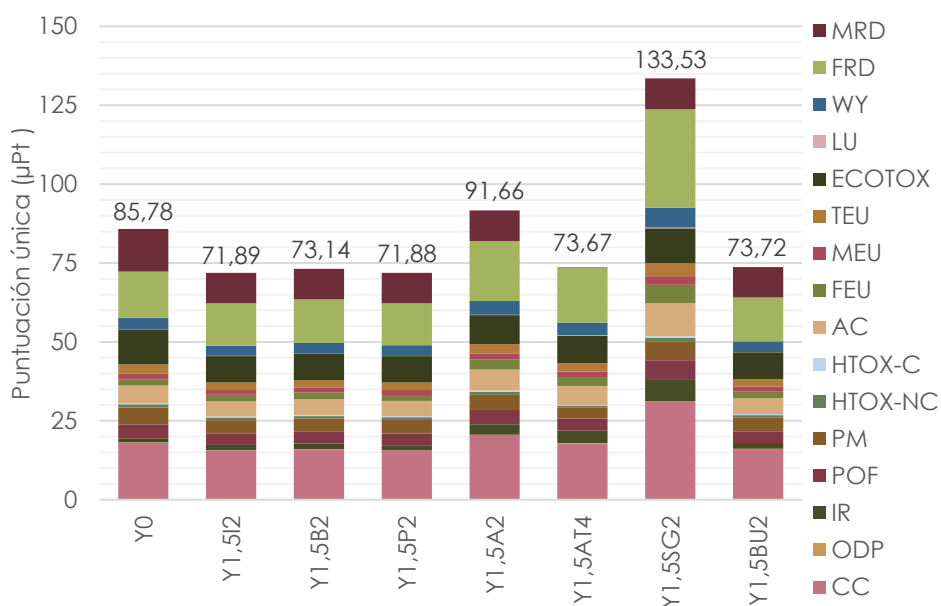


Figura 10.6. Puntuación única del ACV de las dosificaciones de la fase experimental según las categorías de impacto analizadas considerando un transporte de poliuretano de 10 km

La reducción de la distancia de transporte del poliuretano contribuye positivamente en mayor o menor medida en 8 de las 11 categorías de impacto.

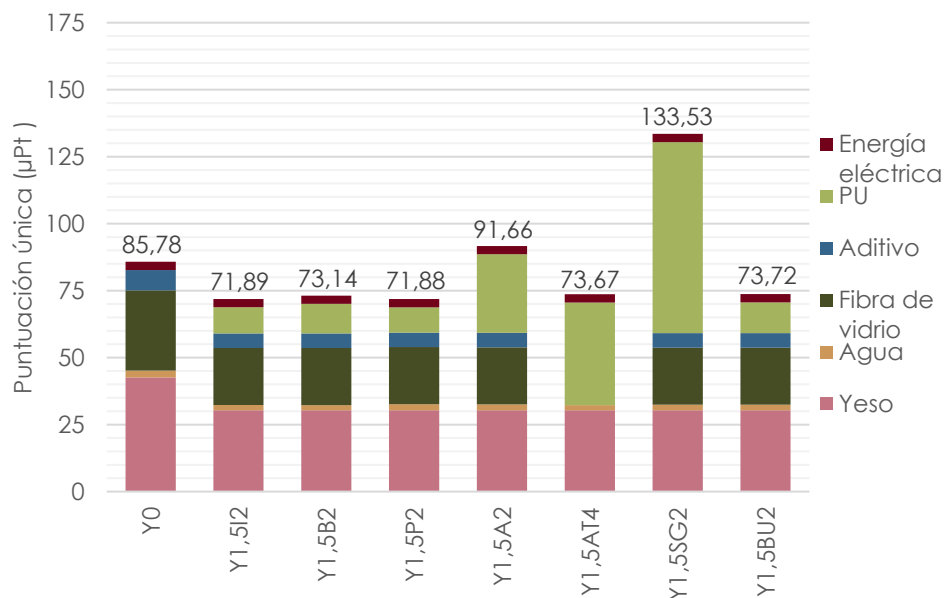


Figura 10.7. Puntuación única del ACV de las dosificaciones de la fase experimental según las materias primas incluidas en su fabricación considerando un transporte de poliuretano de 10 km

Esta mejora se hace especialmente notable en el residuo tipo P que reduce su huella ambiental en un 47 %. Las muestras con residuos tipo I, B y SG disminuyen su impacto entre un 16,5 y 21,5 %. Las mezclas Y1,5A2, Y1,5AT4 y Y1,5BU2 sufren un leve aumento de su impacto global, ya que la distancia de transporte original era inferior a 10 Km.

Con respecto al material de referencia, 6 de las 8 dosificaciones presentan un rendimiento ambiental mejor, no es así para las mezclas Y1,5A2 e Y1,5SG2.

Finalmente, se concluye que una distancia corta en el transporte del material valorizado es determinante a la hora de que su rendimiento ambiental sea más favorable.

### 10.1.3. Análisis de ciclo de vida de la fase industrial

Tras conseguir y comprobar con éxito que el desarrollo de una nueva placa para techos suspendidos y desmontables de escayola con poliuretano reciclado es posible, surge la necesidad de conocer su desempeño desde el punto de vista ambiental.

Los productos analizados carecen en su composición de sustancias peligrosas sujetas a autorización (lista de sustancias candidatas extremadamente preocupantes). Al mismo tiempo, no emiten sustancias peligrosas al aire, el agua o el suelo durante su fase de uso.

El desarrollo completo de este ACV se recoge en Anexo 9.

#### 10.1.3.1. Definición del objetivo y el alcance del estudio

El objetivo principal es llevar a cabo una aseveración comparativa cuantificando el rendimiento ambiental de la placa de escayola con poliuretano reciclado y la placa estándar.

Los límites del sistema considerados se muestran en el sistema de producto incluido en la Figura 10.8. Se tienen en cuenta todas las fases del ciclo de vida. La placa de yeso estándar no incluye los procesos relativos a la incorporación del residuo polimérico. Dados los límites del sistema, el tipo de análisis realizado es de la “cuna a la tumba”.

Los datos primarios se obtienen de la información proporcionada por el fabricante con referencia a los años 2018 y 2019, los secundarios se extraen de la base de datos y otras fuentes bibliográficas. Los cálculos se realizan con ayuda del software SimaPro (v 9.1). El modelo de impacto utilizado es el CML 2001<sup>159</sup>.

La unidad funcional seleccionada es “1 m<sup>2</sup> de revestimiento de placa de yeso de 15 mm de espesor”.

El criterio de asignación de las entradas y salidas del sistema a cada producto es de tipo físico (masa).

---

<sup>159</sup> Universiteit Leiden. (2023, julio). CML-IA Characterisation Factors. <https://www.universiteitleiden.nl/en/research/research-output/science/cml-ia-characterisation-factors>

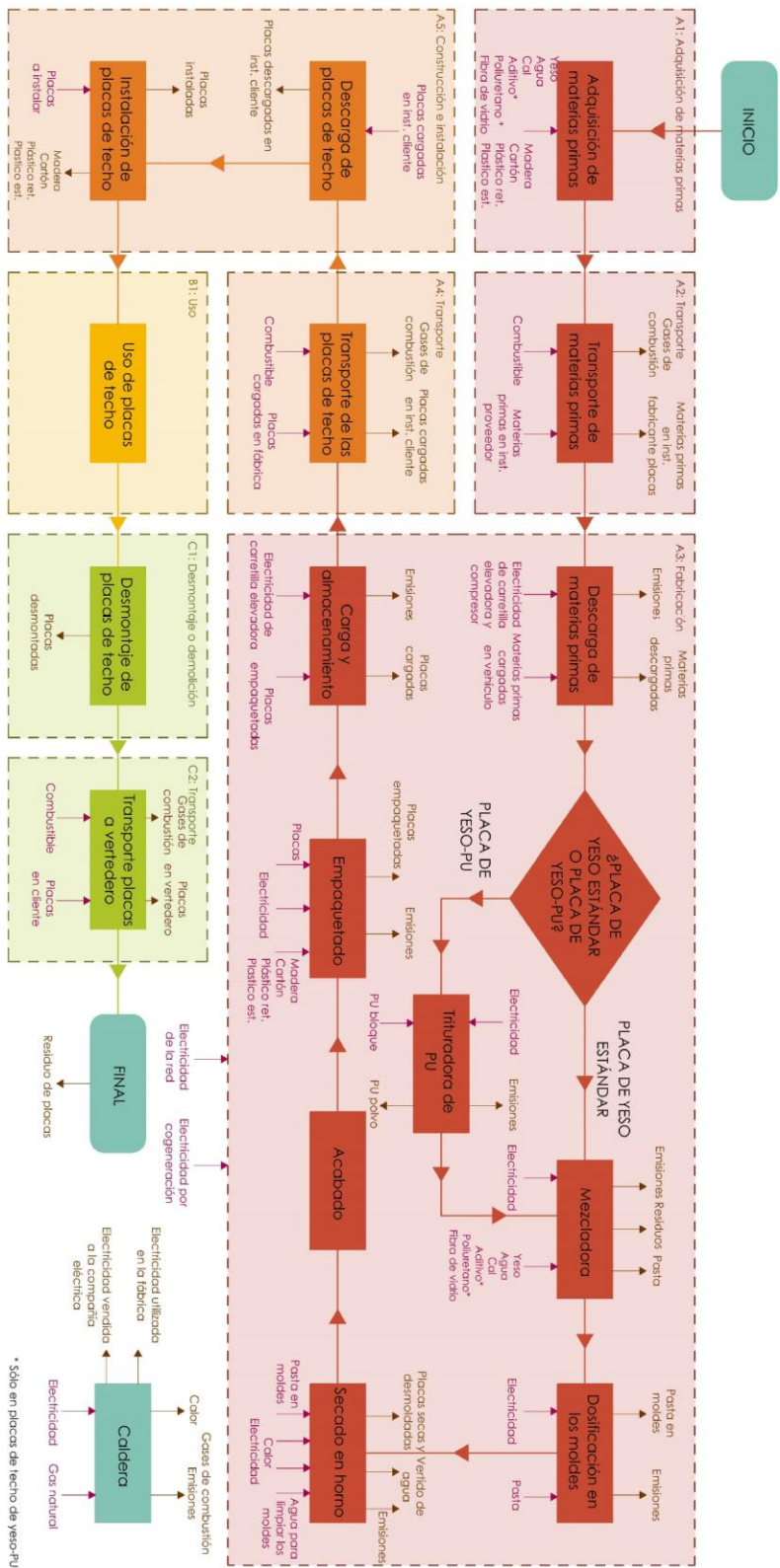


Figura 10.8. Sistema de producto de la placa de techo de yeso estándar y de la placa de techo de yeso-PU

La Tabla 10.3 recoge las categorías de impacto analizadas del ACV, así como su nomenclatura y unidad de medición.

Categoría de impacto	Clave	Unidad
Calentamiento global	GWP	Kg CO <sub>2</sub> eq
Acidificación del suelo y del agua	AP	Kg SO <sub>2</sub> eq
Eutrofización	EP	Kg (PO <sub>4</sub> ) <sup>3-</sup> eq
Formación de ozono fotoquímico	POCP	Kg C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> eq
Agotamiento de recursos abióticos (ADP-elementos)	ADPE	Kg Sb eq
Agotamiento de recursos abióticos (ADP-combustibles fósiles)	ADPF	MJ
Uso total de energía primaria no renovable excluyendo recursos utilizados como materia prima	PENRE	MJ
Uso neto de recursos de agua dulce	FW	L
Residuos no peligrosos eliminados/vertidos	NHWD	Kg
Materiales para el reciclaje	MFR	Kg
Energía exportada	EE	MJ

Tabla 10.3. Detalle de las categorías de impacto empleadas en el análisis de ciclo de vida de la fase industrial

La categoría de energía exportada (EE) tiene una connotación o interpretación contraria al resto, es decir, cuanto mayor sea el valor resultante mejor es el rendimiento ambiental.

### 10.1.3.2. Análisis del inventario (ICV)

En este apartado se describen los procesos unitarios del sistema de producto, cuantificando sus entradas y salidas.

Los vehículos empleados en los transportes de las diferentes fases del ciclo de vida son categoría N3 y se clasifican como Euro IV con un consumo medio de 35 litros cada 100 Km.

### Adquisición de materias primas (A1)

Incluye la extracción de los recursos naturales, así como la fabricación del aditivo y la fibra. Las materias primas empleadas en la fabricación de la unidad funcional son: escayola, (residuo de poliuretano), agua, fibra de vidrio, (aditivo fluidificante) y cal. También se

consideran aquellas relacionadas con el embalaje del producto final, éstas son: pallet de madera, cartón, plástico retráctil y plástico estirable.

Se tienen en cuenta los proveedores habituales de la fábrica.

La carga ambiental considerada para el residuo de poliuretano es nula, ésta queda asignada al material primario del que resulta.

### **Transporte de materias primas (A2)**

Se considera el traslado de todas las materias primas consideradas en la etapa A1, desde el lugar de extracción, fabricación o tratamiento hasta las instalaciones del fabricante de placas.

### **Fabricación (A3)**

Se describen y cuantifican las entradas y salidas necesarias para la consecución de cada proceso unitario que forma parte de la etapa de fabricación.

Se consideran los procesos de descarga de materias primas, (triturado del residuo de poliuretano), mezclado, dosificación, secado, empaquetado, almacenamiento y carga para su traslado.

Se consideran los residuos relativos a los embalajes de las materias primas y los vertidos resultantes de la limpieza de los moldes.

El consumo de gas natural del modelo innovador es un 14,21 % inferior al del modelo estándar, dado que precisa de un 20,30 % menos de tiempo de secado. De este consumo global el 85 % se destina a fabricación y el 15 % a calefacción de la planta.

Por otra parte, la fábrica cuenta con un sistema de cogeneración de energía eléctrica, la energía que no se utiliza se vende a la red. La producción de energía del nuevo prefabricado se reduce en un 14,21 %.

### **Transporte del producto (A4)**

Se considera el traslado del producto terminado a las instalaciones del cliente.

Se estima un cliente tipo ubicado a 300 Km del punto de fabricación y el suministro de un camión completo.

### **Construcción e instalación (A5)**

Este módulo comprende la colocación de las placas.

Dada la variabilidad de situaciones al respecto, el impacto de esta etapa se considera nulo.

### **Uso (B1)**

Este módulo comprende la etapa de uso del producto. Se estima que la vida útil es de 30 años para ambos modelos de placa.

La contribución se estima nula dado que no es posible cuantificar de forma aislada la eficiencia energética debida al uso de las placas.

### **Desmontaje o demolición (C1)**

Se considera la retirada del producto.

Dada la variabilidad de situaciones al respecto, el impacto de esta etapa se considera nulo.

### **Transporte (C2)**

Esta fase comprende el transporte del residuo del producto al emplazamiento para su gestión.

Se establece que la distancia media a vertedero para el transporte de los residuos de ambos modelos es de 50 Km.

Se omite el reciclado o valorización del producto en el final de vida ya que se desconoce la existencia de empresas que lo realice. No obstante, este documento e investigaciones previas demuestran la posibilidad de reciclar placas de yeso con residuos poliméricos<sup>160</sup>.

Se incluye un resumen de los datos y cálculos desarrollados en el ICV según el sistema de producto de cada modelo (Figura 10.9 y Figura 10.10).

---

<sup>160</sup> Alameda, L., Calderón, V., Gadea, J., & Gutiérrez-González, S. (2015). Reciclado de placas de yeso laminado aligeradas con residuos de poliuretano = Recycling of gypsum plasterboard lightened with polyurethane waste. *Anales de Edificación*, 1(1), 33.







### 10.1.3.3. Evaluación del impacto de ciclo de vida (EICV)

La Tabla 10.4 muestra los resultados totales para cada una de las categorías de impacto, así como el porcentaje de diferencia entre ambos modelos usando como referencia la placa estándar.

Categoría de impacto	Unidad	Tipo de placa	Total	Diferencia (%)
<b>Impactos por emisiones</b>				
<b>Calentamiento global (GWP)</b>	Kg CO <sub>2</sub> eq	Estándar	6,488	<b>-13,98</b>
		Yeso-PU	5,581	
<b>Acidificación del suelo y del agua (AP)</b>	Kg SO <sub>2</sub> eq	Estándar	1,68·10 <sup>-3</sup>	<b>-8,93</b>
		Yeso-PU	1,53·10 <sup>-3</sup>	
<b>Eutrofización (EP)</b>	Kg (PO <sub>4</sub> ) <sup>3-</sup> eq	Estándar	3,12·10 <sup>-4</sup>	<b>-8,65</b>
		Yeso-PU	2,85·10 <sup>-4</sup>	
<b>Formación de ozono fotoquímico (POCP)</b>	Kg C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> eq	Estándar	1,05·10 <sup>-5</sup>	<b>19,05</b>
		Yeso-PU	1,25·10 <sup>-5</sup>	
<b>Agotamiento de recursos abióticos (ADP-elementos) (ADPE)</b>	Kg Sb eq	Estándar	0,48737	<b>-11,79</b>
		Yeso-PU	0,42989	
<b>Agotamiento de recursos abióticos (ADP-combustibles fósiles) (ADPF)</b>	MJ	Estándar	94,0797	<b>-13,83</b>
		Yeso-PU	81,0671	
<b>Impactos por uso de recursos</b>				
<b>Uso total de energía primaria no renovable excluyendo recursos utilizados como materia prima (PENRE)</b>	MJ	Estándar	94,0797	<b>-13,83</b>
		Yeso-PU	81,0671	
<b>Uso neto de recursos de agua dulce (FW)</b>	L	Estándar	8,328	<b>-25,22</b>
		Yeso-PU	6,228	
<b>Impactos por residuos generados</b>				
<b>Residuos no peligrosos eliminados/vertidos (NHWD)</b>	Kg	Estándar	10,1452	<b>-31,18</b>
		Yeso-PU	6,9816	
<b>Impacto por otros flujos de salida</b>				
<b>Materiales para el reciclaje (MFR)</b>	Kg	Estándar	0,2202	<b>1,08</b>
		Yeso-PU	0,2226	
<b>Energía exportada (EE)</b>	MJ	Estándar	30,458	<b>-21,75</b>
		Yeso-PU	23,832	

Tabla 10.4. Comparativa entre los resultados totales de placa de techo de yeso estándar y la placa de techo de yeso-PU

La Figura 10.11 muestra la contribución de las fases del ciclo de vida a cada categoría de impacto.

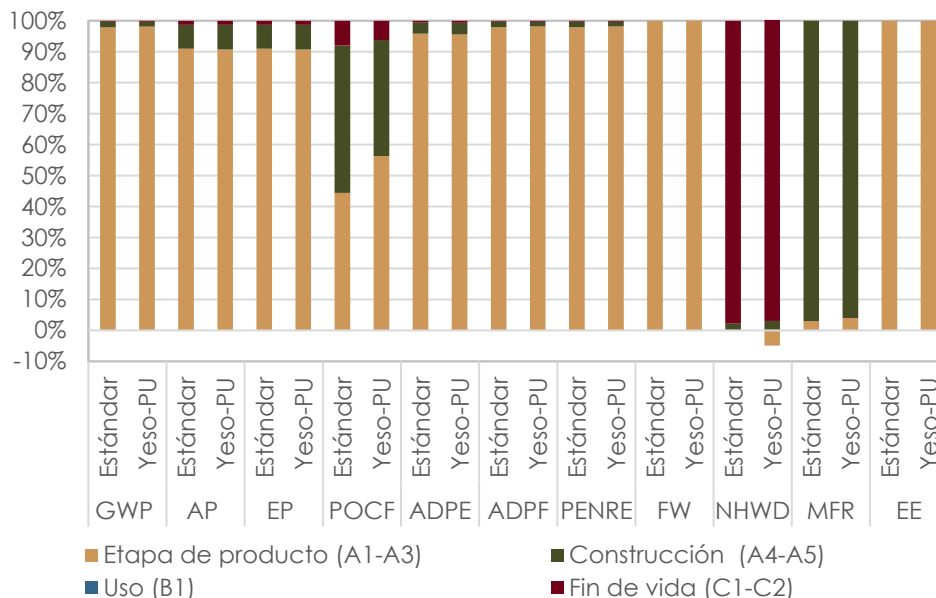


Figura 10.11. Contribución de las fases de ciclo de vida a cada categoría de impacto de la placa de techo de yeso estándar y la placa de techo de yeso-PU

### 10.1.3.4. Interpretación

En base a los resultados del análisis comparativo se puede afirmar que hay importantes diferencias en el comportamiento de los dos modelos estudiados. Se identifica una menor contribución de la placa de yeso-PU en 8 de las categorías de impacto estudiadas y un mejor comportamiento de la placa de yeso estándar en las 3 restantes.

Con respecto al modelo tradicional, el prefabricado innovador ve reducidas las emisiones de CO<sub>2</sub> en un 14 %, la acidificación y eutrofización mejora en un 9 %, el agotamiento de recurso abióticos disminuye entre un 12 y un 14 %, el consumo de energía se reduce en un 14 %, emplea un 25 % menos de agua y general un 31 % menos de residuos no peligrosos<sup>161</sup>.

<sup>161</sup> Rodrigo-Bravo, A., Alameda Cuenca-Romero, L., Calderón, V., Rodríguez, Á., & Gutiérrez-González, S. (2022). Comparative Life Cycle Assessment (LCA) between standard gypsum ceiling tile and polyurethane gypsum ceiling tile. *Energy and Buildings*, 259, 111867. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2022.111867>

Por el contrario, contribuye en un 19 % más a la formación de ozono fotoquímico, la cantidad de materiales para el reciclaje aumenta en un 1 % y la energía exportada se reduce en un 22 %.

De todas las fases del ciclo de vida analizadas, la etapa de producto (A1-A3) y especialmente la de producción (A3) son las de mayor contribución en 9 de las 11 categorías de impacto evaluadas.

En la Figura 10.12 se representa un resumen de los resultados obtenidos en cada modelo de placa para las 11 categorías de impacto.

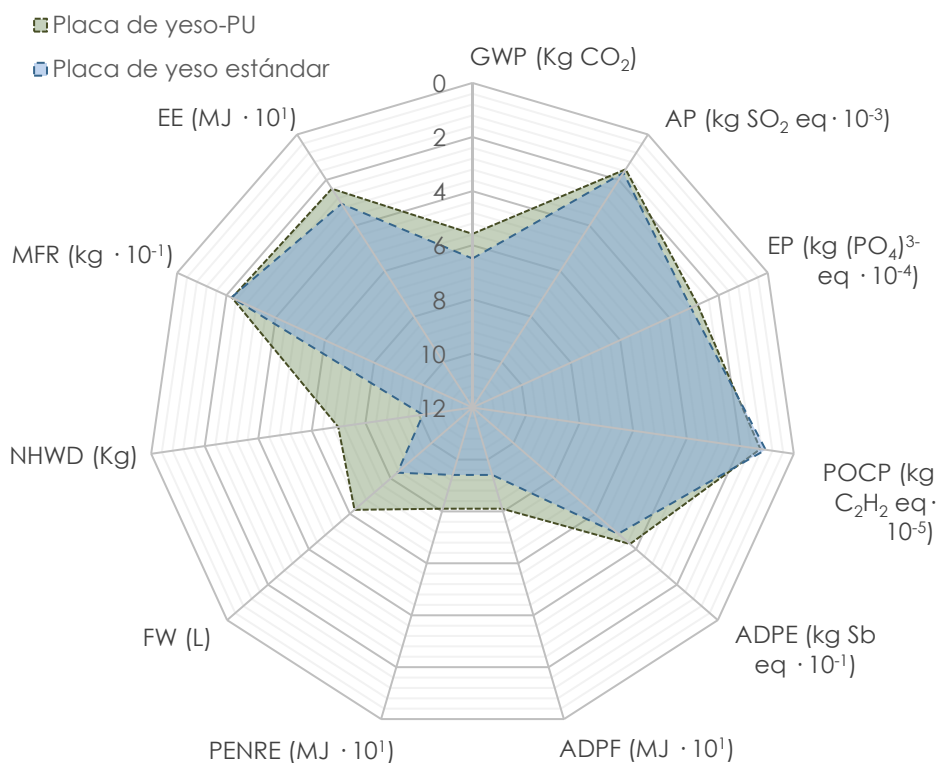


Figura 10.12. Impacto ambiental total para cada categoría de impacto de la placa de techo de yeso estándar y la placa de techo de yeso-PU

Analizando todas las categorías de impacto según el orden inverso del eje central y otorgándolas el mismo peso, se concluye que la placa de yeso-PU presenta un comportamiento ambiental más favorable que el modelo estándar.

### 10.1.4. Etiquetas ecológicas y declaraciones ambientales

El aumento del interés y la inquietud social por el medio ambiente provocan la proliferación y el desarrollo de productos que incorporan los impactos ambientales como uno de los criterios fundamentales a tener en cuenta en la toma de decisiones. Surge la necesidad de diferenciar en el mercado este tipo de productos, respetuosos con la naturaleza, del resto. Las etiquetas ecológicas y declaraciones ambientales son certificados voluntarios que emergen con el propósito de proporcionar información acerca de un producto o servicio desde el punto de vista ambiental a los (potenciales) compradores.

El formato de las etiquetas o declaraciones ambientales es muy variado, puede ir desde un enunciado, un símbolo o gráfico, una etiqueta en un envase hasta un folleto que acompañe al producto.

El objetivo de esta herramienta de gestión ambiental es estimular la demanda de productos y servicios con menor impacto en los ecosistemas e impulsar la mejora ambiental continua en el mercado.

En la actualidad, la cantidad de etiquetas y declaraciones ambientales diferentes es muy elevada, lo que dificulta la detección o reconocimiento de éstas por parte de la población y, por lo tanto, disminuye su capacidad de influencia. En consecuencia, diferentes organismos impulsan la creación de nuevas etiquetas cuyo propósito es englobar o agrupar todas estas afirmaciones uniformizando el mercado y mejorando su visibilidad y reconocimiento. Esta medida también garantiza el cumplimiento de los mismos estándares o criterios ambientales por parte de los productos o servicios para su clasificación como "verdes". Este es el caso de la etiqueta Ecolabel promovida por la Unión Europea<sup>162</sup>.

A pesar de esta multiplicidad, todas ellas pueden agruparse en tres tipos. El primero de ellos es el Etiquetado Ambiental Tipo I (Ecoetiquetas), otorgadas por una tercera parte independiente que actúa de entidad certificadora y que establece unos criterios mínimos ambientales para su

---

<sup>162</sup> The EU Ecolabel. (2023, junio).

[https://environment.ec.europa.eu/topics/circular-economy/eu-ecolabel-home\\_en](https://environment.ec.europa.eu/topics/circular-economy/eu-ecolabel-home_en)

cumplimiento, la normativa de aplicación es la UNE-EN ISO 14024<sup>163</sup>. El segundo tipo es la afirmación ambiental autodeclarada (Etiquetado Ambiental Tipo II), exenta de certificación por una tercera parte independiente, se realiza por fabricantes, importadores, etc., y se regula en norma UNE-EN ISO 14021<sup>164</sup>. El último grupo se conoce como declaración ambiental tipo III, verificada por parte de una tercera parte independiente y precisa cumplir con los requisitos exigidos en la norma UNE-EN ISO 14025<sup>165</sup>, no precisa de valores mínimos para su obtención.

#### **10.1.4.1. Afirmación ambiental autodeclarada (Etiquetado Ambiental Tipo II)**

En la presente investigación se utiliza la información ambiental proporcionada por el ACV de la fase industrial para crear una afirmación ambiental autodeclarada, también conocida, como Etiqueta Ambiental Tipo II, la cual cubre todas las etapas del ciclo de vida, de la “cuna a la tumba”, de la placa de yeso con poliuretano reciclado fabricada a nivel industrial y la unidad funcional es 1 m<sup>2</sup> de prefabricado.

En base a los resultados del ACV y según las directrices de la norma UNE-EN ISO 14021<sup>166</sup>, se realizan las siguientes afirmaciones ambientales autodeclaradas relativas al nuevo modelo:

- Contiene un 4,9 % de material reciclado y valorizado.
- Consume un 14 % menos de energía, 25% menos de agua y un 32 % menos de yeso que una placa de yeso estándar. Por el contrario,

---

<sup>163</sup> Asociación Española de Normalización (AENOR). (2018). UNE-EN ISO 14024 Etiquetas y declaraciones ambientales. Etiquetado ambiental tipo I. Principios y procedimientos (ISO 14024:2018).

<sup>164</sup> Asociación Española de Normalización (AENOR). (2017). UNE-EN ISO 14021 Etiquetas y declaraciones ambientales. Afirmaciones ambientales autodeclaradas (Etiquetado ambiental tipo II) (ISO 14021:2016).

<sup>165</sup> Asociación Española de Normalización (AENOR). (2010). UNE-EN ISO 14025 Etiquetas y declaraciones ambientales. Declaraciones ambientales tipo III. Principios y procedimientos (ISO 14025:2006).

<sup>166</sup> Asociación Española de Normalización (AENOR). (2017). UNE-EN ISO 14021 Etiquetas y declaraciones ambientales. Afirmaciones ambientales autodeclaradas (Etiquetado ambiental tipo II) (ISO 14021:2016).

precisa de la incorporación de un 2% de cal y un 0,5 % de aditivo fluidificante.

- Genera un 31 % menos de residuos no peligrosos que la placa de yeso tradicional.
- Reduce en un 14 % las emisiones de CO<sub>2</sub> con respecto a la placa de yeso estándar.

Estas afirmaciones ambientales se recogen en un folleto informativo, el cual se puede consultar en la página web del proyecto Life-Repolyuse<sup>167</sup> y en la etiqueta ambiental (Figura 10.13), la cual se dispone en el embalaje del producto comercializado.



Figura 10.13. Etiquetado Ambiental Tipo II de la placa de techo de yeso-PU

## 10.2. Análisis del Coste del Ciclo de Vida (CCV)

El análisis del Coste del Ciclo de Vida (CCV) es la herramienta utilizada para cuantificar el coste inicial y futuro de un producto o sistema a lo largo de un periodo de tiempo específico<sup>168</sup>.

<sup>167</sup> Documentación del proyecto Life-Repolyuse. (2023, junio). <https://life-repolyuse.com/documentacion-del-proyecto>

<sup>168</sup> Zhao, J. & Li, S. (2022). Life cycle cost assessment and multi-criteria decision analysis of environment-friendly building insulation materials - A review. *Energy and Buildings*, 254, 111582. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2021.111582>

La evaluación económica se determina a partir de las indicaciones recogidas en las normas ISO 15686-5<sup>169</sup>, específica para edificios y activos construidos, y UNE-EN 60300-3-3<sup>170</sup>, que incluye la guía de aplicación.

La información proporcionada por el análisis financiero permite determinar el rendimiento económico del producto y los costes de oportunidad. Por otra parte, ayuda a identificar las fases del ciclo de vida con mayor rango de acción para la mejora de este parámetro.

Entre los usos más frecuentes de este tipo de evaluación se encuentran la comparación de alternativas de diseño, el análisis y planificación de estrategias financieras, la detección de costes (causa y potencial mejora), la compra verde pública, entre otros.

El análisis económico de los productos se considera uno de los aspectos de mayor interés junto con la evaluación ambiental, ya que ambos en conjunto demuestran la posibilidad de obtener productos sostenibles con precios de mercado competitivos que puedan sustituir o suponer una alternativa real a los materiales convencionales.

### 10.2.1. Metodología

El procedimiento para determinar el rendimiento económico utiliza las mismas fases que en el ACV: definición del objetivo y el alcance, análisis de inventario, evaluación del impacto e interpretación.

En la actualidad no existe un procedimiento único y normalizado para el cálculo del CCV<sup>171</sup>. En el presente estudio se determina el coste total del ciclo de vida a partir de la suma de los costes nominales de los procesos asociados a cada etapa del ciclo de vida (Ecuación 10.1), conocido como el método CCV convencional<sup>172</sup>.

---

<sup>169</sup> International Organisation for Standardisation (ISO). (2017). ISO 15686-5 Buildings and constructed assets. Service life planning. Part 5: Life-cycle costing.

<sup>170</sup> Asociación Española de Normalización (AENOR). (2017). UNE-EN 60300-3-3 Gestión de la confiabilidad. Parte 3-3: Guía de aplicación. Cálculo del coste del ciclo de vida.

<sup>171</sup> Ciroth, A., Hildenbrand, J. & Steen, B. (2015). Life cycle costing. Sustainability Assessment of Renewables-Based Products: Methods and Case Studies, 215-228.

<sup>172</sup> Hunkeler, D., Lichtenvort, K. & Rebitzer, G. (2008). Environmental Life Cycle Costing (1st Edition). Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC).



$$CCV = C_{MP} + CT_{MP} + CV_F + CF_F + CT_P + C_I + C_U + C_{FV} \quad (\text{Ecuación 10.1})$$

Donde:

CCV: es el coste del ciclo de vida (€);

$C_{MP}$ : es el coste de la fase de adquisición de las materias primas (€);

$CT_{MP}$ : es el coste de la fase de transporte de las materias primas (€);

$CV_F$ : es el coste directo variable de la fase de fabricación (€);

$CF_F$ : es el coste directo fijo de la fase de fabricación (€);

$CT_P$ : es el coste de la fase de transporte del producto (€);

$C_I$ : es el coste de la fase de instalación del producto (€);

$C_U$ : es el coste de la fase de uso del producto (€);

$C_{FV}$ : es el coste de la fase de final de vida del producto (€).

### 10.2.2. Análisis de ciclo de vida de costes de la fase industrial

Una vez evaluado el desempeño ambiental de la placa de yeso-PU fabricada en la fase industrial se procede con el análisis económico, otro de los pilares fundamentales de la sostenibilidad. Se incluye también el análisis del rendimiento económico de la placa de yeso estándar.

La finalidad de este estudio es evaluar todas las entradas y salidas de costes de los procesos del ciclo de vida de ambos modelos de forma que se identifiquen aquellos de mayor influencia y oportunidad de cara a la fase de toma de decisiones y mejora del rendimiento económico.

Con el propósito de evitar su duplicidad, la presente evaluación no considera otras externalidades económicas, ni medioambientales o sociales diferentes a los costes del sistema de producto considerado.

El desarrollo completo de este CCV se recoge en Anexo 10.

### 10.2.2.1. Definición del objetivo y el alcance del estudio

El propósito de este CVV es cuantificar y realizar una aseveración comparativa del rendimiento económico de la placa de yeso estándar y la placa de yeso-PU.

Se pretende comparar la rentabilidad de ambas y concluir cuál de ellas es más sostenible en términos económicos.

Los procesos evaluados, así como, el sistema de producto son los mismos que para el ACV de la placa de yeso estándar y la placa de yeso-PU (Figura 10.8). Las fases del ciclo de vida consideradas son el suministro y transporte de materias primas, el proceso de fabricación del producto, el transporte hasta el cliente, el uso del y el fin de vida. La placa de yeso estándar no incluye los procesos relativos a la incorporación del residuo polimérico.

El tipo de CCV realizado es de la “cuna a la tumba”.

Los datos de costes necesarios de los procesos de entrada y salida del sistema son proporcionados por el fabricante de ambos modelos de placas y proceden de su experiencia.

La evaluación se lleva a cabo con ayuda de una hoja de cálculo.

A diferencia del ACV, en el CCV no existen diferentes metodologías de evaluación.

La unidad funcional seleccionada es “1 m<sup>2</sup> de revestimiento de placa de yeso de 15 mm de espesor”.

El criterio de asignación de las entradas y salidas del sistema a cada producto es de tipo físico (masa).

Se cuantifica una única categoría de impacto llamada costes del ciclo de vida y cuya unidad de medida es el euro (€).

### 10.2.2.2. Análisis del inventario (ICV)

A continuación, se describen los flujos de costes de los procesos implicados en cada una de las etapas del ciclo de vida incluidas en el estudio financiero.

En este caso, en la fase de ICV únicamente se contabilizan los flujos de tipo económicos del sistema de producto. La moneda es la unidad de medida utilizada es este tipo de análisis.

### **Adquisición de materias primas (A1) y transporte (A2)**

En este módulo se consideran los datos económicos relativos al suministro y traslado de las materias primas hasta la fábrica.

Se tienen en cuenta los proveedores habituales de la fábrica. El fabricante proporciona estos datos de forma conjunta, razón por la que se agrupan estas dos etapas.

El coste de adquisición del residuo de poliuretano es nulo, éste presenta un valor negativo debido el ahorro económico que supone su valorización.

El agua procede de la red municipal por lo que el coste asignado se debe únicamente al suministro, sin transporte.

### **Fabricación (A3)**

Los costes relativos a la fase de fabricación se dividen en dos tipos: costes directos variables y costes directos fijos. Los primeros son proporcionales al volumen de producción, mientras que los segundos son costes fijos independientes del nivel de fabricación.

Los costes directos variables están relacionados con el consumo de energía (eléctrica, fósil u otros), la mano de obra, el transporte interno y el almacenamiento de los productos.

La placa de yeso-PU consume un 14,21 % menos de gas dado que el tiempo de secado es un 20 % inferior al de la placa de yeso tradicional. La cantidad de energía producida por el sistema de cogeneración para el nuevo modelo es un 14,21 % inferior con respecto al prefabricado tradicional, proporcional al volumen de gas utilizado.

Los costes directos fijos se deben a la maquinaria, terrenos, edificios, entre otros. El criterio de asignación utilizado consiste en imputar estos flujos económicos a la unidad funcional (m<sup>2</sup>) de forma que se repartan los costes de los activos entre la capacidad máxima de producción de cada modelo de placa.

La capacidad de producción del nuevo modelo es un 25 % superior a la del modelo tradicional, debido a que el proceso limitante del sistema de producción es la fase de secado donde el tiempo de permanencia del nuevo prefabricado se reduce en un 20 %.

#### **Transporte (A4) y construcción e instalación (A5)**

Se considera el traslado del producto terminado a las instalaciones del cliente y su colocación.

Dada la variabilidad de situaciones al respecto, el impacto de esta etapa se considera nulo.

#### **Uso (B1)**

Este módulo comprende la etapa de uso del producto. Se estima que la vida útil es de 30 años para ambos modelos de placa.

La contribución de este módulo se considera nulo dado que no es posible cuantificar de forma aislada el ahorro económico en climatización debido al uso de estos prefabricados.

#### **Desmontaje o demolición (C1)**

Se considera la retirada del producto.

Dada la variabilidad de situaciones al respecto, el impacto de esta etapa se considera nulo.

#### **Transporte (C2)**

Esta fase comprende el transporte del residuo del producto al emplazamiento para su gestión.

Se establece que la distancia media a vertedero para el transporte de los residuos de ambos modelos es de 50 Km.

#### **10.2.2.3. Evaluación del impacto de ciclo de vida (EICV)**

Los resultados finales del coste de ciclo de vida considerando todas las fases analizadas se muestran en la Tabla 10.5.

	Coste (€/m <sup>2</sup> )	
	Placa de yeso estándar	Placa de yeso-PU
<b>Total A1+A2</b>	0,552	0,535
<b>Total A3</b>	1,476	1,367
<b>Total A4+A5</b>	-	-
<b>Total B1</b>	-	-
<b>Total C1</b>	-	-
<b>Total C2</b>	0,10000	0,09977
<b>Coste de ciclo de vida</b>	<b>2,128</b>	<b>2,002</b>

Tabla 10.5. Evaluación económica de la placa de yeso estándar y la placa de yeso-PU por unidad funcional del ciclo de vida completo

#### 10.2.2.4. Interpretación

Los resultados muestran una reducción de costes del 2,98 % en la adquisición y transporte de materias primas (A1+A2) en el modelo de yeso-PU con respecto a la placa de yeso estándar.

Los costes derivados de la incorporación de polímero y aditivo se ven compensados con la reducción en el consumo de yeso (32 %) en el modelo más innovador. Los costes de adquisición y transporte del embalaje son los mismos en ambos modelos.

La fase de producción (A3) es un 6,17 % menos costosa para el nuevo prefabricado.

Los costes directos variables son un 4,46 % más económicos para el prefabricado de yeso-PU, debido al ahorro energético del proceso de fabricación y secado y el descenso en el consumo de combustible dado su mejor peso.

Los costes directos fijos aplicados son un 13,01 % inferiores para el caso de la nueva placa. En este caso, resulta determinante la mayor capacidad de producción de la placa de yeso-PU (25 %) ya que se reduce considerablemente la repercusión de costes directos fijos por unidad funcional.

La etapa de producto (A1-A3) supone el 95 % del coste en ambos modelos. La subetapa de fabricación es la de mayor peso (Figura 10.14).

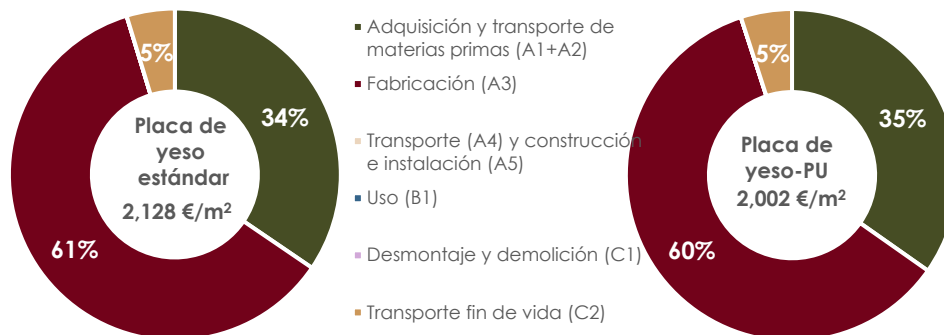


Figura 10.14. Influencia de cada fase del ciclo de vida en el coste global

Las fases de instalación y construcción (A4+A5), uso (B1) y desmontaje o demolición (C1) tienen una contribución económica nula.

En la etapa de transporte del final de vida (C2) se produce un ligero ahorro debido a la ligereza del nuevo prefabricado.

Finalmente, la incorporación de poliuretano reciclado en prefabricados de yeso para techos suspendidos desmontables conlleva un descenso del coste de ciclo de vida global del producto de 0,13 €/m² (5,91 %).

La Figura 10.15 incluye los flujos económicos que modifican el coste del ciclo de vida del modelo estándar hacia el del modelo innovador.

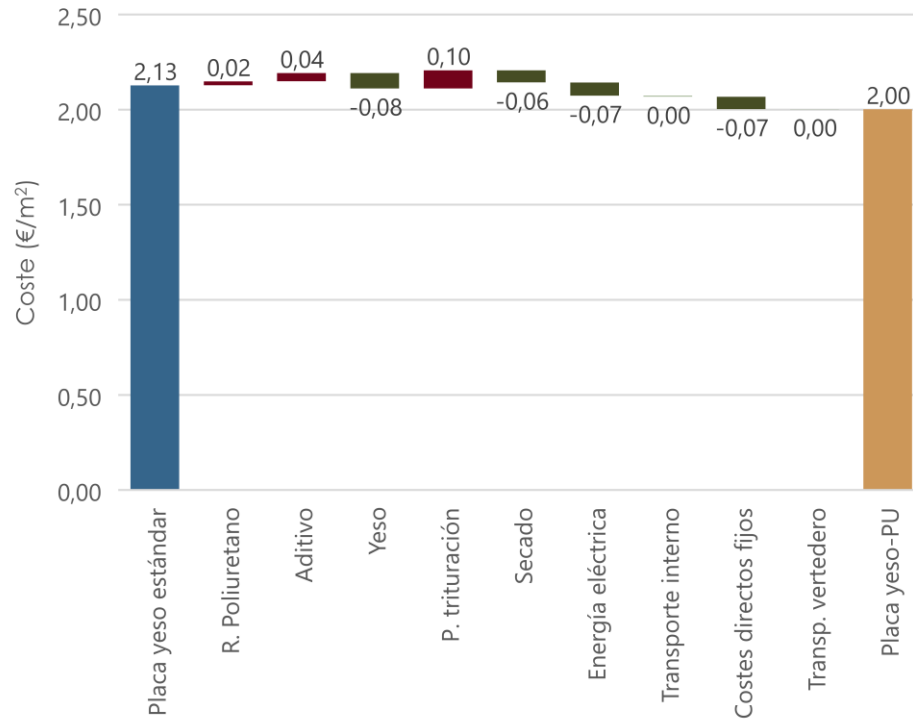


Figura 10.15. Flujos económicos de la evaluación financiera en los que difieren la placa de yeso estándar y la placa de yeso-PU

Los procesos que contribuyen a reducir el coste de la placa de yeso-PU predominan frente a los que influyen en un aumento de su valor. Los más significativos son los costes de adquisición y transporte del yeso, el proceso de secado, el consumo de energía eléctrica durante la fabricación y los costes directos fijos. Por el contrario, son pocos los procesos que provocan un aumento de los costes, siendo el más relevante el proceso de trituración del polímero.

La Figura 10.16 incluye una infografía con los flujos de costes totales de cada fase del ciclo de vida de ambos modelos de placa.



Figura 10.16. Flujos de costes de cada fase del ciclo de vida de la placa de yeso estándar y la placa de yeso-PU por unidad funcional



### 10.2.2.5. Análisis de sensibilidad

En el CCV se identifican dos variables especialmente sensibles a modificaciones, es decir, una leve variación en éstas puede significar un impacto considerable en el resultado del indicador de costes global.

El primer parámetro es el coste relativo al transporte de los residuos de poliuretano. La segunda variable es el nivel de producción de placas. El análisis de sensibilidad que incluye ambas variables se muestra en la Figura 10.17.

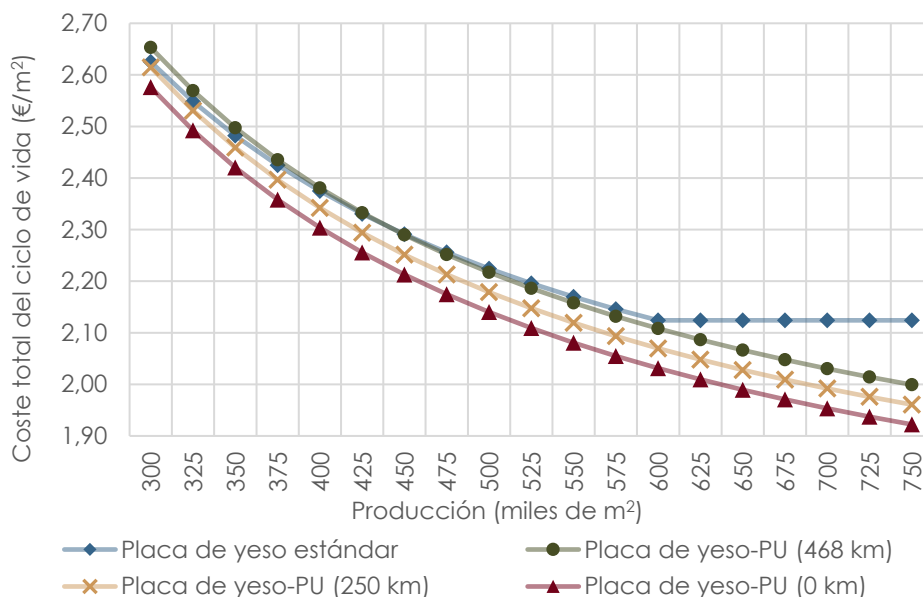


Figura 10.17. Evolución del coste del ciclo de vida de la unidad funcional en función de la distancia de transporte del poliuretano y del nivel de producción de placas

De este análisis de sensibilidad se concluye que:

- Para niveles de producción bajos (300.000 m<sup>2</sup>/año), el coste global de la placa yeso-PU es superior al de la placa de yeso estándar (2,63 €/m<sup>2</sup> frente a 2,60 €/m<sup>2</sup>) para la distancia actual. Sin embargo, en escenarios supuestos con una fuente de suministro de poliuretano más cercana (0 km), la situación cambia y es el nuevo prefabricado el que presenta un mejor rendimiento económico (2,58 €/m<sup>2</sup> frente a 2,60 €/m<sup>2</sup>).

- El coste por unidad funcional se iguala para niveles de producción de 400.000 m<sup>2</sup>/año. Ambos modelos cuestan 2,36 €/m<sup>2</sup>, teniendo en cuenta la distancia actual de transporte del polímero.
- La mayor diferencia financiera se produce en niveles de producción superiores a 600.000 m<sup>2</sup>/año, la capacidad máxima de fabricación del modelo tradicional. El nuevo modelo tiene una capacidad de producción adicional (hasta 750.000 m<sup>2</sup>/año) con los mismos activos.

Se realiza un segundo análisis de sensibilidad con el propósito de evaluar en profundidad y en exclusiva la fase de producción, donde los costes directos fijos de la unidad funcional son muy sensibles al volumen de fabricación (Figura 10.18).

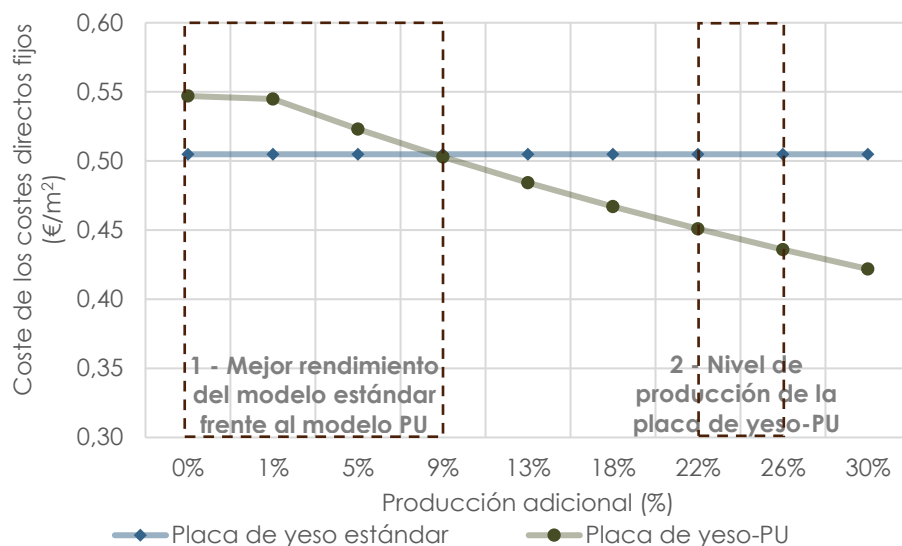


Figura 10.18. Variación del coste de los costes directos fijos de las placas de techo a medida que aumenta la diferencia de producción entre ambos modelos

En esta evaluación se diferencian tres fases:

- De 0 al 9 % de fabricación adicional del nuevo modelo con respecto al estándar, es este último el que presenta un mejor rendimiento económico, debido al elevado coste por unidad funcional del equipamiento necesario para la fabricación del prefabricado de yeso-PU.

- Para una sobreproducción de 53.500 m<sup>2</sup>/años adicionales (9%) de placa, se igualan los costes directos fijos de ambos modelos.
- A partir del 9 % de fabricación adicional comienza a ser rentable la inversión realizada en el equipamiento necesario incorporar el poliuretano en el nuevo modelo de prefabricado. El mejor rendimiento se presenta para una fabricación adicional de 144.000 m<sup>2</sup>/año (25%) de la placa de yeso-PU, el máximo posible dadas las condiciones del material y de las instalaciones.

### 10.3. Evaluación de la Ecoeficiencia (EE)

El análisis de ecoeficiencia (EE) relaciona el rendimiento económico y el desempeño ambiental, siempre y cuando ambas evaluaciones compartan los mismos principios, límites del sistema, sistema de producto, etc. Es un concepto relativo, para su interpretación es preciso llevar a cabo un estudio comparativo en la que todos los productos sigan el mismo proceso de evaluación.

La norma UNE-EN ISO 14045 establece los principios, requisitos y directrices a seguir para proceder con este tipo de análisis<sup>173</sup>.

El indicador utilizado para su cuantificación es el ratio que relaciona el Coste del ciclo de vida determinado en el CCV y los impactos ambientales obtenidos mediante el ACV. Los criterios sociales no son considerados en la perspectiva de la ecoeficiencia.

#### 10.3.1. Metodología

El procedimiento a seguir para determinar la ecoeficiencia de los productos se divide en dos etapas. La primera consiste en analizar la ecoeficiencia considerando cada uno de los impactos ambientales por separado (Ecuación 10.2), obteniendo múltiples indicadores de ecoeficiencia, uno por cada categoría de impacto considerada.

$$EE_{e,m} = \frac{CCV_m}{ACV_{e,m}} \quad (\text{Ecuación 10.2})$$

---

<sup>173</sup> Asociación Española de Normalización (AENOR). (2012). UNE-EN ISO 14045 Gestión ambiental. Evaluación de la ecoeficiencia del sistema del producto. Principios, requisitos y directrices (ISO 14045:2012).

Donde:

$EE_{e,m}$  es la ecoeficiencia para el impacto "e" y el producto "m" (€/unidad del impacto);

$CCV_m$  es el coste del ciclo de vida del producto "m" (€);

$ACV_{e,m}$  es el impacto medioambiental "e" para el producto "m" (unidad de impacto).

El segundo paso consiste en calcular un indicador global de ecoeficiencia ponderando los indicadores de ecoeficiencia obtenidos y agrupándolos en una única puntuación (Ecuación 10.3).

$$EE_m = \frac{\sum EE_{e,m} n_{e,m}}{n} \quad (\text{Ecuación 10.3})$$

Donde:

$EE_m$ : es la ecoeficiencia para el producto "m" (-);

$EE_{e,m}$ : es la ecoeficiencia normalizada para el impacto "e" y el producto "m" (-);

$n$ : es el número de indicadores de ecoeficiencia (-).

El proceso de ponderación consiste en asignar un peso o relevancia a cada indicador de ecoeficiencia de cada categoría medioambiental de forma que puedan sumarse y obtener una puntuación única.

### 10.3.2. Análisis de ecoeficiencia de la fase industrial

Se analiza y compara la ecoeficiencia de la placa de yeso estándar y de la placa de yeso-PU para techos suspendidos desmontables fabricadas a nivel industrial. Se evalúan distintos escenarios combinando el indicador económico del CCV con los once impactos ambientales obtenidos en el ACV.

El indicador económico se corresponde con el coste de ciclo de vida. Las categorías de impacto ambientales consideradas son el potencial de calentamiento global (GWP), la acidificación del suelo y del agua (AP), la eutrofización (EP), la formación de ozono fotoquímico

(POCP), el agotamientos de los recursos abióticos elementos y fósiles (ADPE y ADPF), el uso total de energía primaria no renovable excluyendo recursos utilizados como materia prima (PENRE), el uso neto de recursos de agua dulce (FW), los residuos no peligrosos eliminados/vertidos (NHWD), los materiales para reciclaje (MFR) y la energía exportada (EE).

La Tabla 10.6 recoge los resultados de la EE individual y ponderada.

Categorías de impacto	Eco-eficiencia (EE <sub>e,m</sub> ) (€/ud impacto)		Eco-eficiencia ponderada (EE <sub>e,m</sub> ) (-)	
	Placa de yeso estándar	Placa de yeso-PU	Placa de yeso estándar	Placa de yeso-PU
<b>GPW</b>	0,33	0,36	0,91	1,00
<b>AP</b>	1.263,13	1.306,14	0,97	1,00
<b>EP</b>	6.809,45	7.030,83	0,97	1,00
<b>POCP</b>	201.775,55	159.666,61	1,00	0,79
<b>ADPE</b>	4,37	4,66	0,94	1,00
<b>ADPF</b>	0,02	0,02	0,92	1,00
<b>PENRE</b>	0,02	0,02	0,92	1,00
<b>FW</b>	0,26	0,32	0,79	1,00
<b>NHWD</b>	0,21	0,29	0,73	1,00
<b>MFR</b>	9,66	8,99	1,00	0,93
<b>EE</b>	0,07	0,08	0,83	1,00
<b>Eco-eficiencia ponderada global (EE<sub>m</sub>) (-)</b>			<b>0,91</b>	<b>0,97</b>
<b>Factor X</b>			<b>1,0747</b>	

Tabla 10.6. Resultados de la evaluación de la ecoeficiencia

Los resultados obtenidos muestran una mejor relación económico-ambiental en siete de las once categorías analizadas para el nuevo prefabricado. En dos de ellas presentan valores similares y en otras dos el rendimiento es mejor en el modelo estándar. La forma en la que se presentan estos datos impide un análisis en mayor profundidad.

La ponderación permite una comparación global entre prefabricados teniendo en cuenta todos los impactos económico-ambientales al mismo tiempo. El proceso se realiza dando un valor de 1 a la ecoeficiencia máxima de un producto (EE<sub>e,m</sub>), el valor normalizado

del otro prefabricado ( $E_{Ene,n}$ ) es igual a la relación obtenida entre su ecoeficiencia ( $E_{Ee,n}$ ) y la ecoeficiencia máxima ( $E_{Ee,m}$ )<sup>174</sup>.

La puntuación global de ecoeficiencia obtenida es de 0,97 para el nuevo modelo de placa y de 0,91 para el modelo tradicional, siendo 1 el mejor y máximo valor y 0 el mínimo posible de obtener. El factor X es de 1,075, lo que significa una mejora de la ecoeficiencia del nuevo producto desarrollado del 7,5 %.

La metodología utilizada para estudiar la ecoeficiencia tiene sus limitaciones, es decir, si la variación porcentual de los indicadores económicos y ecológicos es la misma, ésta no se ve manifestada en el resultado del análisis de ecoeficiencia<sup>175</sup>. Por este motivo, se recomienda la representación de los resultados en un gráfico bidimensional<sup>176</sup>.

La Figura 10.19 muestra el resultado del análisis de ecoeficiencia del modelo innovador comparado con el tradicional. El grado de mejora o empeoramiento se representa en forma de porcentaje, lo que permite incluir todos los indicadores en un único gráfico.

Los indicadores de ecoeficiencia relativos a las categorías de impacto ambiental POCP y MFR se sitúan en la zona de mejora económica respecto al caso base pero no en el aspecto ambiental. En este caso, la ecoeficiencia de ambos indicadores disminuye un 26 % y un 7,5 %, respectivamente, para la placa de yeso-PU en comparación con la placa de yeso estándar. Los nueve indicadores de ecoeficiencia restantes se sitúan en la zona de progresos en ambos campos. El valor de la ecoeficiencia mejora en el nuevo producto entre un 3 % y un 27 % en estos indicadores.

Se concluye que la placa de yeso-PU mejora los resultados de ecoeficiencia de la placa de yeso estándar en 7,5 puntos, considerando

---

<sup>174</sup> Mendoza, J. M. F., D'Aponte, F., Gualtieri, D. & Azapagic, A. (2019). Disposable baby diapers: Life cycle costs, eco-efficiency and circular economy. *Journal of Cleaner Production*, 211, 455-467. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.146>

<sup>175</sup> Ng, R., Yeo, Z., Low, J. S. C. & Song, B. (2015). A method for relative eco-efficiency analysis and improvement: case study of bonding technologies. *Journal of Cleaner Production*, 99, 320-332. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.03.004>

<sup>176</sup> Low, J. S. C., Lu, W. F. & Song, B. (2014). Methodology for an Integrated Life Cycle Approach to Design for Environment. *Key Engineering Materials*, 572(1), 20-23. <https://doi.org/10.4028/WWW.SCIENTIFIC.NET/KEM.572.20>

los indicadores de las evaluaciones ambiental (ACV) y económica (CCV) previas. Nueve de los once indicadores mejoran en el nuevo producto, los dos restantes requieren de progresos en el ámbito ecológico.

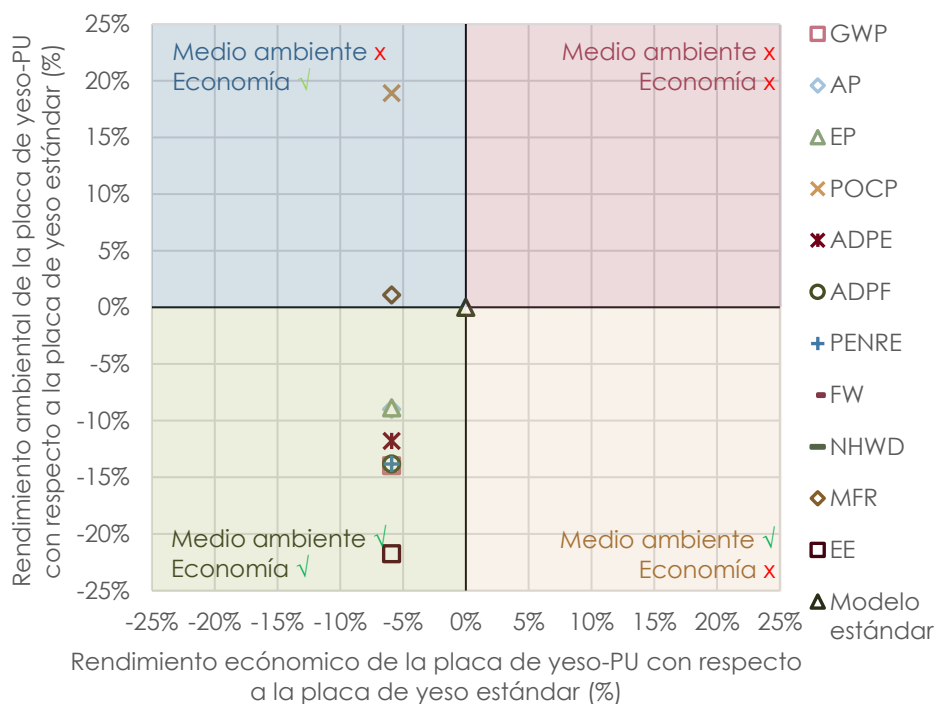


Figura 10.19. Indicadores de ecoeficiencia de la placa de yeso-PU con respecto a los resultados de la placa de yeso estándar

### 10.4. Conclusiones

En análisis ambiental de las mezclas de yeso con poliuretano reciclado de la fase experimental demuestra la viabilidad ecológica de su incorporación. Los nuevos procesos de trituración y transporte del residuo influyen de forma relevante en la huella ambiental del conjunto.

La evaluación de la huella ecológica del nuevo prefabricado de escayola con residuo de poliuretano fabricado a nivel industrial muestra una reducción en las emisiones de CO<sub>2</sub> y del consumo de energía del 14 % con respecto a la placa de yeso estándar. El nuevo modelo incluye un 5 % de material reciclado y emplea un 32 % y 25 % menos de yeso y agua, respectivamente. El producto innovador reduce su tiempo de secado en un 20 %, lo que resulta concluyente respecto al consumo de gas natural

y de energía eléctrica. La etapa de fabricación supone el mayor impacto en 9 de las 11 categorías analizadas.

La incorporación de poliuretano en prefabricados de yesos implica una reducción del coste de su ciclo de vida del 6 % con respecto al prefabricado de yeso estándar. La ampliación de la capacidad de producción del nuevo modelo en un 25 %, dado que precisa un menor tiempo de secado, resulta determinante. Por otro lado, la fase de fabricación supone dos tercios del coste total.

La evaluación de ecoeficiencia muestra un mejor rendimiento, de entorno al 7,5 %, del modelo innovador con respecto al modelo tradicional.

Los resultados obtenidos de la evaluación económica se utilizan en el plan de negocio que avala el lanzamiento del nuevo producto al mercado para su comercialización. El etiquetado ecológico proporciona un valor añadido al prefabricado, permitiendo su diferenciación en el mercado de otros materiales de construcción.

La patente desarrollada durante la fase experimental está en situación de explotación económica a través de una licencia entre la Universidad de Burgos y Yesyforma.

El producto innovador se encuentra en una fase de expansión comercial. Recientemente, se ha confeccionado un pedido procedente de Italia de 2.000 m<sup>2</sup> de placa de escayola con residuo de poliuretano.



**Economía circular.  
Valorización de  
las placas de  
yeso con residuo  
de poliuretano**

**11**



## CAPÍTULO 11. ECONOMÍA CIRCULAR. VALORIZACIÓN DE LAS PLACAS DE YESO CON RESIDUO DE POLIURETANO

Los productos elaborados a base de yeso, una vez alcanzada la etapa de final de vida, se clasifican con el código 17 08 02, según la lista europea de residuos<sup>177</sup>. Este desecho se engloba en lo que comúnmente se conoce como residuos de construcción y demolición (RCDs) (código 17), dado que principalmente se genera en este sector. Bajo el término de RCDs se incluyen otros materiales como hormigón, cerámicos, madera, vidrio, etc., y suponen más de un tercio del total de residuos generados en la Unión Europea según los datos recogidos en el año 2018<sup>178</sup>.

Entre los objetivos marcados por la UE para mejorar la gestión de los RCDs, se encuentran la reutilización, reciclaje y recuperación de los materiales no peligrosos en al menos un 70 % de su peso para el año 2020, su reducción y la promoción de la demolición selectiva que facilite la separación de los residuos de diferente naturaleza<sup>179</sup>. El porcentaje de RCDs recuperados en el año 2018 es del 88 %, cumpliendo con el propósito establecido<sup>180</sup>.

La cantidad de residuos a base de yeso presente en los RCDs es relevante, más aún con el incremento experimentado en la demanda de los productos prefabricados de yeso. Sólo el desecho procedente

---

<sup>177</sup> Decisión de la Comisión, de 18 de diciembre de 2014, por la que se modifica la Decisión 2000/532/CE, sobre la lista de residuos, de conformidad con la Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo (2014/955/UE) (DOUE L núm. 370/44, de 30 de diciembre de 2014).

<sup>178</sup> Eurostat. (2020). Energy, transport and environment statistics - 2020 edition. <https://doi.org/10.2785/463410>

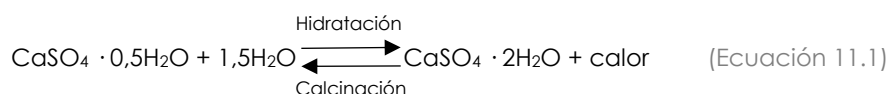
<sup>179</sup> Comisión Europea. Residuos de construcción y demolición. (2023, julio). [https://environment.ec.europa.eu/topics/waste-and-recycling/construction-and-demolition-waste\\_en](https://environment.ec.europa.eu/topics/waste-and-recycling/construction-and-demolition-waste_en)

<sup>180</sup> Statista. Tasa de recuperación de residuos de construcción y demolición (RCDs) de la Unión Europea (UE-27) en 2018, por países. (2023, julio). <https://www.statista.com/statistics/1316268/recovery-rate-of-construction-and-demolition-waste-eu-by-country/>

de placas de este mineral alcanza los 15 millones de toneladas al año a nivel mundial<sup>181</sup>.

El yeso se convierte en residuo fundamentalmente en tres etapas de su ciclo de vida: en la fase de fabricación, en la de instalación o en el final de vida, destacando esta último en volumen y cantidad por encima de las otras dos. En cuanto su gestión, la deposición en vertedero de este mineral no sólo supone una gran pérdida de recursos teniendo en cuenta su potencial de reciclaje, sino que además su vertido junto con otros fenómenos conlleva la formación de gases de sulfuro de hidrógeno con efectos adversos y nocivos para la salud humana<sup>182</sup>.

El conglomerante de yeso se obtiene a partir de la calcinación a 125-180 °C del mineral de yeso hidratado extraído de las canteras, eliminando el agua y dando lugar a yeso deshidratado ( $\text{CaSO}_4 \cdot 1,5\text{H}_2\text{O}$ ). La incorporación de agua en el conglomerante da lugar a yeso hidratado ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), revertiendo la reacción (Ecuación 11.1).



El carácter inalterable de la composición química del yeso, que únicamente sufre procesos de hidratación para su uso y calcinación para su reutilización, hace que su reciclaje sea de gran interés. La valorización del residuo de yeso fomenta la transformación de la economía lineal de este sector en un sistema circular de circuito cerrado, dado que, una vez alcanzado el final de vida del producto elaborado a base de yeso, éste puede volver a utilizarse en la fabricación del mismo previo tratamiento. En definitiva, el reciclaje de

<sup>181</sup> Ahmed, A., Ugai, K. & Kamei, T. (2011). Investigation of recycled gypsum in conjunction with waste plastic trays for ground improvement. *Construction and Building Materials*, 25(1), 208-217. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.036>

<sup>182</sup> Jiménez-Rivero, A. & García-Navarro, J. (2020). Management of end-of-life gypsum in a circular economy. *Advances in Construction and Demolition Waste Recycling: Management, Processing and Environmental Assessment*, 69-79. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819055-5.00005-X>

este desecho evita el agotamiento de los recursos minerales primarios y cumple con los principios jerárquicos establecidos en la Directiva 2008/98/CE para los residuos<sup>183</sup>.

Es preciso tener en cuenta el formato en el que se presenta el residuo, ya que el yeso en forma de pasta tiene una baja tasa de reciclaje dado que se encuentra adherido al soporte y, por tanto, en el proceso de demolición permanece unido y mezclado con todo tipo de materiales. Sin embargo, los prefabricados de yeso presentan un potencial de reciclaje altamente superior, siendo posible su desmontaje y separación del resto de residuos de obra.

Por otro lado, la composición química del residuo de yeso depende de la cantidad de agua empleada en la hidratación del mineral y formación de la pasta, es decir, la proporción en la que se presentan el dihidrato, el hemihidrato y la anhidrita puede diferir de unas muestras a otras. Este aspecto es relevante en el caso en el que se plantee su valorización sin un tratamiento previo de deshidratación o calcinación que homogenice la composición molecular del mismo.

Entre las diferentes investigaciones desarrolladas para la valorización del residuo de yeso, destaca el proyecto europeo "Gypsum to Gypsum" (GtoG) en el que se demuestra la posibilidad de incorporar en placas de yeso hasta un 30 % de yeso reciclado procedente de los residuos de construcción y demolición (RCDs). Las conclusiones hacen referencia a la necesidad de hacer partícipes del proceso a todas las partes involucradas, desde las empresas de construcción y/o demolición, a las plantas de reciclaje y a los fabricantes<sup>184</sup>. Estudios recientes evalúan positivamente la posibilidad de fabricar a nivel de laboratorio nuevas placas de yeso a partir del conglomerante y papel reciclados procedentes de otras placas<sup>185</sup>.

---

<sup>183</sup> Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de noviembre de 2008, sobre los residuos y por la que se derogan determinadas Directivas (DOUE L 312/3, de 22 de noviembre de 2008).

<sup>184</sup> Layman's report: gypsum to gypsum. (2015).

<sup>185</sup> Erbs, A., Nagalli, A., Carvalho, K. Q. de, Mazer, W., Moraes Erbs, M. de, Paz, D. H. F. & Lafayette, K. P. V. (2021). Development of plasterboard sheets exclusively from waste. *Journal of Building Engineering*, 44. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102524>

G. H. Rodrigo analiza el potencial de reciclaje del residuo de mezclas de yeso y concluye que la valorización en continuos e infinitos ciclos de este material no presenta cambios significativos en su composición. Se notifica una disminución del tiempo de inicio de fraguado como consecuencia de un menor tamaño de partícula a medida que aumentan los ciclos, así como, de su densidad<sup>186</sup>.

Respecto del rendimiento medioambiental, varios estudios coinciden en que la valorización y reciclaje de este mineral presenta un menor impacto en la naturaleza y en los ecosistemas con respecto a la utilización de yeso procedente de canteras (yeso natural) o de la desulfuración de gases de combustión (yeso FGD)<sup>187,188</sup>. Estos beneficios se ven aún más favorecidos cuanto más renovable es la energía empleada en el proceso de reciclaje y menores son las distancias de transporte<sup>189</sup>.

Otros estudios sugieren la incorporación de residuo de yeso en lugar de mineral de yeso en una proporción del 3-5 % en peso como aditivo para retrasar el inicio de fraguado de los cementos tipo portland<sup>190</sup>. El impacto ambiental resultante de la inclusión de yeso reciclado es ligeramente inferior al del yeso natural<sup>191</sup>.

---

<sup>186</sup> Geraldo, R. H., Pinheiro, S. M. M., Silva, J. S., Andrade, H. M. C., Dweck, J., Gonçalves, J. P. & Camarini, G. (2017). Gypsum plaster waste recycling: A potential environmental and industrial solution. *Journal of Cleaner Production*, 164, 288-300. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.188>

<sup>187</sup> Pedreño-Rojas, M. A., Fořt, J., Āerný, R. & Rubio-de-Hita, P. (2020). Life cycle assessment of natural and recycled gypsum production in the Spanish context. *Journal of Cleaner Production*, 253. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120056>

<sup>188</sup> Jiménez Rivero, A., Sathre, R. & García Navarro, J. (2016). Life cycle energy and material flow implications of gypsum plasterboard recycling in the European Union. *Resources, Conservation and Recycling*, 108, 171-181. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.01.014>

<sup>189</sup> Weimann, K., Adam, C., Buchert, M. & Sutter, J. (2021). Environmental evaluation of gypsum plasterboard recycling. *Minerals*, 11(2), 101. <https://doi.org/10.3390/min11020101>

<sup>190</sup> Chandara, C., Azizli, K. A. M., Ahmad, Z. A. & Sakai, E. (2009). Use of waste gypsum to replace natural gypsum as set retarders in portland cement. *Waste Management*, 29(5), 1675-1679. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.11.014>

<sup>191</sup> Suárez, S., Roca, X. & Gasso, S. (2016). Product-specific life cycle assessment of recycled gypsum as a replacement for natural gypsum in ordinary Portland

Actualmente, el sector nacional de los productos a base yeso dispone de diferentes sistemas de reciente implantación para la gestión de los residuos de yeso. En 2023, Pladur pone en marcha una planta de reciclaje de yeso en Gelsa (Zaragoza) destinada a gestionar los residuos rechazados en el proceso de fabricación. Una segunda fase, aun por desarrollar, plantea el tratamiento de los desechos procedentes de las obras de edificación actuando como gestor de residuos. Por otra parte, Knauf y Saint-Gobain Placo disponen de un servicio de recogida selectiva de los residuos de placas de yeso laminado pre-consumo y post-consumo para su reciclaje en otros procesos. Además, esta última empresa comercializa un novedoso modelo de placa de yeso conocido como “Placo Planet” que contiene un 28% de material reciclado<sup>192</sup>.

La valorización de placas de yeso que incorporan diferentes productos reciclados es un campo aun por investigar y desarrollar. L. Alameda en su tesis doctoral plantea el reciclaje de prefabricados de yeso laminado con residuo polimérico llevando a cabo la separación por tamizado y flotación de las materias primas originales y sometiendo al yeso a un proceso de cocción.

Con el fin de mejorar la circularidad de la placa de yeso con residuo de poliuretano desarrollada en el presente documento y fabricada a nivel industrial, se realiza un estudio experimental que contempla el reciclado de este producto, una vez alcanzado su fin de vida, en una nueva placa de yeso para techos suspendidos y desmontables.

Con el propósito de simplificar el proceso de reciclaje de este producto se plantea el tratamiento del residuo en todo su conjunto, es decir, sin separar las materias primas originales. Por lo que el nuevo desecho está constituido por yeso, residuo de poliuretano y fibra de vidrio.

Por otra parte, se plantea la utilización de este residuo sin previo proceso de calcinación con el propósito de mejorar su desempeño

---

cement: Application to the Spanish context. *Journal of Cleaner Production*, 117, 150-159. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.01.044>

<sup>192</sup> Saint-Gobain Placo Ibérica S.A. (2023, julio). <https://www.placo.es/Producto/placor-planet-13-1200#marketing-description>

ambiental. Estudios previos de mezclas de yeso, en las que se sustituye el 50 y 100 % del conglomerante por yeso reciclado sin tratamiento de calcinación previo, concluyen que éstas mejoran incluso el rendimiento mecánico de la muestra de referencia, presentan una menor densidad, precisan una mayor relación agua-conglomerante para obtener una buena trabajabilidad y son más respetuosas con el medioambiente<sup>193,194</sup>.

El principal objetivo es determinar una mezcla de yeso cuya dosificación incorpore la mayor cantidad de residuo de placa posible con prestaciones mecánicas adecuadas, buena trabajabilidad y consistencia plástica-líquida de forma que pueda replicarse a nivel industrial, al igual que la placa de yeso con residuo de poliuretano.

Esta etapa comienza con el procesado y trituración de las placas y recortes de yeso con residuo de poliuretano sobrantes del proceso de puesta en obra en la Universidad de Burgos (UBU). A continuación, se procede con la caracterización de las materias primas que participan en esta fase de la investigación. Por último, se describen el diseño de dosificaciones y el proceso de fabricación y se estudia el comportamiento de las nuevas mezclas de yeso en las que se incorpora el residuo de placa.

### 11.1. Procedimiento de reciclaje

La valorización del residuo de placa como materia prima de nuevos prefabricados de yeso implica el acondicionamiento previo del desecho. Este proceso consiste en la fragmentación manual del producto en trozos de pequeñas dimensiones para su introducción y trituración mecánica en el equipo RETSCH SM100. El producto obtenido constituye el pasa del tamiz de malla de 2,00 mm (Figura 11.1).

---

<sup>193</sup> Pedreño-Rojas, M. A., Flores-Colen, I., De Brito, J. & Rodríguez-Liñán, C. (2019). Influence of the heating process on the use of gypsum wastes in plasters: Mechanical, thermal and environmental analysis. *Journal of Cleaner Production*, 215, 444-457. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.053>

<sup>194</sup> Pedreño-Rojas, M. A., De Brito, J., Flores-Colen, I., Pereira, M. F. C. & Rubio-de-Hita, P. (2020). Influence of gypsum wastes on the workability of plasters: Heating process and microstructural analysis. *Journal of Building Engineering*, 29. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2019.101143>





Figura 11.1. Residuo de placa de yeso tras el proceso de fragmentación manual (izquierda) y de trituración (derecha)

Una vez obtenido el residuo en polvo, se separa la muestra en dos partes de forma que la primera se guarda directamente en un saco hermético y a la segunda se le somete a un proceso de secado adicional a 40 °C durante 48 horas en la estufa para posteriormente almacenarse en otro saco hermético.

La Tabla 11.1 recoge los parámetros de procesamiento del residuo de placa de yeso con residuo de poliuretano (PY), para lo cual se utiliza 1 Kg de producto.

Tipo de residuo	Tiempo de fragmentación (H/Kg)	Tiempo de triturado (H/Kg)	Energía consumida (KwH/Kg)
PY	0,0698	0,0263	0,0395

Tabla 11.1. Parámetros relativos al procesado del residuo de placa

El rendimiento del proceso de tratamiento del residuo es bueno en comparación con el de los residuos de poliuretano dada la densidad de ambos productos, es decir, 1 Kg de este producto supone un volumen mucho inferior a procesar en comparación con 1 Kg de poliuretano.

## 11.2. Caracterización de materias primas

Se incluye la descripción y el análisis de las materias primas empleadas en esta fase de investigación. Las mezclas de yeso con residuo de placa elaboradas incorporan escayola, residuo de placa, agua y tres tipos diferentes de aditivos, no de forma simultánea. A

excepción del residuo y de dos de los tres tipos de aditivo, el resto de materias primas son las mismas que se emplean en la fabricación de las mezclas y placas de yeso con residuo de poliuretano y, por lo tanto, la caracterización de dicha escayola, del agua y del aditivo fluidificante puede consultarse en el Capítulo 6 del presente documento.

En cuanto a los aditivos, se estudia la influencia debida a la incorporación del aditivo fluidificante empleado a lo largo de la investigación, de un aditivo retardante y de ácido cítrico que también se caracteriza por retrasar el tiempo fraguado de la pasta. Se alterna el uso de estos aditivos en función de las propiedades que se buscan, ninguna mezcla incluye más de uno al mismo tiempo.

A continuación, se incluye la caracterización del residuo de placa, materia prima singular y específica de esta fase, y del aditivo retardante y del ácido cítrico.

### 11.2.1. Residuo de placa de yeso con residuo de poliuretano

Las características principales de este producto previas a la fase de trituración se recogen y analizan en el Capítulo 6 del presente documento. La Tabla 11.2 incluye un resumen de las mismas.

<b>Dimensiones nominales</b>	593x593x15 mm ( $\pm 2$ mm)
<b>Peso por unidad</b>	2,50 Kg/ud ( $\pm 5$ %)
<b>Peso por superficie</b>	6,96 Kg/m <sup>2</sup> ( $\pm 5$ %)
<b>Densidad aparente</b>	664 Kg/m <sup>3</sup> ( $\pm 5$ %)
<b>Conductividad térmica</b>	0,22 W/mK
<b>Resistencia a flexión</b>	$\geq 6$ Kg
<b>Dureza superficial</b>	> 35 Shore C
<b>Análisis elemental (CHNS)</b>	C: 4,14%; H: 2,28%; N: 0,42%; S: 9,83%; Otros: 83,33%
<b>Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)</b>	√
<b>Tomografía Axial Computarizada (TAC)</b>	√
<b>Absorción de agua por inmersión</b>	92,0 %
<b>Termogravimetría (TGA)</b>	√
<b>Incremento de la temperatura del horno (<math>\Delta T</math>)</b>	15,80 °C
<b>Persistencia de la inflamación (<math>t_f</math>)</b>	-
<b>Pérdida de masa (<math>\Delta m</math>)</b>	26,73 %
<b>Potencial calorífico superior</b>	1,0477 MJ/Kg
<b>Reacción al fuego</b>	Clase A1
<b>Coefficiente de absorción acústica medio (<math>\alpha_m</math>)</b>	0,08

<b>Coefficiente de reducción del sonido (NRC)</b>	0,12
<b>Coefficiente de absorción sonora ponderado (<math>\alpha_w</math>)</b>	0,10

Tabla 11.2. Características principales del residuo de placa de yeso con residuo de poliuretano sin procesar

Las nuevas propiedades evaluadas sobre el residuo de placa de yeso con residuo de poliuretano se incluyen en la Tabla 11.3.

<b>Densidad aparente procesado (estado normal) (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	469,2
<b>Densidad aparente procesado (estado seco) (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	579,1
<b>Densidad real procesado (estado normal) (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	2.002,9

Tabla 11.3. Características del residuo de placa de yeso con residuo de poliuretano procesado

Se observa que la densidad aparente del residuo procesado seco es un 23 % superior a la del mismo material sin secar.

### 11.2.2. Aditivo

Los aditivos considerados en la fabricación de mezclas de yeso con residuo de placa son un aditivo retardante y ácido cítrico, ambos se caracterizan por retrasar el tiempo de fraguado de la pasta (Figura 11.2).



Figura 11.2. Aditivo retardante (izquierda) y ácido cítrico (derecha)

Se desconoce la composición del aditivo retardante. En cuando al según aditivo, éste se compone de ácido cítrico anhidro con una pureza mínima del 99,5 %.

### 11.3. Diseño de dosificaciones

Esta nueva línea de investigación pretende servirse de la experiencia previa recogida en el presente documento. En consecuencia, se analiza la valorización del residuo de placa en sustitución de conglomerante en mezclas de yeso, de la misma forma que se hace con el residuo poliuretano.

El plan de trabajo, así como las dosificaciones estudiadas, se modifica a medida que avanza la investigación en función de los resultados obtenidos y el objetivo principal establecido.

En un primer momento, se plantea la fabricación de una mezcla de referencia (Y0) y la dosificación Y1PY2, ambas con una relación agua-conglomerante de 0,95. Esta proporción incluye una parte de residuo de placa por cada parte de yeso (en volumen). No obstante, la pasta resultante presenta una mala trabajabilidad y comienza a coger calor, es decir, a fraguar antes de su vertido en los moldes. Se amasa de nuevo esta dosificación con una relación agua-conglomerante de 1,25, se observa que la trabajabilidad mejora ligeramente pero el tiempo de fraguado no es suficiente para poder manipular la mezcla.

Se decide aumentar la relación agua-conglomerante a 2 para conseguir una buena trabajabilidad en la mezcla y un tiempo de fraguado suficiente para poder elaborar las probetas. Con esta nueva relación se elaboran las mezclas Y1PY2, Y1,5PY2, Y1,75P2 e Y2PY2 variando la proporción de residuo. Durante la fabricación se aprecia una consistencia más líquida, no se produce el fraguado antes de rellenar los moldes y tiene lugar la liberación de agua superficial, especialmente en aquellas que incorporan mayores cantidades de residuo. Pasadas 48 horas de su elaboración ninguna de estas pastas endurece, incluso se produce una pérdida de volumen considerable, por lo que se descartan (Figura 11.3).

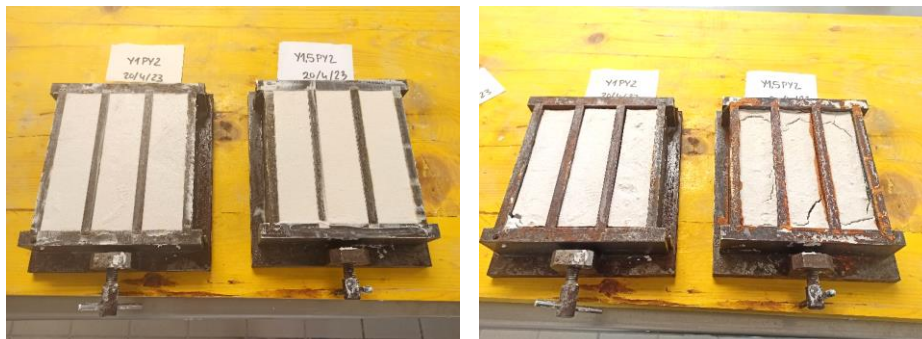


Figura 11.3. Probetas de yeso con residuo de placa a las 24 y 96 horas de su fabricación

En este punto, se decide recuperar la relación agua-conglomerante de 0,95 entendiendo que esta pérdida de dimensiones es consecuencia de la evaporación del líquido y reducir la cantidad de residuo de placa incorporado en la mezcla a 0,5 partes por cada parte de conglomerante. Se elaboran las dosificaciones Y0,5PY2 y Y0,5PYS2, esta última incorpora el residuo de placa previamente secado en la estufa. Ambas pastas presentan una baja trabajabilidad en estado fresco y un tiempo corto de fraguado, que se ve acentuado en la dosificación que incorpora el residuo previamente secado. Por otro lado, presentan una resistencia a flexión muy justa o escasa para los requerimientos mínimos a cumplir. La diferencia entre las mezclas realizadas con ambos tipos de residuo es mínima por lo que se decide continuar la investigación con el residuo PY sin secar, menos laborioso y perjudicial para el medio ambiente.

Con el propósito de mejorar la trabajabilidad, consistencia y tiempo de fraguado de la mezcla se estudia la incorporación de diferentes aditivos en la mezcla.

En primer lugar, se analizan varias mezclas de yeso con residuo de placa en las que se incluye el aditivo fluidificante utilizado en la elaboración de las placas de yeso-PU, dando lugar a las dosificaciones Y0,5PY2+0,5%A e Y0,5PY2+1%A. La proporción de aditivo incluida se estima en base a la experiencia previa y la dosificación se realiza en base a la cantidad de conglomerante introducido en la pasta. No obstante, con este producto no se consiguen mejoras a nivel de trabajabilidad ni en los tiempos de fraguado de la dosificación en

estado fresco, dando lugar a probetas de irregular morfología e incluso combadas una vez endurecidas (Figura 11.4).



Figura 11.4. Aspecto en estado endurecido de las dosificaciones  $Y0,5PY2+0,5\%A$  y  $Y0,5PY2+1\%A$

En vista de los resultados obtenidos y notificándose una baja trabajabilidad consecuencia de un temprano inicio del tiempo de fraguado, se decide fabricar varias mezclas introduciendo un aditivo retardador y ácido cítrico, de forma no simultánea. Se elaboran las dosificaciones  $Y0,5PY2+0,0125\%RT$  y  $Y0,5PY2+0,0125\%AC$ . En este caso, ambos aditivos se dosifican en función de la cantidad de agua incluida en la mezcla. Los resultados son positivos en ambos casos especialmente en para el tiempo de fraguado, si bien se decide continuar el estudio con el ácido cítrico ya que se aprecia una mejor consistencia en igualdad de cantidad de aditivo.

Se elaboran diferentes mezclas variando la cantidad de ácido cítrico con el objetivo de encontrar el equilibrio entre la consistencia, la trabajabilidad y las resistencias mecánicas, con este aditivo desaparece el problema de endurecimiento temprano. Se analizan las mezclas  $Y0,5PY2+0,02\%AC$ ,  $Y0,5PY2+0,03\%AC$ ,  $Y0,5PY2+0,05\%AC$  y  $Y0,5PY2+0,1\%AC$  que incorporan un 0,02%, 0,03%, 0,05% y 0,1% de aditivo respectivamente. A medida que aumenta la cantidad de ácido cítrico en la mezcla varía la consistencia hacia un estado más plástico-líquido.

En paralelo se decide evaluar el rendimiento del residuo en estado seco dado el estado avanzado de la investigación. Se analiza el comportamiento de las dosificaciones  $Y0,5PYS2+0,02\%AC$  y  $Y0,5PYS2+0,03\%AC$  que incorporan un 0,02% y 0,03% de aditivo

respectivamente, ya que son las proporciones que mejor funcionan con el residuo normal.

Por último, habiendo obtenido buenos resultados en relación con el objetivo marcado, se analiza la incorporación de mayor cantidad de residuo en la mezcla. Se estudian las dosificaciones Y1PY2+0,02%AC y Y1PY2+0,04%AC para el residuo normal y las mezclas Y1PYS2+0,03%AC y Y1PYS2+0,04%AC para el residuo seco.

La fase de diseño de dosificaciones y de investigación termina con la determinación de una mezcla que satisface el objetivo marcado, siendo esta la Y0,5PY2+0,03%AC.

#### **11.4. Fabricación**

La elaboración de todas las muestras objeto de estudio se lleva a cabo en los laboratorios de la Escuela Politécnica Superior de la Universidad de Burgos, en Burgos (España).

El acondicionamiento previo de las materias primas y el proceso de fabricación de las mezclas de yeso con residuo de placa son los mismos que los descritos en el apartado 5.1 del presente documento para las dosificaciones de yeso con residuo de poliuretano.

La preparación de las nuevas materias primas consiste exclusivamente en triturar, tamizar y se car parte del residuo de placa. Los nuevos aditivos considerados no precisan de ningún cuidado especial.

En este caso se analiza la incorporación de tres tipos diferentes de aditivos, uno de ellos se presenta el formato líquido y los otros dos son sólidos, no obstante, todos ellos se añaden o disuelven en el agua de la mezcla.

La Figura 11.5 incluye imágenes en detalle del proceso de fabricación y de las probetas una vez elaboradas.

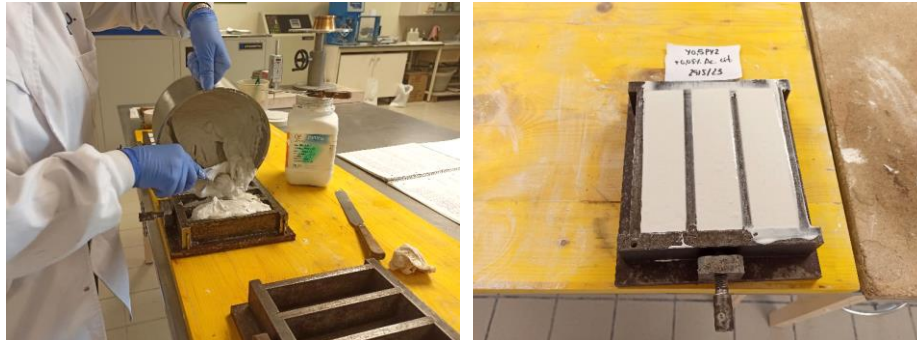


Figura 11.5. Fabricación de las mezclas de yeso con residuo de placa

## 11.5. Caracterización de mezclas de yeso con residuo de placa

Esta fase comprende el análisis de las propiedades físicas y mecánicas básicas de varias dosificaciones que orienten esta línea de investigación hacia una mezcla adecuada y funcional.

### 11.5.1. Caracterización física

El análisis de las propiedades físicas de las diferentes dosificaciones incluye el estudio de la densidad aparente en estado húmedo, la densidad aparente en esta endurecido a los 7 días de su fabricación y una valoración de la consistencia en estado fresco en base a la experiencia de amasado y fabricación de las probetas. Los resultados obtenidos de esta fase de caracterización física se incluyen en la Tabla 11.4.



Dosificación (( $\alpha/(Y+PY) = 0,95$ ))	Densidad aparente en estado húmedo (EH) (Kg/m <sup>3</sup> )	Densidad aparente en estado endurecido (EE) (Kg/m <sup>3</sup> )	Consistencia en estado fresco (EF)
Y0	1.413,00	893,00	buena
Y1,5B2+1%F+0,5%A	-	793,00	buena
Y0,5PY2	1.275,00	775,00	mala
Y0,5PYS2	1.260,00	765,00	mala
Y0,5PY2+0,5%A	1.310,00	793,00	mala
Y0,5PY2+1%A	1360,00	825,00	mala
Y0,5PY2+0,0125%RT	1.350,00	820,00	regular-mala
Y0,5PY2+0,0125%AC	1355,00	825,00	regular
Y0,5PY2+0,02%AC	1.377,00	827,00	regular
Y0,5PY2+0,03%AC	1.393,00	837,00	buena
Y0,5PY2+0,05%AC	1.377,00	833,00	buena
Y0,5PY2+0,1%AC	1.280,00	803,00	buena
Y0,5PYS2+0,02%AC	1.375,00	873,00	regular-mala
Y0,5PYS2+0,03%AC	1.390,00	833,00	regular-buena
Y1PY2+0,02%AC	1.353,00	797,00	regular-mala
Y1PY2+0,04%AC	1.377,00	810,00	buena
Y1PYS2+0,03%AC	1.357,00	797,00	regular-mala
Y1PYS2+0,04%AC	1.360,00	797,00	regular-buena

Tabla 11.4. Densidad aparente en estado húmedo y endurecido de las mezclas de yeso con residuo de placa

La mala consistencia y trabajabilidad de algunas mezclas en estado fresco provoca la distorsión de los valores relativos a la densidad

aparente, lo cual se debe a la dificultad en el relleno de los moldes y la correcta confección de las probetas.

Una buena trabajabilidad en estado fresco, entendida como tal una consistencia plástica-líquida, es requisito indispensable para la pasta a desarrollar. De la experiencia en la fase de elaboración de las mezclas se concluye que únicamente alcanzan esta propiedad las dosificaciones Y0,5PY2+0,03%AC, Y0,5PY2+0,05%AC, Y0,5PY2+0,1%AC e Y1PY2+0,04%AC.

Teniendo únicamente en cuenta estas dosificaciones, se observa que la incorporación de residuo de placa en las mezclas de yeso implica un descenso de la densidad aparente en estado endurecido de entre un 6 y un 10 % con respecto a la mezcla Y0. Las mezclas presentan menor densidad aparente cuanto mayor es la cantidad de ácido cítrico y de residuo de placa incluido. La densidad aparente en estado húmedo sigue la misma tendencia descrita. No obstante, los datos registrados son en todos los casos superiores a la densidad aparente de la mezcla Y1,5B2+1%F+0,5%A seleccionada en el Capítulo 7 para ser replicada a nivel industrial. La Figura 11.6 incluye la representación de estos resultados.

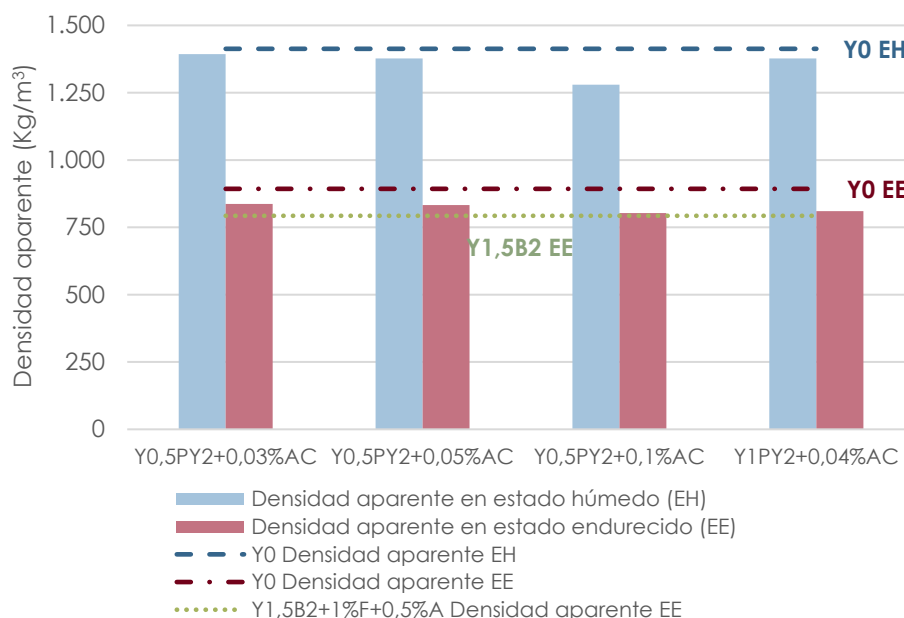


Figura 11.6. Comparativa de la densidad aparente en estado endurecido de las mezclas analizadas en la fase de valorización del residuo de placa

### 11.5.2. Caracterización mecánica

El desempeño a nivel mecánico de las diferentes mezclas se evalúa a través de su resistencia a flexión, resistencia a compresión y dureza shore C a 7 días. La Tabla 11.5 muestra los valores obtenidos.

Dosificación ((a/(Y+PY) = 0,95)	Resistencia a flexión (7 días) (N/mm <sup>2</sup> )	Resistencia a compresión (7 días) (N/mm <sup>2</sup> )	Dureza superficial (7 días) (Shore C)
Y0	2,04	5,41	59,03
Y1,5B2+1%F+0,5%A	2,18	4,45	55,30
Y0,5PY2	0,93	2,54	61,20
Y0,5PYS2	1,01	2,98	66,30
Y0,5PY2+0,5%A	1,41	3,28	65,13
Y0,5PY2+1%A	1,46	3,69	65,60
Y0,5PY2+0,0125%RT	1,15	2,31	55,60
Y0,5PY2+0,0125%AC	1,10	2,44	49,50
Y0,5PY2+0,02%AC	1,07	2,48	44,23
Y0,5PY2+0,03%AC	1,32	2,88	43,70
Y0,5PY2+0,05%AC	1,07	2,14	36,40
Y0,5PY2+0,1%AC	0,36	0,84	21,90
Y0,5PYS2+0,02%AC	1,14	2,82	44,85
Y0,5PYS2+0,03%AC	1,28	2,64	43,03
Y1PY2+0,02%AC	0,71	1,53	39,67
Y1PY2+0,04%AC	0,70	1,64	30,03
Y1PYS2+0,03%AC	0,81	1,68	34,00
Y1PYS2+0,04%AC	0,67	1,46	30,27

Tabla 11.5. Resistencias mecánicas de las mezclas de yeso con residuo de placa

De las mezclas previamente seleccionadas en razón de la trabajabilidad de la pasta, se observa que cuanto mayor es la cantidad de aditivo y de residuo de placa en la mezcla menor es su desempeño mecánico.

Las dosificaciones Y0,5PY2+0,03%AC e Y0,5PY2+0,05%AC, aunque presentan propiedades inferiores al material de referencia, cumplen con requisitos establecidos para las resistencias mecánicas. Sin embargo, las dosificaciones Y0,5PY2+0,1%AC e Y1PY2+0,04%AC no alcanzan ninguno de los requerimientos mínimos de resistencia a flexión y compresión (Figura 11.7).

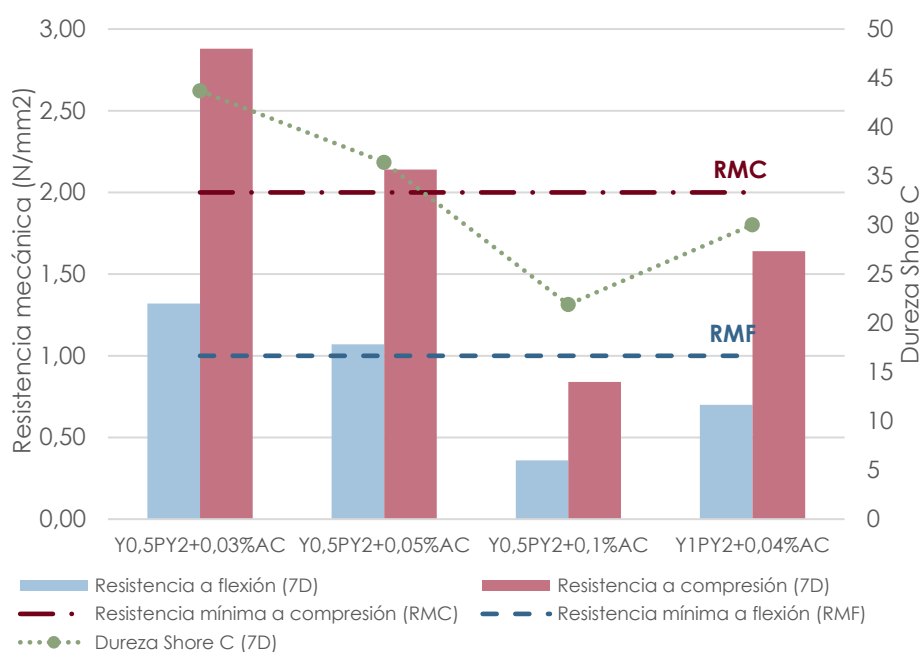


Figura 11.7. Comparativa de las propiedades mecánicas de las mezclas analizadas en la fase de valorización del residuo de placa

## 11.6. Conclusiones

La investigación iniciada pretende analizar las opciones de valorización del residuo de placa de yeso con residuo de poliuretano sin separar las materias primas originales ni someter al desecho a procesos de elevada temperatura que deshidraten el yeso con el propósito de evitar los impactos ambientales derivados de estas acciones.

Del estudio realizado se concluye que las dosificaciones Y0,5PY2+0,03%AC e Y0,5PY2+0,05%AC presentan una buena consistencia, mantienen cierta ligereza y cumplen con el desempeño mecánico requerido.

De la fase experimental a nivel de laboratorio se deduce la necesidad de utilizar un aditivo retardador de fraguado en este tipo de mezclas, ya que en caso contrario la trabajabilidad de la pasta en estado fresco se reduce considerablemente.

Las diferencias en la caracterización física y mecánica, notificadas por las mezclas que incluyen residuo de placa normal y residuo de placa previamente secado a 40 °C son mínimas, por lo que este proceso se asume innecesario.

Con respecto a una mayor incorporación de residuo de placa en las mezclas, la dosificación Y1PY2+0,04%AC presenta buenos resultados en el análisis realizado con excepción de las resistencias mecánicas. La incorporación de fibra de vidrio en la mezcla puede contribuir positivamente en este aspecto, no obstante, la trabajabilidad de la pasta puede verse afectada por lo que será preciso encontrar el equilibrio idóneo e incluso aumentar la proporción de ácido cítrico.



# Conclusiones

12





## CAPÍTULO 12. CONCLUSIONES

El camino emprendido hacia una construcción sostenible es unidireccional, sin posibilidad de retorno. El sector de la construcción tiene un impacto significativo en el medio ambiente, por lo tanto, es necesaria una transición hacia una economía circular que promueva el reaprovechamiento de recursos y minimice la generación de residuos.

A lo largo de la tesis doctoral se manifiesta la posibilidad de contribuir, desde la innovación y la investigación, al desarrollo de un parque inmobiliario más respetuoso con el medioambiente, en el que los criterios de sostenibilidad adquieren un papel fundamental.

En la presente investigación se ha demostrado el desarrollo a nivel industrial de un nuevo material de construcción sostenible: una placa de escayola con poliuretano reciclado para techos desmontables y suspendidos. Destaca su mejor rendimiento ambiental y económico con respecto a una placa de yeso estándar, así como su aptitud funcional en régimen de prestación.

A continuación, se recogen las conclusiones finales según los objetivos establecidos para cada etapa de la investigación.

Respecto de la **fase experimental**:

- Se analizan las propiedades principales de la escayola, los residuos de poliuretano, la fibra de vidrio, el aditivo y el agua.
- Los ocho tipos de residuos de poliuretano presentan una elevada porosidad, con excepción del tipo ES, y una pérdida de masa por combustión a partir de 150 °C. Su densidad es inferior a la del conglomerante de yeso, mientras que el tamaño de partícula observado es superior.
- Los residuos de poliuretano tipo P y BU presentan el menor consumo energético en el proceso de trituración necesario para su valorización.
- La fabricación de mezclas con poliuretano reciclado es posible. Para garantizar el cumplimiento de las prestaciones mecánicas es preciso incorporar fibra de vidrio a la mezcla. El aditivo fluidificante proporciona la consistencia líquida requerida a nivel industrial.

- La dosificación seleccionada para la fabricación de mezclas de yeso con diferentes residuos de poliuretano es Y1,5PU+1%F+0,5%A. La mezcla incorpora 1,5 partes de poliuretano reciclado por cada parte de yeso (en volumen), un 1% de fibra de vidrio, un 0,5 % de aditivo fluidificante, ambas con respecto al peso del conglomerante, y una relación a/c de 0,95.
- La incorporación de residuo de poliuretano en las mezclas de yeso provoca un descenso de la densidad, del rendimiento mecánico, de la conductividad térmica y del principio de fraguado. La distancia de transporte del residuo de poliuretano y el tiempo de procesado son factores determinantes en cuanto a su huella ambiental.
- La mezcla seleccionada para ser replicada a nivel industrial es Y1,5B2+1%F+0,5%A. La clasificación en el ensayo de reacción al fuego resulta determinante, la contaminación con partículas metálicas de algunos residuos poliméricos limita su capacidad de reacción frente al fuego.

Respecto de la **fase de industrialización:**

- La adaptación de la fábrica para la elaboración del nuevo producto se logra con la disposición de una zona específica para la recepción y tratamiento del residuo de poliuretano y con la instalación del nuevo sistema de dosificación de la mezcla seca de escayola y poliuretano reciclado.
- La transferencia del conocimiento desarrollado a nivel experimental y su implementación a nivel industrial se logra de forma exitosa con la fabricación en cadena del modelo innovador.
- El análisis de las propiedades de la placa de yeso con poliuretano reciclado revela resultados destacados, como una reducción del peso en un 28 % y una disminución de la conductividad térmica en un 15 %, en comparación con la placa de yeso estándar.
- La caracterización para elaborar la ficha técnica del producto y obtener el marcado CE, que permite la comercialización de productos en el espacio económico europeo.

Respecto de la **fase de puesta en obra:**

- La instalación y monitorización del nuevo modelo de placa en tres obras de diferente tipología ubicadas en Burgos (España), Vitoria (España) y Coventry (Reino Unido) evidencia su viabilidad funcional en régimen de prestación.

Respecto de la **fase de evaluación de la sostenibilidad:**

- El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) comparativo entre la placa de yeso estándar y la placa de yeso con poliuretano reciclado, determina que el mejor desempeño ambiental se produce en el modelo innovador. El nuevo prefabricado incorpora un 5 % de material reciclado, consume un 32 % y 25 % menos de yeso y agua, respectivamente, y reduce en un 14 % las emisiones de CO<sub>2</sub> y la demanda de energía.
- En base a los resultados del ACV se obtiene la afirmación ambiental autodeclarada (Etiquetado Ambiental Tipo II) del producto.
- El Análisis del Coste del Ciclo de Vida (CCV) comparativo concluye que el modelo ecológico presenta un mejor rendimiento financiero que el modelo de placa tradicional. El coste total de ciclo de vida se reduce en un 6 %.
- La Evaluación de Ecoeficiencia (EE) resulta en 7,5 puntos más favorable al nuevo prefabricado frente a la placa estándar.

Respecto de la **fase de evaluación de la circularidad de la investigación:**

- Se constata la posibilidad de fabricar una nueva mezcla de yeso valorizando residuos de placa de escayola con residuo de poliuretano. Las dosificaciones que presentan mejores prestaciones son Y0,5PY2+0,03%AC e Y0,5PY2+0,05%AC.
- Con el fin de mejorar la trabajabilidad y consistencia de la mezcla, ha sido preciso incorporar ácido cítrico (aditivo retardador de fraguado) en la pasta.

En conclusión, se puede afirmar de forma satisfactoria que se han logrado cumplir los objetivos principales y específicos establecidos al comienzo de la investigación.

## CONCLUSIONS

The path towards sustainable construction is unidirectional, with no way back. The construction sector has a significant impact on the environment, therefore a transition towards a circular economy that promotes the reuse of resources and minimises waste generation is necessary.

Throughout the doctoral thesis, it is manifested the possibility of contributing, through innovation and research, to the development of a more environmentally friendly building estate, in which sustainability criteria play a fundamental role.

The current research has demonstrated the industrial development of a new sustainable building material: a gypsum ceiling tile with recycled polyurethane for removable and suspended ceilings. It is remarkable for its better environmental and economic performance compared to a standard plasterboard, as well as for its functional suitability in performance mode.

The following, the final conclusions are shown according to the objectives established for each stage of the research.

Regarding the **experimental phase**:

- The main properties of gypsum, polyurethane wastes, glass fibre, additive and water are analysed.
- All eight types of polyurethane waste show high porosity, with the exception of the type ES, and a loss of mass by combustion from 150 °C. Their density is lower than that of the gypsum binder, while the particle size observed is higher.
- Polyurethane waste types P and BU have the lowest energy consumption in the shredding process necessary for their recovery.
- The manufacture of mixtures with recycled polyurethane is possible. To ensure compliance of the mechanical performance, glass fibre must be incorporated into the compound. The fluidising additive provides the liquid consistency required at industrial level.

- The dosage selected for the manufacture of gypsum mixtures with different polyurethane wastes is Y1,5PU+1%F+0,5%A. The mixture incorporates 1,5 parts of recycled polyurethane for each part of gypsum (by volume), 1 % glass fibre, 0,5 % fluidising additive, both with respect to the weight of the binder, and a w/c ratio of 0,95.
- The incorporation of polyurethane waste in gypsum pastes leads to a decrease in density, mechanical performance, thermal conductivity and setting time. The transport distance and the processing time of the polyurethane waste are decisive factors in terms of its environmental footprint.
- The mixture selected to be replicated at industrial level is Y1,5B2+1%F+0,5%A. The classification in the fire reaction test is decisive, the contamination with metallic particles of some polymeric wastes limits their reaction capacity to fire.

Regarding the **industrialisation phase**:

- The adaptation of the factory for the production of the new product is achieved with the provision of a specific area for the reception and treatment of polyurethane waste and with the installation of the new dosing system for the dry mixture of gypsum and recycled polyurethane.
- The transfer of the knowledge developed at the experimental level and its implementation at the industrial level is successfully achieved with the production of the innovative model.
- Analysis of the properties of gypsum ceiling tile with recycled polyurethane reveals outstanding results, such as a weight reduction of 28 % and a decrease of thermal conductivity by 15 % compared to standard gypsum ceiling tile.
- The characterisation is used to draw up the product data sheet and obtain the CE mark, which allows products to be commercialised in the european economic zone.

Regarding the **placement phase**:

- The installation and monitoring of the new ceiling tile model in three different types construction sites located in Burgos (Spain), Vitoria

(Spain) and Coventry (UK) demonstrates its functional viability in service.

Regarding the **sustainability assessment phase**:

- The comparative Life Cycle Assessment (LCA) between standard gypsum ceiling tile and gypsum ceiling tile with recycled polyurethane determines that the best environmental performance results in the innovative model. The new precast incorporates 5 % recycled material, consumes 32 % and 25 % less gypsum and water, respectively, and reduces CO<sub>2</sub> emissions and energy demand by 14 %.
- Based on the LCA results, the self-declared environmental statement (Environmental Labelling Type II) of the product is obtained.
- The comparative Life Cycle Cost (LCC) concludes that the green model has a better financial performance than the traditional ceiling tile model. The total life cycle cost is reduced by 6 %.
- The Eco-efficiency Assessment (EE) is 7,5 points more favourable to the new precast compared to the standard one.

Regarding the **assessment of the circularity of the research phase**:

- The possibility of manufacturing a new gypsum mixture by recovering ceiling tile waste with polyurethane waste has been demonstrated. The best performing dosages are Y0,5PY2+0,03%AC and Y0,5PY2+0,05%AC.
- In order to improve the workability and consistency of the mixture, it has been necessary to incorporate citric acid (setting retarder additive) into the paste.

In conclusion, it can be satisfactorily stated that the main and specific objectives set at the beginning of the research have been achieved.

# Futuras líneas de investigación

# 13





## CAPÍTULO 13. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

A lo largo del presente estudio surgen diversos aspectos que constituyen bifurcaciones de la investigación y cuyo análisis se descarta dada su particularidad. Este es el caso del residuo de poliuretano procedente de las presas de escala (ES), siendo el único de entre los estudiados que no pertenece al grupo de las espumas. El rendimiento mecánico de las mezclas que lo incorporan es muy bajo por lo que se desestima continuar con su análisis para la dosificación dada. No obstante, en la fase de caracterización de materias primas muestra propiedades diferentes e interesantes, como una elevada densidad real y aparente, una mínima absorción de agua, una aparente dureza superficial y baja porosidad. En este sentido podría resultar interesante su incorporación en firmes de carretera o su consideración como aislamiento acústico de ruido aéreo.

El procedimiento de trituración del residuo de poliuretano en la industria de fabricación de las placas resulta poco operativo, lo que limita el lanzamiento del producto al mercado. Uno de los problemas identificados es el volumen del residuo recepcionado que conlleva la creación de un puesto de trabajo específico para su corte previo a su introducción en la máquina de trituración. El segundo aspecto es la necesidad de dotar a la instalación de trituración de un espacio separado y aislado de la zona de producción para evitar la contaminación de los prefabricados. Por todo ello, se considera una línea de trabajo futura la implicación de las industrias generadoras del residuo en el proceso de acondicionamiento del poliuretano para su reutilización en sus propias instalaciones. Esta medida supondría una optimización del transporte del residuo y una mejora en la acogida y posible implantación de esta investigación en las instalaciones de otros fabricantes de prefabricados.

La evaluación de la sostenibilidad que se realiza sobre la placa de yeso con residuo de poliuretano fabricada a nivel industrial contempla los aspectos económicos y medioambientales. Podría resultar interesante completar este estudio con el análisis del aspecto social, tercer pilar del desarrollo sostenible, aplicando la metodología del análisis social de ciclo de vida (ASCV).

Por otro lado, el nuevo producto desarrollado constituye una placa de yeso para techos suspendidos y desmontables cuya separación, una

vez terminado su ciclo de vida o el del edificio en el que se instala, es totalmente factible. En consecuencia, el desarrollo del estudio iniciado para el reciclaje de este nuevo prefabricado (Capítulo 10) constituye otra futura línea de trabajo. El objetivo prioritario consiste en lograr una exitosa transformación del modelo de economía lineal de este producto en un proceso circular.

La investigación desarrollada puede aplicar en futuras vías de estudio a productos como placas acústicas de escayola, placas de cemento, entre otros. Estos materiales son ampliamente usados en el sector de la construcción, carecen de consideraciones ecológicas y comparten similitudes con la placa de techo desmontable.

La placa de yeso para techos desmontables comparte ciertas similitudes y varias diferencias con la placa de yeso para revestimientos continuos verticales u horizontales. Es por ello que se considera una futura línea de investigación la replicabilidad de los resultados obtenidos en la presente investigación en la elaboración de placas de yeso laminado. En el año 2019, se fabrican en Europa 1.300 millones de metros cuadrados de placas de yeso laminado frente a los 3,5 millones de la industria de placas de escayola para techos. En consecuencia, potencial de repercusión de esta nueva línea de estudio es muy elevado al igual que los beneficios medioambientales de su desarrollo, dadas las consideraciones ecológicas del proyecto.





## REFERENCIAS

- Aguas de Burgos. (2021). Informe Analítico.
- Ahmed, A., Ugai, K. & Kamei, T. (2011). Investigation of recycled gypsum in conjunction with waste plastic trays for ground improvement. *Construction and Building Materials*, 25(1), 208-217. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.036>
- Alameda L. (2015). Placas de yeso laminado aligeradas con residuos poliméricos reforzadas con fibras de polipropileno. Fabricación y puesta en obra. Tesis Doctoral, Universidad de Burgos.
- Alameda Cuenca-Romero, L., Arroyo, R., Alonso, Á., Gutiérrez-González, S., & Calderón, V. (2022). Characterization properties and fire behaviour of cement blocks with recycled polyurethane roof wastes. *Journal of Building Engineering*, 50. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104075>
- Alameda, L., Calderón, V., Gadea, J., & Gutiérrez-González, S. (2015). Reciclado de placas de yeso laminado aligeradas con residuos de poliuretano = Recycling of gypsum plasterboard lightened with polyurethane waste. *Anales de Edificación*, 1(1), 33. <https://doi.org/10.20868/ade.2015.3037>
- Alameda, L., Calderón, V., Junco, C., Rodríguez, A., Gadea, J., & Gutiérrez-González, S. (2016). Characterization of gypsum plasterboard with polyurethane foam waste reinforced with polypropylene fibers. *Materiales de Construcción*, 66(324). <https://doi.org/10.3989/mc.2016.06015>
- Arroyo R. (2017). Addition of new polymer-based and mineral-based fillers in mortars. Influence of polyurethane and afwillite on the microstructure and final properties. Tesis Doctoral, Universidad de Burgos.
- Asociación Española de Normalización (AENOR). (1998). 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.

- Asociación Española de Normalización (AENOR). (2001). UNE-EN 12664 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 secos y húmedos de baja y media resistencia térmica.
- Asociación Española de Normalización (AENOR). (2002). UNE-EN 12457-2 Caracterización de residuos. Lixiviación. Ensayo de conformidad para la lixiviación de residuos granulares y lodos. Parte 2: Ensayo por lotes de una etapa para una relación líquido-sólido de 10 l/kg para materiales con un tamaño de partícula inferior a 4 mm (con o sin reducción de tamaño).
- Asociación Española de Normalización (AENOR). (2002). UNE-EN 12667 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.
- Asociación Española de Normalización (AENOR). (2003). UNE-EN 1015-18 Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 18: Determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad del mortero endurecido.
- Asociación Española de Normalización (AENOR). (2004). UNE-EN ISO 354 Acústica. Medición de la absorción acústica en una cámara reverberante (ISO 354:2003).
- Asociación Española de Normalización (AENOR). (2005). UNE-EN 1015-19:1999/A1 Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 19: Determinación de la permeabilidad al vapor de agua de los morteros endurecidos de revoco y enlucido.
- Asociación Española de Normalización (AENOR). (2006). UNE-EN 1936 Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la densidad real y aparente y de la porosidad abierta y total.
- Asociación Española de Normalización (AENOR). (2006). UNE-EN ISO 14040 Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Principios y marco de referencia (ISO 14040:2006).

- Asociación Española de Normalización (AENOR). (2006). UNE-EN ISO 14044 Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Requisitos y directrices (ISO 14044:2006).
- Asociación Española de Normalización (AENOR). (2007). UNE-EN 14246 Placas de escayola para techos suspendidos. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo.
- Asociación Española de Normalización (AENOR). (2007). UNE-EN ISO 10456 Materiales y productos de construcción. Propiedades higrotérmicas. Valores tabulados de diseño y procedimientos para la determinación de los valores térmicos declarados y de diseño (ISO 10456:2007).
- Asociación Española de Normalización (AENOR). (2008). UNE-EN 13279-1 Yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción. Parte 1: Definiciones y especificaciones.
- Asociación Española de Normalización (AENOR). (2008). UNE-EN 13755 Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la absorción de agua a presión atmosférica.
- Asociación Española de Normalización (AENOR). (2009). UNE-EN 13501-1:2007+A1 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.
- Asociación Española de Normalización (AENOR). (2010). UNE-EN 520:2005+A1 Placas de yeso laminado. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo.
- Asociación Española de Normalización (AENOR). (2010). UNE-EN ISO 1182 Ensayos de reacción al fuego de productos. Ensayo de no combustibilidad (ISO 1182:2010).
- Asociación Española de Normalización (AENOR). (2010). UNE-EN ISO 14025 Etiquetas y declaraciones ambientales. Declaraciones ambientales tipo III. Principios y procedimientos (ISO 14025:2006).

- Asociación Española de Normalización (AENOR). (2010). UNE-EN ISO 1716 Ensayos de reacción al fuego de productos. Determinación del calor bruto de combustión (Valor calorífico) (ISO 1716:2010).
- Asociación Española de Normalización (AENOR). (2012). UNE-EN ISO 14045 Gestión ambiental. Evaluación de la ecoeficiencia del sistema del producto. Principios, requisitos y directrices (ISO 14045:2012).
- Asociación Española de Normalización (AENOR). (2014). UNE 102042 Yesos y escayolas de construcción. Otros métodos de ensayo.
- Asociación Española de Normalización (AENOR). (2014). UNE-EN 13279-2 Yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción. Parte 2: Métodos de ensayo.
- Asociación Española de Normalización (AENOR). (2015). UNE-EN ISO 12571 Prestaciones higrotérmicas de los productos y materiales para edificación. Determinación de las propiedades de sorción higroscópica (ISO 12571:2013).
- Asociación Española de Normalización (AENOR). (2017). UNE-EN 60300-3-3 Gestión de la confiabilidad. Parte 3-3: Guía de aplicación. Cálculo del coste del ciclo de vida.
- Asociación Española de Normalización (AENOR). (2017). UNE-EN ISO 14021 Etiquetas y declaraciones ambientales. Afirmaciones ambientales autodeclaradas (Etiquetado ambiental tipo II) (ISO 14021:2016).
- Asociación Española de Normalización (AENOR). (2018). UNE-EN ISO 12572 Prestaciones higrotérmicas de los productos y materiales para edificación. Determinación de las propiedades de transmisión de vapor de agua. Método del vaso (ISO 12572:2016).
- Asociación Española de Normalización (AENOR). (2018). UNE-EN ISO 14024 Etiquetas y declaraciones ambientales. Etiquetado ambiental tipo I. Principios y procedimientos (ISO 14024:2018).
- Asociación Española de Normalización (AENOR). (2018). UNE-EN ISO 14044:2006/A1 Gestión ambiental. Evaluación del ciclo de vida. Requisitos y directrices. Modificación 1 (ISO 14044:2006/Amd 1:2017).



- Asociación Española de Normalización (AENOR). (2018). UNE-EN ISO 2555 Plásticos. Resinas en estado líquido o en emulsión o dispersión. Determinación de la viscosidad aparente por el método del viscosímetro rotacional de un solo cilindro (ISO 2555:2018).
- Asociación Española de Normalización (AENOR). (2019). UNE-EN 13501-1 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.
- Asociación Española de Normalización (AENOR). (2021). UNE-EN ISO 1182 Ensayos de reacción al fuego de productos. Ensayo de no combustibilidad (ISO 1182:2020).
- Asociación Española de Normalización (AENOR). (2021). UNE-EN ISO 14040:2006/A1 Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Principios y marco de referencia. Modificación 1 (ISO 14040:2006/Amd 1:2020).
- Asociación Española de Normalización (AENOR). (2021). UNE-EN ISO 1716 Ensayos de reacción al fuego de productos. Determinación del poder calorífico superior (Valor calorífico) (ISO 1716:2018).
- Asociación Española de Normalización (AENOR). (2021). UNE-EN ISO 29470 Productos aislantes térmicos para aplicaciones en la edificación. Determinación de la densidad aparente (ISO 29470:2020).
- Attanasio, A., Largo, A., Alvarez, I. L., Sonzogni, F., & Balaceanu, L. (2015). Sustainable aggregates from secondary materials for innovative lightweight concrete products. *Heron*, 60(1-2), 5-25.
- Becker, Y., Méndez, M. P., & Rodríguez, Y. (2001). Polymer modified asphalt | Asfaltos modificados con polímeros. *Vision Tecnológica*, 9(1), 39-50.
- Ben Fraj, A., Kismi, M., & Mounanga, P. (2010). Valorization of coarse rigid polyurethane foam waste in lightweight aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 24(6), 1069-1077. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2009.11.010>

- Bertelsen, I. M. G., & Ottosen, L. M. (2021). Recycling of Waste Polyethylene Fishing Nets as Fibre Reinforcement in Gypsum-based Materials. *Fibers and Polymers*. <https://doi.org/10.1007/s12221-021-9760-3>
- Briga-Sá, A., Neiva, V., Leitão, D., Miranda, T., & Cristelo, N. (2021). Thermal Performance of Compressed Blocks Made from Construction and Polyurethane Foam Waste. In *RILEM Bookseries* (Vol. 35, pp. 225–236). [https://doi.org/10.1007/978-3-030-76543-9\\_21](https://doi.org/10.1007/978-3-030-76543-9_21)
- Briones-Llorente, R., Calderón, V., Gutiérrez-González, S., Montero, E., & Rodríguez, Á. (2019). Testing of the integrated energy behavior of sustainable improved mortar panels with recycled additives by means of energy simulation. *Sustainability* (Switzerland), 11(11). <https://doi.org/10.3390/su11113117>
- Calderón, V., Gutiérrez-González, S., Gadea, J., Rodríguez, Á., & Junco, C. (2018). Construction Applications of Polyurethane Foam Wastes. *Recycling of Polyurethane Foams*, 115–125. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-51133-9.00010-3>
- Chandara, C., Azizi, K. A. M., Ahmad, Z. A. & Sakai, E. (2009). Use of waste gypsum to replace natural gypsum as set retarders in portland cement. *Waste Management*, 29(5), 1675-1679. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.11.014>
- Chen, B., Dong, F., Yu, X., & Zheng, C. (2021). Evaluation of properties and micro-characteristics of waste Polyurethane/Styrene-butadiene-styrene composite modified asphalt. *Polymers*, 13(14). <https://doi.org/10.3390/polym13142249>
- Ciroth, A., Hildenbrand, J. & Steen, B. (2015). Life cycle costing. *Sustainability Assessment of Renewables-Based Products: Methods and Case Studies*, 215-228.
- Colorizer. (2023, marzo). <https://colorizer.org/>
- Comisión Europea. (2020). Circular Economy - Principles for buildings design.
- Comisión Europea. (2022, enero). Construction Sector. [https://ec.europa.eu/growth/sectors/construction\\_en](https://ec.europa.eu/growth/sectors/construction_en)

- Comisión Europea. (2022, febrero). European Green Deal: Commission proposes transformation of EU economy and society to meet climate ambitions. [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip\\_21\\_3541](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_21_3541)
- Comisión Europea. (2022, septiembre). Plastics. [https://environment.ec.europa.eu/topics/plastics\\_en](https://environment.ec.europa.eu/topics/plastics_en)
- Comisión Europea. (2022, diciembre). Plastics strategy. [https://environment.ec.europa.eu/strategy/plastics-strategy\\_en](https://environment.ec.europa.eu/strategy/plastics-strategy_en)
- Comisión Europea. (2023). Transition pathway for construction.
- Comisión Europea. (2023, julio). Buildings and construction. [https://single-market-economy.ec.europa.eu/industry/sustainability/buildings-and-construction\\_en](https://single-market-economy.ec.europa.eu/industry/sustainability/buildings-and-construction_en)
- Comisión Europea. (2023, julio). Circular Plastics Alliance. [https://single-market-economy.ec.europa.eu/industry/strategy/industrial-alliances/circular-plastics-alliance\\_en](https://single-market-economy.ec.europa.eu/industry/strategy/industrial-alliances/circular-plastics-alliance_en)
- Comisión Europea. (2023, julio). Climate Action - 2050 long-term strategy. [https://climate.ec.europa.eu/eu-action/climate-strategies-targets/2050-long-term-strategy\\_en](https://climate.ec.europa.eu/eu-action/climate-strategies-targets/2050-long-term-strategy_en)
- Comisión Europea. (2023, julio). Climate Action – Causes of climate change. [https://climate.ec.europa.eu/climate-change/causes-climate-change\\_en](https://climate.ec.europa.eu/climate-change/causes-climate-change_en)
- Comisión Europea. (2023, julio). Energy – Renovation wave. [https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/renovation-wave\\_en](https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/renovation-wave_en)
- Comisión Europea. (2023, julio). Environment – Circular Economy Action Plan. [https://environment.ec.europa.eu/strategy/circular-economy-action-plan\\_en](https://environment.ec.europa.eu/strategy/circular-economy-action-plan_en)
- Comisión Europea. (2023, julio). European Platform on LCA | EPLCA - EN 15804 reference package. <https://eplca.jrc.ec.europa.eu/LCDN/EN15804.xhtml>

- Comisión Europea. (2023, julio). Objectives of the European construction observatory. [https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/construction/observatory/objectives\\_en](https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/construction/observatory/objectives_en)
- Comisión Europea. (2023, julio). Residuos de construcción y demolición. [https://environment.ec.europa.eu/topics/waste-and-recycling/construction-and-demolition-waste\\_en](https://environment.ec.europa.eu/topics/waste-and-recycling/construction-and-demolition-waste_en)
- Comisión Europea. (2023, julio). Sustainability. [https://single-market-economy.ec.europa.eu/industry/sustainability\\_en](https://single-market-economy.ec.europa.eu/industry/sustainability_en)
- Comisión Europea. (2023, julio). Sustainable Industry Low Carbon (SILC). [https://single-market-economy.ec.europa.eu/industry/sustainability/climate-neutral-economy/sustainable-industry-low-carbon-silc\\_en](https://single-market-economy.ec.europa.eu/industry/sustainability/climate-neutral-economy/sustainable-industry-low-carbon-silc_en)
- Cong, L., Yang, F., Guo, G., Ren, M., Shi, J., & Tan, L. (2019). The use of polyurethane for asphalt pavement engineering applications: A state-of-the-art review. *Construction and Building Materials*, 225, 1012–1025. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2019.07.213>
- Corinaldesi, V., Mazzoli, A., & Moriconi, G. (2011). Mechanical behaviour and thermal conductivity of mortars containing waste rubber particles. *Materials & Design*, 32(3), 1646–1650. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.10.013>
- de Oliveira, K. A., Oliveira, C. A. B., & Molina, J. C. (2021). Lightweight recycled gypsum with residues of expanded polystyrene and cellulose fiber to improve thermal properties of gypsum. *Materiales de Construcción*, 71(341). <https://doi.org/10.3989/MC.2021.07520>
- De Villanueva, L. (2004). Evolución histórica de la construcción con yeso. *Informes de La Construcción*, 56(493), 5–12.
- Decisión de la Comisión, de 18 de diciembre de 2014, por la que se modifica la Decisión 2000/532/CE, sobre la lista de residuos, de conformidad con la Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo (2014/955/UE) (DOUE L núm. 370/44, de 30 de diciembre de 2014).

- del Río Merino, M., Santa Cruz Astorqui, J., Villoria Sáez, P., Santos Jiménez, R., & González Cortina, M. (2018). Eco plaster mortars with addition of waste for high hardness coatings. *Construction and Building Materials*, 158, 649–656. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2017.10.037>
- del Río Merino, M., Villoria Sáez, P., Longobardi, I., Santa Cruz Astorqui, J., & Porras-Amores, C. (2019). Redesigning lightweight gypsum with mixes of polystyrene waste from construction and demolition waste. *Journal of Cleaner Production*, 220, 144–151. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2019.02.132>
- Dima, C., Bădănoiu, A., & Nicoară, A. I. (2020). Properties of cement-based composites with chopped electrical cables and polyurethane wastes. *UPB Scientific Bulletin, Series B: Chemistry and Materials Science*, 82(4 Series A), 63–72.
- Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de noviembre de 2008, sobre los residuos y por la que se derogan determinadas Directivas (DOUE L 312/3, de 22 de noviembre de 2008).
- Documentación del proyecto Life-Repolyuse. (2023, junio). <https://life-repolyuse.com/documentacion-del-proyecto>
- Doleželová, M., Scheinherrová, L., Krejšová, J., Keppert, M., Černý, R., & Vimmrová, A. (2021). Investigation of gypsum composites with different lightweight fillers. *Construction and Building Materials*, 297, 123791. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123791>
- Ehrenfeld, J. R. (2005). Eco-efficiency: Philosophy, theory, and tools. *Journal of Industrial Ecology*, 9(4), 6-8. <https://doi.org/10.1162/108819805775248070>
- Ellen Macarthur Foundation. (2016). *Rethinking the future of plastics 2016*.
- Erbs, A., Nagalli, A., Carvalho, K. Q. de, Mazer, W., Moraes Erbs, M. de, Paz, D. H. F. & Lafayette, K. P. V. (2021). Development of plasterboard sheets exclusively from waste. *Journal of Building Engineering*, 44. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102524>

- Eurogypsum (2023, julio). Gypsum all around. <https://eurogypsum.org/the-gypsum-industry/use-of-gypsum-in-buildings/>
- Eurostat. (2020). Energy, transport and environment statistics - 2020 edition. <https://doi.org/10.2785/463410>
- Eurostat. (2023, julio). Waste Statistics. [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Waste\\_statistics#Total\\_waste\\_generation](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Waste_statistics#Total_waste_generation)
- Ferreira, C., de Freitas, V. P., & Delgado, J. M. P. Q. (2020). The Influence of Hygroscopic Materials on the Fluctuation of Relative Humidity in Museums Located in Historical Buildings. *Studies in Conservation*, 65(3), 127-141. <https://doi.org/10.1080/00393630.2019.1638666>
- Geraldo, R. H., Pinheiro, S. M. M., Silva, J. S., Andrade, H. M. C., Dweck, J., Gonçalves, J. P. & Camarini, G. (2017). Gypsum plaster waste recycling: A potential environmental and industrial solution. *Journal of Cleaner Production*, 164, 288-300. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.188>
- Gómez-Rojo, R., Alameda, L., Rodríguez, Á., Calderón, V., & Gutiérrez-González, S. (2019). Characterization of Polyurethane Foam Waste for Reuse in Eco-Efficient Building Materials. *Polymers*, 11(2), 359. <https://doi.org/10.3390/polym11020359>
- González Díaz, E., Jaizme Vega, E., Jubera Pérez, J., Torres Betancort, M. E., & Sánchez Fajardo, V. (2019). Incorporation of the polyurethane pellet waste for the improvement of the thermal insulation of nonstructural concrete blocks. *Dyna (Spain)*, 94(4). <https://doi.org/10.6036/8985>
- Gregorová, V., Štefunková, Z., & Ledererová, M. (2020). Experimental Study of the Recycled plastic aggregate lightweight composites based on different kinds of binder. *Key Engineering Materials*, 868, 32–38. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.868.32>
- Gutiérrez-González, S., Alonso, M. M., Gadea, J., Rodríguez, A., & Calderón, V. (2013). Rheological behaviour of gypsum plaster pastes with polyamide powder wastes. *Construction and Building*

- Materials, 38, 407–412.  
<https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2012.08.034>
- Gutiérrez-González, S., Calderón, V., Rodríguez, A., Gadea, J., Junco, C., & Santamaría-Vicario, I. (2017). Characterization of Hot Bituminous-Asphalt Mixtures with Recycled Polyurethane Foam. *The Open Construction and Building Technology Journal*, 11(1), 343–349.  
<https://doi.org/10.2174/1874836801711010343>
- Gutiérrez-González, S., Gadea, J., Rodríguez, A., Blanco-Varela, M. T., & Calderón, V. (2012). Compatibility between gypsum and polyamide powder waste to produce lightweight plaster with enhanced thermal properties. *Construction and Building Materials*, 34, 179–185.  
<https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2012.02.061>
- Gutiérrez-González, S., Gadea, J., Rodríguez, A., Junco, C., & Calderón, V. (2012). Lightweight plaster materials with enhanced thermal properties made with polyurethane foam wastes. *Construction and Building Materials*, 28(1), 653–658.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.10.055>
- Hannah Ritchie, & Max Roser. (2018). Plastic Pollution.  
<https://ourworldindata.org/plastic-pollution#citation>
- Heinrich Böll Foundation. (2019). *Plastic atlas 2019: Facts and figures about the world of synthetic polymers (second edition)*. Heinrich Böll Foundation.
- Hita, P. R. de, Pérez-Gálvez, F., Morales-Conde, M. J., & Pedreño-Rojas, M. A. (2018). Reuse of plastic waste of mixed polypropylene as aggregate in mortars for the manufacture of pieces for restoring jack arch floors with timber beams. *Journal of Cleaner Production*, 198, 1515-1525. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2018.07.065>
- Hunkeler, D., Lichtenvort, K. & Rebitzer, G. (2008). *Environmental Life Cycle Costing (1st Edition)*. Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC).
- Idealista. (2023, julio). El sector constructor, de ser uno de los reyes de la economía a tocar mínimos históricos.  
<https://www.idealista.com/news/finanzas/economia/2022/09/15/7>

[99095-el-peso-de-la-construccion-en-la-economia-espanola-toca-minimos-historicos](#)

- International Organisation for Standardisation (ISO). (2017). ISO 15686-5 Buildings and constructed assets. Service life planning. Part 5: Life-cycle costing.
- Jang, M., Hong, T. & Ji, C. (2015). Hybrid LCA model for assessing the embodied environmental impacts of buildings in South Korea. *Environmental Impact Assessment Review*, 50, 143-155. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2014.09.010>
- Jiménez Rivero, A., Sathre, R. & García Navarro, J. (2016). Life cycle energy and material flow implications of gypsum plasterboard recycling in the European Union. *Resources, Conservation and Recycling*, 108, 171-181. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.01.014>
- Jiménez-Rivero, A. & García-Navarro, J. (2020). Management of end-of-life gypsum in a circular economy. *Advances in Construction and Demolition Waste Recycling: Management, Processing and Environmental Assessment*, 69-79. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819055-5.00005-X>
- Jiménez Rivero, A., De Guzmán Báez, A., & Navarro, J. G. (2014). New composite gypsum plaster – ground waste rubber coming from pipe foam insulation. *Construction and Building Materials*, 55, 146–152. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2014.01.027>
- Johansen, M. R., Christensen, T. B., Ramos, T. M., & Syberg, K. (2022). A review of the plastic value chain from a circular economy perspective. In *Journal of Environmental Management* (Vol. 302). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113975>
- Junco, C. (2012). Morteros aligerados con residuos de espumas rígidas de poliuretano. Obtención, caracterización y puesta en obra. Tesis Doctoral, Universidad de Burgos.
- Junco, C., Gadea, J., Rodríguez, A., Gutiérrez-González, S., & Calderón, V. (2012). Durability of lightweight masonry mortars made with white recycled polyurethane foam. *Cement and Concrete Composites*, 34(10), 1174–1179. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2012.07.006>



- Junco, C., Rodríguez, A., Calderón, V., Muñoz-Rupérez, C., & Gutiérrez-González, S. (2018). Fatigue durability test of mortars incorporating polyurethane foam wastes. *Construction and Building Materials*, 190, 373–381. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.09.161>
- Kemona, A., & Piotrowska, M. (2020). Polyurethane Recycling and Disposal: Methods and Prospects. *Polymers*, 12(8), 1752. <https://doi.org/10.3390/polym12081752>
- Kismi, M., & Mounanga, P. (2012). Comparison of short and long-term performances of lightweight aggregate mortars made with polyurethane foam waste and expanded polystyrene beads. Comparaison performantielle à court et à long termes de mortiers légers à base de déchets de mousse de polyuréthane rigide et de billes de polystyrène expansé. EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20120201019>
- Kloepffer, W. (2008). Life cycle sustainability assessment of products. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 13(2), 89-95. <https://doi.org/10.1065/lca2008.02.376>
- Layman's report: gypsum to gypsum. (2015).
- Ley 22/2011, de 28 de julio, de Residuos y suelos contaminados (BOE núm. 181, de 29 de julio de 2011).
- Life-Repolyuse. (2022, enero). <https://life-repolyuse.com/>
- López-Zaldívar, O., Lozano-Díez, R., Herrero del Cura, S., Mayor-Lobo, P., & Hernández-Olivares, F. (2017). Effects of water absorption on the microstructure of plaster with end-of-life fire rubber mortars. *Construction and Building Materials*, 150, 558–567. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2017.06.014>
- Lozano-Díez, R. V., López-Zaldívar, O., Herrero-Del-Cura, S., Mayor-Lobo, P., & Hernández-Olivares, F. (2019). Influence of the addition of rubber fibers from end-of-life tires on plaster mortars. Study of mechanical, thermal and acoustic properties. *Dyna (Spain)*, 94(4), 460–464. <https://doi.org/10.6036/9020>
- Lozano-Díez, R. V., López-Zaldívar, Ó., Herrero-Del-Cura, S., Mayor-Lobo, P., & Hernández-Olivares, F. (2021). Mechanical behavior of plaster

composites based on rubber particles from end-of-Life tires reinforced with carbon fibers. *Materials*.  
<https://doi.org/10.3390/ma14143979>

Low, J. S. C., Lu, W. F. & Song, B. (2014). Methodology for an Integrated Life Cycle Approach to Design for Environment. *Key Engineering Materials*, 572(1), 20-23.  
<https://doi.org/10.4028/WWW.SCIENTIFIC.NET/KEM.572.20>

Marsh and GuyCarpenter. (2021). *Future of Construction - A Global Forecast for Construction to 2030*.

Mendoza, J. M. F., D'Aponte, F., Gualtieri, D. & Azapagic, A. (2019). Disposable baby diapers: Life cycle costs, eco-efficiency and circular economy. *Journal of Cleaner Production*, 211, 455-467.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.146>

Naciones Unidas. (1987). *Report Brundtland*.

Naciones Unidas. (1993). *Informe de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo*. Río de Janeiro, 3 al 14 de junio de 1992.

Naciones Unidas. (2015). *Paris Agreement*.

Naciones Unidas. (2022). *Informe sobre la situación mundial de los edificios y la construcción en 2022*.

Naciones Unidas. (2022, febrero). *Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development*.  
<https://sdgs.un.org/2030agenda>

Ng, R., Yeo, Z., Low, J. S. C. & Song, B. (2015). A method for relative eco-efficiency analysis and improvement: case study of bonding technologies. *Journal of Cleaner Production*, 99, 320-332.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.03.004>

Niu, Y., Rasi, K., Hughes, M., Halme, M. & Fink, G. (2021). Prolonging life cycles of construction materials and combating climate change by cascading: The case of reusing timber in Finland. *Resources, Conservation and Recycling*, 170 (105555).  
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105555>

- Orden APM/397/2018, de 9 de abril, por la que se determina cuándo los recortes de espuma de poliuretano utilizados en la fabricación de espuma compuesta, se consideran subproductos con arreglo a la Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados (BOE núm. 95, de 19 de abril de 2018).
- Parlamento Europeo. (2023, julio). Progreso de la UE hacia sus objetivos de cambio climático para 2020 (infografía). <https://www.europarl.europa.eu/news/es/headlines/society/20180706STO07407/progreso-de-la-ue-hacia-sus-objetivos-de-cambio-climatico-para-2020-infografia>
- Pedreño-Rojas, M. A., De Brito, J., Flores-Colen, I., Pereira, M. F. C. & Rubio-de-Hita, P. (2020). Influence of gypsum wastes on the workability of plasters: Heating process and microstructural analysis. *Journal of Building Engineering*, 29. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2019.101143>
- Pedreño-Rojas, M. A., Flores-Colen, I., De Brito, J. & Rodríguez-Liñán, C. (2019). Influence of the heating process on the use of gypsum wastes in plasters: Mechanical, thermal and environmental analysis. *Journal of Cleaner Production*, 215, 444-457. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.053>
- Pedreño-Rojas, M. A., Fořt, J., Černý, R. & Rubio-de-Hita, P. (2020). Life cycle assessment of natural and recycled gypsum production in the Spanish context. *Journal of Cleaner Production*, 253. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120056>
- Pedreño-Rojas, M. A., Morales-Conde, M. J., Pérez-Gálvez, F., & Rubio-de-Hita, P. (2019). Influence of polycarbonate waste on gypsum composites: Mechanical and environmental study. *Journal of Cleaner Production*, 218(2019), 21-37. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.200>
- Pedreño-Rojas, M. A., Morales-Conde, M. J., Pérez-Gálvez, F., & Rubio-de-Hita, P. (2020). Reuse of CD and DVD wastes as reinforcement in gypsum plaster plates. *Materials*, 13(4). <https://doi.org/10.3390/ma13040989>
- Pedreño-Rojas, M. A., Rodríguez-Liñán, C., Flores-Colen, I., & de Brito, J. (2020). Use of polycarbonate waste as aggregate in recycled

gypsum plasters. *Materials*, 13(14).  
<https://doi.org/10.3390/ma13143042>

Plastics Europe. (2021). *Plastics-the Facts 2021*. An analysis of European plastics production, demand and waste data.

Plastics Europe. (2022). *Plastics - the Facts 2022*.

Plastic Soup Foundation. (2022, enero). *Plastic Facts and Figures*.  
<https://www.plasticsoupfoundation.org/en/plastic-facts-and-figures/#productie>

Porras-Amores, C., Astorqui, J. S. C., Del Río Merino, M., Villoria-Sáez, P., & Arrebola, C. V. (2019). Thermal behavior of traditional lightweight gypsum with construction and demolition waste materials. *Dyna (Spain)*, 94(4). <https://doi.org/10.6036/8983>

Real Decreto 110/2015, de 20 de febrero, sobre residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (BOE núm. 45, de 21 de febrero de 2015).

Real Decreto 140/2003, de 7 de febrero, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano (BOE núm. 45, de 21 de febrero de 2003).

Real Decreto 3/2023, de 10 de enero, por el que se establecen los criterios técnico-sanitarios de la calidad del agua de consumo, su control y suministro (BOE núm. 9, de 11 de enero de 2023).

Real Decreto 553/2020, de 2 de junio, por el que se regula el traslado de residuos en el interior del territorio del Estado (BOE núm. 171, de 19 de junio de 2020).

Reglamento (CE) nº 1013/2006 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 14 de junio de 2006, relativo a los traslados de residuos (DOUE L núm. 190/1, de 12 de julio de 2006).

RILEM TC 25-PEM. (1980). Recommended test to measure the deterioration of stone and to assess the effectiveness of treatment methods. *Materials and Structures*, 13(75), 175-253.

Rodrigo-Bravo, A., Alameda Cuenca-Romero, L., Calderón, V., Rodríguez, Á., & Gutiérrez-González, S. (2022). Comparative Life Cycle Assessment (LCA) between standard gypsum ceiling tile and

- polyurethane gypsum ceiling tile. *Energy and Buildings*, 259, 111867. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2022.111867>
- Romero-Gómez, M. I., Pedreño-Rojas, M. A., Pérez-Gálvez, F., & Rubio-de-Hita, P. (2021). Characterization of gypsum composites with polypropylene fibers from non-degradable wet wipes. *Journal of Building Engineering*, 34, 101874. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101874>
- Saint-Gobain Placo Ibérica S.A. (2020). Ficha técnica. Iberyola. Yesos y plastes.
- Saint-Gobain Placo Ibérica S.A. (2023, julio). <https://www.placo.es/Producto/placor-planet-13-1200#marketing-description>
- Salas, M. Á., Pérez-Acebo, H., Calderón, V., & Gonzalo-Orden, H. (2018). Bitumen modified with recycled polyurethane foam for employment in hot mix asphalt. *Ingeniería e Investigación*, 38(1), 60–66. <https://doi.org/10.15446/ing.investig.v38n1.65631>
- San-Antonio-González, A., Del Río Merino, M., Viñas Arrebola, C., & Villoria-Sáez, P. (2015). Lightweight material made with gypsum and EPS waste with enhanced mechanical strength. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943)
- San-Antonio-González, A., Del Río Merino, M., Viñas Arrebola, C., & Villoria-Sáez, P. (2015). Lightweight material made with gypsum and extruded polystyrene waste with enhanced thermal behaviour. *Construction and Building Materials*, 93, 57–63. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2015.05.040>
- Santa Cruz Astorqui, J., Del Río Merino, M., Villoria Sáez, P., & Porras Amores, C. (2019). Analysis of the viability of prefabricated elements for partitions manufactured with plaster and eps from waste recycling. *Dyna (Spain)*, 94(4). <https://doi.org/10.6036/8984>
- Santamaría Vicario, I., Alameda Cuenca-Romero, L., Gutiérrez González, S., Calderón Carpintero, V., & Rodríguez Saiz, Á. (2020). Design and characterization of gypsum mortars dosed with polyurethane foam waste PFW. *Materials*, 13(7). <https://doi.org/10.3390/ma13071497>

- Silva, F. G. S., Junior, R. A. F., Da Silva, J. S., Pinto, K. W., Andrade, H. M. C., Dweck, J., & Gonçalves, J. P. (2015). Hydration of the equilibrium catalyst (Ecat) calcium hydroxide system: Thermogravimetric study of the formation of main hydrated phases. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 120(2), 1089-1098. <https://doi.org/10.1007/s10973-015-4449-8>
- Sing, K. S. W., Everett, D. H., Haul, R. A. W., Moscou, L., Pierotti, R. A., Rouquérol, J., & Siemieniowska, T. (1985). Reporting physisorption data for gas/solid systems with special reference to the determination of surface area and porosity. *Pure and Applied Chemistry*, 57(4), 603-619. <https://doi.org/https://doi.org/10.1351/pac198557040603>
- Statista. Tasa de recuperación de residuos de construcción y demolición (RCDs) de la Unión Europea (UE-27) en 2018, por países. (2023, julio). <https://www.statista.com/statistics/1316268/recovery-rate-of-construction-and-demolition-waste-eu-by-country/>
- Suárez, S., Roca, X. & Gasso, S. (2016). Product-specific life cycle assessment of recycled gypsum as a replacement for natural gypsum in ordinary Portland cement: Application to the Spanish context. *Journal of Cleaner Production*, 117, 150-159. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.01.044>
- Teresa, M., Freire, G., Luísa, A., Lomelino, P., Doctor, V., Manuel, J., Portela Da Costa, A., Flores, S., Colen, B., Do, M., Da, R., Veiga, S., José, A., Grande, E., Doctor, C., Patrício, A. P., Ferreira, T., & França De Santana, P. (2016). Restoration of ancient portuguese interior plaster coatings: Characterization and development of compatible gypsum-based products.
- The Conference Board. (2021). Plastic Solid Waste Management.
- The EU Ecolabel. (2023, junio). [https://environment.ec.europa.eu/topics/circular-economy/eu-ecolabel-home\\_en](https://environment.ec.europa.eu/topics/circular-economy/eu-ecolabel-home_en)
- Thommes, M., & Cychoz, K. A. (2014). Physical adsorption characterization of nanoporous materials: Progress and challenges. *Adsorption*, 20(2-3), 233-250. <https://doi.org/10.1007/s10450-014-9606-z>

- Thommes, M., Kaneko, K., Neimark, A. V., Olivier, J. P., Rodriguez-Reinoso, F., Rouquerol, J., & Sing, K. S. W. (2015). Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report). *Pure and Applied Chemistry*, 87(9–10), 1051–1069. <https://doi.org/10.1515/pac-2014-1117>
- Tian, X., Liu, D., & Zhao, F. (2020). Preparation and properties of solid waste based lightweight plastering gypsum. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 768(2). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/768/2/022048>
- Universiteit Leiden. (2023, julio). CML-IA Characterisation Factors. <https://www.universiteitleiden.nl/en/research/research-output/science/cml-ia-characterisation-factors>
- Vidales-Barriguete, A., Piña-Ramírez, C., Serrano-Somolinos, R., del Río-Merino, M., & Atanes-Sánchez, E. (2021). Behavior resulting from fire in plasterboard with plastic cable waste aggregates. *Journal of Building Engineering*, 40, 102293. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102293>
- Vidales-Barriguete, A., Santa-Cruz-Astorqui, J., Piña-Ramírez, C., Kosior-Kazberuk, M., Kalinowska-Wichrowska, K., & Atanes-Sánchez, E. (2021). Study of the mechanical and physical behavior of gypsum boards with plastic cable waste aggregates and their application to construction panels. *Materials*, 14(9). <https://doi.org/10.3390/ma14092255>
- Villoria Sáez, P., del Río Merino, M., Sorrentino, M., Amores, C. P., Santa Cruz Astorqui, J., & Viñas Arrebola, C. (2020). Mechanical characterization of gypsum composites containing inert and insulation materials from construction and demolition waste and further application as a gypsum block. *Materials*, 13(1). <https://doi.org/10.3390/ma13010193>
- Wang, G., Liu, Y. Q., & Cui, Y. (2012). Performance Studies of Lightweight Concrete Mixtures Made with Rigid Polyurethane Foam Wastes. *Applied Mechanics and Materials*, 204–208, 4007–4010. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.204-208.4007>

- Weimann, K., Adam, C., Buchert, M. & Sutter, J. (2021). Environmental Evaluation of Gypsum Plasterboard Recycling. *Minerals*, 11(2), 101. <https://doi.org/10.3390/min11020101>
- Zhang, D., & Shao, Y. (2018). Surface scaling of CO<sub>2</sub>-cured concrete exposed to freeze-thaw cycles. *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization*, 27, 137–144. <https://doi.org/10.1016/J.JCOU.2018.07.012>
- Zhao, J. & Li, S. (2022). Life cycle cost assessment and multi-criteria decision analysis of environment-friendly building insulation materials - A review. *Energy and Buildings*, 254, 111582. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2021.111582>



## PRODUCCIÓN CIENTÍFICA

### Artículos científicos

#### **Economic and eco-efficiency assessment of gypsum-based precast with polymeric waste**

Autores: A. Rodrigo-Bravo, L. Alameda Cuenca-Romero, V. Calderón, R. Arroyo-Sanz y S. Gutiérrez-González.

Revista: Environment, Development and Sustainability.

Estado: en revisión.

#### **Life Cycle Assessment of eco-friendly cement polymer blocks**

Autores: R. Arroyo, Á. Alonso, S. González-Moreno, A. Rodrigo-Bravo, S. Gutiérrez-González y V. Calderón.

Revista: Sustainable Production and Consumption.

Estado: en revisión.

#### **Comparative Life Cycle Assessment (LCA) between standard gypsum ceiling tile and polyurethane gypsum ceiling tile**

Autores: A. Rodrigo-Bravo, L. Alameda Cuenca-Romero, V. Calderón, Á. Rodríguez y S. Gutiérrez-González.

Revista: Energy and Buildings, volume 259, 2022, 111867. JCR-Q1, 8/138 Engineering Civil y factor de impacto 7.201 (2021).

Estado: [10.1016/j.enbuild.2022.111867](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.111867)

### Patentes de invención

#### **Ecoadoquín de cemento antideslizante aligerado con residuos poliméricos industriales y fibra de vidrio**

Inventores: A. Alonso Díez, R. Arroyo Sanz, V. Calderón Carpintero, A. Rodrigo Bravo, S. Gutiérrez González y S. González Moreno.

Numero de solicitud: U 2022 31 488 Fecha de solicitud: 13/09/2022

Número de patente: - Fecha de concesión: -

### Libros y capítulos de libro

#### **Guía de buenas prácticas en el uso de residuos de poliuretano en prefabricados de yeso**

Autores: S. Gutiérrez González, L. Alameda Cuenca-Romero, C. Junco Petrement, V. Calderón Carpintero, A. Rodrigo Bravo y I. Muñiz García.

Editorial: Ocronos

ISBN nº: 978-84-18747-65-6 (2021)

Tipo: libro

## Congresos

### **Valorisation of polyurethane waste in gypsum mortar to improve its circular economy**

Autores: A. Rodrigo-Bravo, S. Gutiérrez-González, V. Calderón Carpintero y L. Alameda Cuenca-Romero.

Evento: 17<sup>th</sup> International Congress on Polymers in Concrete (ICPIC 2023)

Lugar: Varsovia (Polonia)

Fecha: del 17 al 20 de septiembre de 2023

Tipo: presentación oral

### **Economic sustainability assessment of a gypsum ceiling tile with polyurethane foam waste**

Autores: A. Rodrigo-Bravo, S. Gutiérrez-González, V. Calderón Carpintero y L. Alameda Cuenca-Romero.

Evento: 13<sup>th</sup> International Conference on Future Environment and Energy (ICFEE 2023)

Lugar: Tokio (Japón)

Fecha: del 13 al 15 de enero de 2023

Tipo: presentación oral

### **Industrial Manufacture of plasterboards for ceilings with plaster mortars mixes and polyurethane rigid foam waste**

Autores: C. Junco Petrement, Á. Rodríguez Sáiz, R. Arroyo Sanz y A. Rodrigo Bravo.

Evento: 13<sup>th</sup> International Conference on Future Environment and Energy (ICFEE 2023)

Lugar: Tokio (Japón)

Fecha: del 13 al 15 de enero de 2023

Tipo: presentación oral

### **Towards an ecological transition in the construction sector trough the production of new-efficient products**

Autores: S. Gutiérrez-González, A. Rodrigo-Bravo, V. Calderón Carpintero y L. Alameda Cuenca-Romero.

Evento: 13<sup>th</sup> International Conference on Future Environment and Energy (ICFEE 2023)

Lugar: Tokio (Japón)  
 Fecha: del 13 al 15 de enero de 2023  
 Tipo: presentación oral

**Environmental policies and sustainable development in the life-repolyuse project**

Autores: A. Rodrigo-Bravo, S. Gutiérrez-González, L. Alameda Cuenca-Romero, V. Calderón Carpintero, R. Arroyo Sanz y A. Díez Alonso.  
 Evento: 7<sup>th</sup> International Conference on Technological Innovation in Building – 7<sup>th</sup> Congreso Internacional de Innovación Tecnológica en Edificación (CITE 2022)  
 Lugar: Madrid (España)  
 Fecha: del 23 al 25 de marzo de 2022  
 Tipo: presentación oral

**A new construction material gypsum pre-fabricated tile for registrable ceilings**

Autores: L. Alameda Cuenca-Romero, A. Rodrigo Bravo, A. Alonso Díez, R. Arroyo Sanz, V. Calderón Carpintero y S. Gutiérrez González.  
 Evento: 1<sup>st</sup> International Itinerant Poster Exhibition – Industrialized Construction  
 Lugar: itinerante  
 Fecha: año 2022  
 Tipo: póster

**Análisis del ciclo de vida de prefabricados de mortero con adición de residuos**

Autores: A. Alonso Díez, R. Arroyo Sanz, A. Rodrigo Bravo, V. Calderón Carpintero, L. Alameda Cuenca-Romero y S. Gutiérrez González.  
 Evento: XX Jornada de Materiales - Simposio: Nuevos desarrollos para una Economía Circular (CIRMAT)  
 Lugar: Madrid (España)  
 Fecha: 24 de febrero de 2022  
 Tipo: póster

**Life-repolyuse project reduces effects of the planet's climate change on human beings**

Autores: S. Gutiérrez-González, L. Alameda Cuenca-Romero, C. Junco Petrement, Á. Rodríguez Sáiz, V. Calderón Carpintero y A. Rodrigo-Bravo.

Evento: 6<sup>th</sup> International Conference on Technological Innovation in Building – 6<sup>th</sup> Congreso Internacional de Innovación Tecnológica en Edificación (CITE 2021)

Lugar: Madrid (España)

Fecha: del 24 al 26 de marzo de 2021

Tipo: presentación oral

**Comparative life cycle assessment of gypsum ceiling tile made with polyurethane foam waste**

Autores: S. Gutiérrez González, L. Alameda Cuenca-Romero, A. Rodrigo Bravo, V. Calderón y Á. Rodríguez.

Evento: Recycling and Waste Management Summit (RWM 2021)

Lugar: online

Fecha: 21 de enero de 2021

Tipo: presentación oral

**Sustainable polyurethane plasterboard for construction**

Autores: V. Miguel, C. Junco, S. Gutiérrez, L. Alameda y A. Rodrigo.

Evento: 3<sup>th</sup> Rilem Spring Convention and Conference (RSCC 2020)

Lugar: Guimaraes (Portugal)

Fecha: del 10 al 14 de marzo de 2020

Tipo: presentación oral

**Estancias de investigación predoctoral**

Centro: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP) (Oporto, Portugal)

Supervisión: Prof. Vasco Peixoto de Freitas

Duración: del 2 de julio de 2022 al 2 de octubre de 2022 (3 meses)

**ANEXOS**

**ANEXO 1. Informe del ensayo de granulometría por difracción laser de las materias primas**

**ANEXO 2. Gráficas del ensayo de termogravimetría de las materias primas**

**ANEXO 3. Diseño de dosificaciones**

**ANEXO 4. Ampliación del ensayo de absorción de agua por capilaridad en las mezclas**

**ANEXO 5. Informes del ensayo de no combustibilidad y calor bruto de combustión de las mezclas**

**ANEXO 6. Informe del ensayo de no combustibilidad y calor bruto de combustión del prefabricado**

**ANEXO 7. Informe del ensayo de absorción acústica del prefabricado**

**ANEXO 8. Análisis de ciclo de vida de la fase experimental**

**ANEXO 9. Análisis de ciclo de vida de la fase industrial**

**ANEXO 10. Análisis del coste del ciclo de vida**