



TESIS DOCTORAL

Placas de escayola modificadas con residuos metalúrgicos con propiedades estructurales y térmicas mejoradas. Determinación de la huella ecológica.

Ana Paredes Núñez

Directora: Dra. Verónica Calderón Carpintero

Codirectora: Dra. Raquel Arroyo Sanz

Burgos, septiembre de 2024



Dña. Verónica Calderón Carpintero, Profesora Catedrática y **Dña. Raquel Arroyo Sanz**, Profesora Investigadora, del Área de Construcciones Arquitectónicas del Departamento de Construcciones Arquitectónicas e Ingeniería de la Construcción y del Terreno de la Escuela Politécnica Superior de la Universidad de Burgos,

INFORMAN:

Que la presente Memoria titulada **“Placas prefabricadas de escayola modificadas con residuos metalúrgicos con propiedades estructurales y térmicas mejoradas. Determinación de la huella ecológica.”** se ha realizado en el Departamento de Construcciones Arquitectónicas e Ingeniería de la Construcción y del Terreno de la Universidad de Burgos, bajo su dirección, por la Graduada en Arquitectura Técnica **Dña. Ana Paredes Núñez** y autorizan su presentación para que sea calificada como TESIS DOCTORAL.

Burgos, 10 de julio de 2024

Fdo.: Dra. Verónica
Calderón Carpintero

Fdo.: Dra. Raquel
Arroyo Sanz

A mis padres Ascen y Javi, y a mi hermano Javier

A mi familia y amigos



La concienciación ambiental ha transformado la forma de vivir y construir de la sociedad actual, impulsando la construcción sostenible como una respuesta clave para reducir impactos negativos en el medio ambiente. Este enfoque busca desarrollar nuevos materiales y técnicas que minimicen la producción de residuos, promuevan el reciclaje de materiales y reduzcan las emisiones de CO₂, representando un área vital de investigación aplicada en el sector de la edificación.

Con ese enfoque se desarrolla esta Tesis Doctoral, que se centra en el desarrollo de nuevos materiales derivados de la escayola que integran residuos inorgánicos, específicamente escorias blancas de la industria siderúrgica. Estos residuos, que de otra manera serían desechados y enviados a vertederos, se utilizan para mejorar las propiedades de los productos finales. El objetivo del producto final es reducir el uso de materia prima virgen y aprovechar desechos de otras industrias, lo que resulta en un menor impacto ambiental mediante la reutilización y la mejora de las características de los materiales desarrollados.

El objetivo de esta Tesis es probar la viabilidad de fabricación y puesta en obra de placas prefabricadas de escayola a las que se les incorpora residuos de escorias metalúrgicas procedentes de altos hornos industriales. Para ello, se estudian y caracterizan las materias primas que componen las placas, así como las mezclas de yeso-residuos tanto en estado fresco como en estado endurecido. En estado fresco, se calcula la cantidad de agua que se necesita para obtener una buena trabajabilidad, se analizan los tiempos de fraguado y se calculan las densidades de las mezclas. Una vez que los materiales endurecen, se determinan propiedades la resistencia a flexión, la absorción por capilaridad, la resistencia al impacto, la microscopía óptica y el comportamiento térmico. Finalmente, y pensando en una futura aplicación en obras reales, se estudia la reacción al fuego de todas las dosificaciones, y se profundiza



en los ensayos que validan el color final de los materiales, mediante colorimetría.

La aplicabilidad de las placas prefabricadas se lleva a cabo mediante la comprobación de su aptitud al ser colocadas en un demostrador en el laboratorio. El prototipo utilizado pretende comprobar la robustez del material final, así como definir las técnicas constructivas que van ligadas a su puesta en obra, para confirmar su validez en obra real.

Como último paso, se calcula el análisis de ciclo de vida (ACV), considerando la disminución de materiales naturales y el reaprovechamiento de recursos, y se evalúa la disminución del impacto y la huella ambiental en todas sus vertientes.

Con los resultados obtenidos y de forma global, se demuestra la viabilidad de este tipo de residuos para la fabricación de placas prefabricadas de escayola para particiones interiores en edificación.

Palabras clave

Escayola, escorias de acería, placas prefabricadas, resistencia mecánica, resistencia al fuego, análisis de ciclo de vida (ACV), huella medioambiental, puesta en obra.



Environmental awareness has transformed the way society lives and builds today, driving sustainable construction as a key response to reduce negative impacts on the environment. This approach aims to develop new materials and techniques that minimize waste production, promote material recycling, and reduce CO₂ emissions, becoming a crucial area of applied research in the construction sector.

Having this focus, this Doctoral Thesis is developed, which focuses on the development of new materials obtained from plaster that incorporate inorganic waste, specifically white slag from the steel industry. These wastes, which would otherwise be discarded and sent to landfills, are used to enhance final products' properties. The goal of the final product is to reduce the use of raw materials and utilize waste from other industries, resulting in lower environmental impact through reuse and improvement of material characteristics.

The aim of this Thesis is to test the feasibility of manufacturing and implementing prefabricated plaster panels incorporating metallurgical slag wastes from industrial blast furnaces. To achieve this, the raw materials composing the panels are studied and characterized, as well as the gypsum-waste mixes in both fresh and hardened states. In the fresh state, the amount of water needed for good workability is calculated, setting times are analyzed, and mixture densities are determined. Once the materials have hardened, properties such as flexural strength, capillary absorption, impact resistance, optical microscopy, and thermal behavior are evaluated. Lastly, considering future real-world applications, fire reaction tests for all dosages are conducted, and color finality is validated using colorimetry.

Prefabricated panels viability and usage is tested by verifying their suitability when placed in a demonstrator in the laboratory. The prototype aims to confirm final material robustness and define the construction techniques associated



with its implementation to confirm its reliability in real applications.

As a final step, a life cycle assessment (LCA) is conducted, considering the reduction in natural materials and reserves reuse, evaluating the decrease in impact and environmental footprint across all aspects.

Overall, based on the results obtained, it is demonstrated the viability of using steel slag waste for manufacturing prefabricated plaster panels to be used on interior partitions in buildings.

Key words

Plaster, steel slags, prefabricated boards, mechanical strength, fire resistance, live cycle analysis (LCA), environmental footprint, on-site application.



CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	3
1.1. Introducción	3
1.2. Materiales sostenibles. Creación y desarrollo del análisis del ciclo de vida de los materiales. Huella de carbono.	5
1.3. La incorporación de escorias de altos hornos en yesos: un enfoque innovador	6
1.4. Estructura de la Tesis.....	7
CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE.....	13
2.1. Introducción	13
2.2. Producción del acero y generación de escorias.....	14
2.3. Mezclas de yesos con incorporación de residuos orgánicos....	19
2.3.1. Polipropileno (PP)	20
2.3.2. Polietileno (PE) y tereftalato de polietileno (PET)	21
2.3.3. Poliestireno expandido (EPS) y extruido (XPS)	22
2.3.4. Poliuretano	23
2.3.5. Poliamidas.....	24
2.4. Mezclas de yesos con incorporación de residuos inorgánicos.	26
2.4.1. Ladrillo.....	26
2.4.2. Fibras naturales de madera.....	27
2.4.3. Fibras de vidrio.....	28
2.5. Incorporación de residuos de escoria en materiales en base cemento.....	29
2.6. Incorporación de residuos de escoria en materiales en base yeso y resultados previos del grupo de investigación.....	31
2.7. Análisis medioambiental	33



CAPÍTULO 3. OBJETIVOS	41
3.1. Objetivos generales.....	41
3.2. Objetivos específicos	41
CAPÍTULO 4. EQUIPOS Y ENSAYOS. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.....	45
4.1. Ensayos sobre materiales obtenidos en estado fresco y endurecido	46
4.1.1. Análisis elemental CHNS.....	46
4.1.2. Difracción de Rayos X (DRX)	47
4.1.3. Microscopía electrónica de barrido (SEM).....	48
4.1.4. Microscopía óptica.....	49
4.1.5. Análisis termogravimétrico (TGA)	50
4.1.6. Densidad real y densidad aparente	51
4.1.7. Consistencia. Método de la mesa de sacudidas.....	51
4.1.8. Principio de fraguado. Método del cono de Vicat	52
4.2. Placas de escayola prefabricadas.....	53
4.2.1. Densidad aparente	53
4.2.2. Resistencia a flexión (expresada como carga de rotura a flexión)	54
4.2.3. Capacidad de absorción total de agua	55
4.2.4. Resistencia al impacto	55
4.2.5. Ensayo de reacción al fuego. Ensayo de no combustibilidad.....	56
4.2.6. Ensayo de conductividad térmica	57
4.2.7. Ensayo de colorimetría.....	58
CAPÍTULO 5. CARACTERIZACIÓN DE MATERIAS PRIMAS	63
5.1. Escayola.....	63
5.2. Escoria blanca	65



5.2.1. Caracterización física.....	67
5.2.2. Microscopía electrónica de barrido (SEM).....	69
5.2.3. Microscopía óptica o confocal	70
5.2.4. Caracterización química y mineralógica.....	72
5.3. Aditivo.....	75

CAPÍTULO 6. CARACTERIZACIÓN DE MEZCLAS Y PLACAS PREFABRICADAS..... 79

6.1. Proceso productivo de las mezclas	79
6.1.1. Preparación de los materiales	80
6.1.2. Preparación de las mezclas	80
6.1.3. Proceso de fabricación	81
6.2. Caracterización de las mezclas en estado fresco	81
6.2.1. Relación agua/conglomerante.....	82
6.2.2. Principio de fraguado	83
6.2.3. Densidad aparente	83
6.3. Introducción a la caracterización de las placas de escayola.....	84
6.4. Caracterización de las placas de escayola	85
6.5. Proceso experimental	87
6.5.1 Densidad	88
6.5.2. Resistencia a flexión.....	89
6.5.3. Capacidad de absorción de agua	89
6.5.4. Resistencia al impacto	90
6.5.6. Microscopía óptica o confocal	92
6.5.7. Resistencia térmica.....	94
6.5.8. Ensayo de reacción al fuego de productos. Ensayo de no combustibilidad	97
6.5.9. Ensayo de colorimetría.....	100
6.6. Conclusiones	104



CAPÍTULO 7. APLICABILIDAD DE PLACAS PREFABRICADAS DE ESCAYOLA..... 109

7.1. Sistemas de placas de escayola laminadas.....	109
7.1.1. Exigencias básicas de seguridad en caso de incendio (SI).....	110
7.1.2. Exigencias básicas de ahorro de energía (HE)	110
7.1.3. Exigencias básicas de protección frente al ruido (HR)	111
7.2. Sistemas de construcción en seco.....	112
7.3. Simulación de puesta en obra y resultados obtenidos.....	115
7.3.1. Placas prefabricadas dosificación PL20S	119
7.3.2. Placas prefabricadas dosificación PL40S	121
7.3.3. Placas prefabricadas dosificación PL60S	123
7.4. Conclusiones	126

CAPÍTULO 8. SIMULACIÓN ENERGÉTICA. ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA..... 131

8.1. Análisis del ciclo de vida (ACV)	131
8.2. Metodología	133
8.3. Definición del objetivo y alcance del análisis.....	134
8.3.1. Alcance del estudio	135
8.3.2. Unidad funcional.....	135
8.3.3. Límites del sistema.....	136
8.3.4. Requisitos de calidad de los datos.....	137
8.3.5. Metodología de evaluación de impacto	138
8.3.6. Categorías de impacto	138
8.4. Análisis del inventario del ciclo de vida (ICV).....	140
8.4.1. Adquisición de materias primas (A1)	141
8.4.2. Transporte de materias primas (A2).....	141
8.4.3. Fabricación.....	142



8.5. Evaluación del impacto del ciclo de vida (EICV) e interpretación144
8.6. Conclusiones..... 152

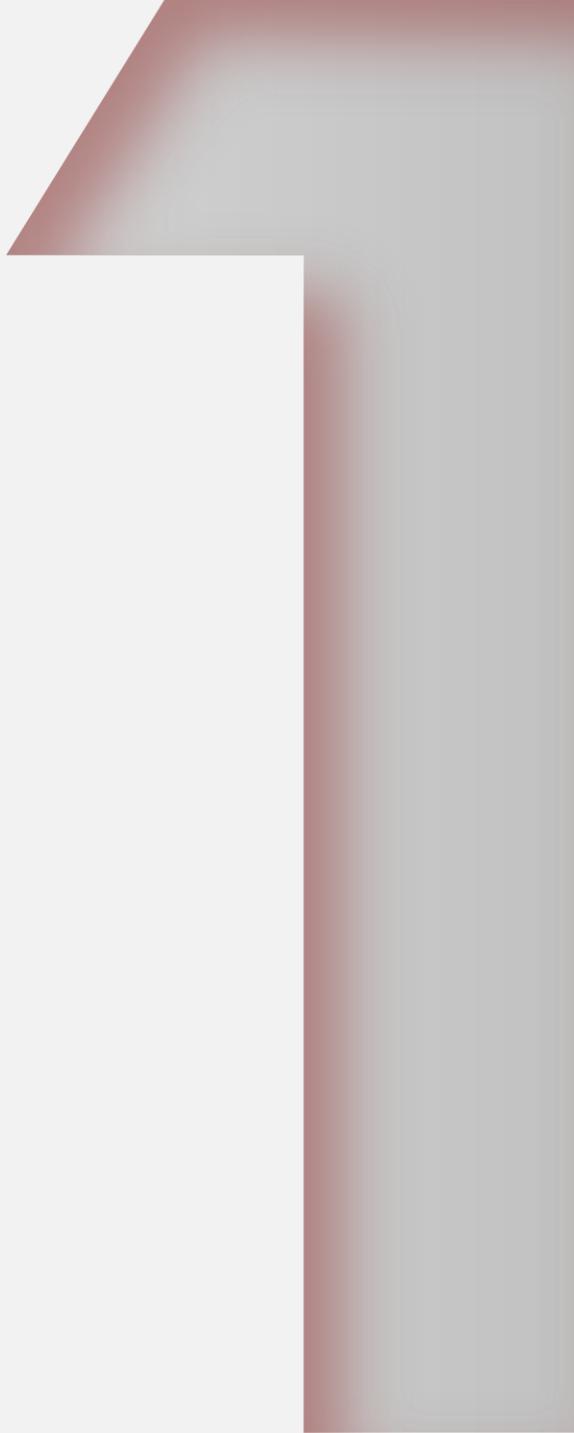
CAPÍTULO 9. CONCLUSIONES..... 155

FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN 161

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 165

ÍNDICE DE TABLAS, GRÁFICOS Y FIGURAS..... 176

Índice de tablas177
Índice de gráficos.....178
Índice de figuras.....179



Introducción



CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1. Introducción

La construcción sostenible, como enfoque integral para abordar los desafíos ambientales, sociales y económicos asociados con la construcción y gestión de edificaciones, ha ganado una atención significativa en las últimas décadas. La necesidad de reducir el impacto ambiental de la actividad humana, así como la escasez de recursos naturales y la creciente disposición de residuos en vertederos, han impulsado la búsqueda de prácticas constructivas más responsables y eficientes.

El concepto de construcción sostenible tiene sus raíces en las preocupaciones ambientales y sociales que surgieron a lo largo del siglo XX, pero fue en la década de 1970 cuando comenzó a tomar forma como un movimiento estructurado y sistemático. En ese período, el aumento de la conciencia sobre los efectos negativos de la industrialización y el desarrollo global no controlado llevó a un mayor interés en prácticas que minimizaran el impacto ambiental de la construcción.

Además, las crisis energéticas de la década de 1970 pusieron de relieve la importancia de la eficiencia energética en el diseño y construcción de edificios. Esto llevó a un incremento en la investigación y el desarrollo de tecnologías y estrategias destinadas a reducir el consumo de energía en los edificios, sentando las bases para el enfoque actual de la construcción sostenible.

Desde sus inicios, la construcción sostenible ha experimentado una evolución constante, propulsada por una combinación de una mayor conciencia pública sobre los problemas ambientales, avances tecnológicos y cambios en las políticas gubernamentales, habiéndose producido a lo largo de



las décadas avances significativos en varios aspectos clave de la construcción sostenible.

Siendo uno de los pilares fundamentales de la construcción sostenible la eficiencia energética, se han desarrollado y adoptado una amplia gama de tecnologías y estrategias para reducir el consumo energético en los edificios, incluyendo entre ellas sistemas de iluminación eficientes, aislamiento térmico mejorado, edificaciones más herméticas, diseño pasivo o uso de energías renovables para cubrir su demanda.

Otro de los aspectos a tener en cuenta cuando se analiza la sostenibilidad en la construcción es la gestión de residuos generados. El sistema constructivo genera, y ha generado una enorme cantidad de residuos con su consecuente impacto medioambiental, por ello se han creado y adoptado prácticas y tecnologías para disminuir, reutilizar y reciclar los residuos de la construcción, promoviendo así un enfoque más circular y sostenible hacia la gestión de los recursos.

Para llevar a cabo una gestión de residuos controlada, en España se han desarrollado normativas y planes estatales como puede ser el Programa Estatal de Prevención de Residuos con su última versión válida hasta el 2020. Este programa se enfocaba en la reducción de la cantidad total de residuos, la reutilización y extensión de la vida útil de los productos, la reducción del contenido de sustancias nocivas en los materiales y la reducción de los impactos adversos sobre la salud humana y el medio ambiente de los recursos generados.



1.2. Materiales sostenibles. Creación y desarrollo del análisis del ciclo de vida de los materiales. Huella de carbono.

La RAE (Real Academia Española) define "sostenible" como algo que se puede mantener durante largo tiempo sin agotar los recursos o causar grave daño al medio ambiente.

La aplicación de esta definición a los materiales de construcción, se refiere a aquellos productos que se generan, utilizan y desechan de una forma que reduce los impactos negativos en el medio ambiente, en la sociedad y en la economía a lo largo de su ciclo de vida. Esto conlleva evaluar aspectos como la eficiencia en el uso de recursos naturales, la reducción de emisiones contaminantes, una cadena de suministro ética y la capacidad de ser reciclable o renovable. Es decir, materiales que cumplen con las necesidades actuales sin comprometer la capacidad de las generaciones venideras.

En los últimos años, además de la conciencia sobre los materiales de construcción sostenibles convencionales, como los reciclados y los de origen renovable, y dada la necesidad de seguir avanzando todavía más en esa dirección, hay un creciente interés en cuantificar productos con bajo contenido de carbono. Estos materiales con una huella de carbono reducida, cuya producción y uso generan menos emisiones, son cada vez más valorados debido a su alineación con los objetivos de reducción de carbono a nivel global y, consecuentemente, de las emisiones finales con las que contribuye cada país.

Una herramienta fundamental en el avance para la determinación cuantitativa de este tipo de parámetros de la construcción sostenible corresponde al análisis del ciclo de vida de los materiales (ACV). Esta metodología evalúa el impacto ambiental de un material o producto a lo largo de todas las etapas de su vida útil, desde la extracción de materias primas



hasta su disposición final. Proporciona una visión integral de los impactos ambientales asociados con los materiales y procesos, lo que permite a los diseñadores y constructores tomar decisiones informadas en la redacción y ejecución de sus proyectos. Asimismo, resulta cada vez más relevante para identificar oportunidades de mejora en la cadena de suministro de la construcción y promover la adopción de materiales más sostenibles.

Se puede decir que la construcción sostenible y la percepción de la sociedad hacia este tema ha evolucionado de manera significativa en las últimas décadas, impulsada por avances tecnológicos, los cambios en las políticas gubernamentales y la mayor conciencia pública sobre los problemas ambientales.

1.3. La incorporación de escorias de altos hornos en yesos: un enfoque innovador

La integración de escorias de altos hornos en yesos como parte de un enfoque más amplio de construcción sostenible representa una gran oportunidad para reducir los residuos industriales y promover prácticas constructivas más responsables y eficientes, así como un enfoque innovador dentro del ámbito de la construcción sostenible. Las escorias, que son subproductos de la industria siderúrgica, han sido tradicionalmente consideradas como residuos y desechadas de manera poco responsable. Sin embargo, investigaciones recientes han demostrado que estas escorias pueden tener propiedades beneficiosas cuando se incorporan en materiales de construcción, como el yeso, estudios que van a ser ampliados y continuados en esta línea de investigación.

Al utilizar estas escorias como materia prima en la producción de yeso, no solo se reduce la cantidad de residuos



generados por la industria siderúrgica, sino que también se obtienen beneficios adicionales, como la mejora de las propiedades físicas y mecánicas del yeso, y una reducción en la cantidad de materia prima necesaria.

La bibliografía que versa sobre la utilización de yesos a los que se les incorporan escorias industriales es muy escasa y no va más allá de unas pocas referencias que se especificarán en detalle en el Capítulo 2. Estado del Arte.

1.4. Estructura de la Tesis

Esta Tesis Doctoral está estructurada en una serie de capítulos que capturan de manera organizada los antecedentes, estado de la cuestión, objetivos, ensayos, resultados y conclusiones obtenidos sobre la investigación del tema elegido. Se compone de un total de 9 capítulos y 3 anexos como se resume a continuación:

Capítulo 1. Introducción

En la introducción se definen términos clave en el desarrollo de esta Tesis Doctoral y se justifica el tema elegido para la investigación. Además, se incorpora la estructura de la Tesis.

Capítulo 2. Antecedentes

En este capítulo se analiza la producción de escorias siderúrgicas a nivel global y nacional y se estudia el potencial de reciclaje y reutilización de las mismas. Se evalúan y recogen algunas de las investigaciones realizadas hasta el momento dónde las escorias son mezcladas con matrices de yeso.



También se hace referencia a las investigaciones llevadas a cabo por el Grupo de Investigación de Ingeniería de la Edificación de la Universidad de Burgos, así como se hace un breve análisis medioambiental de la situación actual y se citan algunas de las herramientas disponibles para llevar a cabo este análisis.

Capítulo 3. Objetivos

Se establecen los objetivos generales y específicos que este trabajo de investigación quiere conseguir.

Capítulo 4. Equipos y ensayos

En este capítulo se detallan todos los ensayos realizados para el estudio de los materiales y mezclas analizadas en la investigación, así como se especifican los equipos utilizados para este estudio.

Capítulo 5. Caracterización de materias primas

Se analizan las características físicas, químicas y mineralógicas de las materias primas utilizadas que van a ser objeto de estudio en esta investigación. La caracterización se hace en base a la normativa establecida.

Capítulo 6. Caracterización de mezclas y placas prefabricadas

En este apartado se detalla el proceso constructivo de las placas prefabricadas de escayola, que incluye la preparación de las mezclas estudiadas, así como su caracterización física y química, tanto en estado fresco como en estado endurecido.



Se especifican todos los ensayos llevados a cabo durante su caracterización y se analizan los resultados obtenidos.

Capítulo 7. Aplicabilidad de las placas prefabricadas de escayola

Una vez finalizada la producción de las placas prefabricadas con escorias se lleva a cabo su puesta en obra. Para ello, se estudia y cumple con la normativa aplicable y se analizan los diferentes tipos de sistemas constructivos para construcción en seco. A continuación, se observa el comportamiento en la puesta en obra que tienen cada una de las placas fabricadas en función de su dosificación.

Capítulo 8. Simulación energética y ACV. Determinación de la huella de carbono.

La simulación energética del Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es una herramienta clave para evaluar el impacto ambiental y energético de los materiales finales que se obtienen en esta Tesis Doctoral, así como de los procesos productivos o sistemas a lo largo de su ciclo de vida completo, desde la extracción de materias primas hasta su disposición final. Este tipo de análisis ayuda a identificar y cuantificar el consumo de energía y las emisiones de gases de efecto invernadero en cada etapa del ciclo de vida, permitiendo una evaluación más completa y precisa de la sostenibilidad del producto final. La metodología seguida se especifica en detalle dentro del capítulo, así como las conclusiones, que resultan una información muy eficaz para comprender y reducir los impactos ambientales asociados a la fabricación global de los materiales en base yeso que se han obtenido.



Capítulo 9. Conclusiones

Por último, gracias a la visión global con los resultados obtenidos y sin perder de vista los objetivos inicialmente planteados, se aportan en este apartado las conclusiones, tanto las más generales como las específicas y detalladas. Abarcan varios aspectos clave, desde el rendimiento y la viabilidad de los materiales hasta sus beneficios ambientales cuantitativos. Estas conclusiones subrayan la importancia y el potencial de los materiales reciclados obtenidos para contribuir a un futuro más sostenible, resaltando tanto los logros alcanzados como las áreas que requieren atención futura.



Estado del arte



CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE

2.1. Introducción

Actualmente la concienciación ambiental es un valor añadido en la sociedad, que influencia nuestra forma de vivir, desplazarnos o construir edificios. Es una forma de pensar y actuar en la que también se engloba la construcción sostenible, que de alguna manera busca reducir todos los impactos ambientales negativos generados en el sector de la edificación. Dentro de este objetivo final se encuentran el avance y desarrollo de estudios para generar nuevos materiales y técnicas de construcción de menor impacto en la naturaleza, que reduzcan la generación de residuos, den un segundo uso a los materiales ya utilizados, y disminuyan las emisiones de CO₂, siendo este uno de los pilares de trabajo en este ámbito de investigación aplicada.

En este sentido se desarrolla esta Tesis Doctoral, en la que se busca el diseño de nuevos materiales derivados del yeso, mucho más eficientes, a los que se le añaden residuos inorgánicos -escorias blancas provenientes de desechos de la industria siderúrgica- que de otra manera serían transportados a vertederos y desperdiciados. El objetivo consiste en obtener productos con características mejoradas, disminuyendo la cantidad de materia prima virgen empleada en su formación y reutilizando desechos y residuos de otras industrias, logrando con ello menor impacto medioambiental.

Para alcanzar los objetivos de esta Tesis, se plantea el diseño y la caracterización de todas las materias primas que lo componen para probar su viabilidad, así como una caracterización de las mezclas de yeso-residuos tanto en estado fresco como en estado endurecido. Para la constatación de su aptitud en aplicaciones de obra reales, han realizado ensayos determinando las propiedades físicas,



químicas, mecánicas, térmicas, de absorción de agua o resistencia al fuego entre otras, de las mezclas elegidas.

La justificación de la elección del tema de investigación de este trabajo viene claramente argumentada por el tipo de residuo que se emplea, escorias generadas en la producción del acero, y por el amplio uso y posibilidades de aplicación en edificación del material de partida, que se pretende modificar y mejorar, el yeso para la construcción.

2.2. Producción del acero y generación de escorias

La producción de acero a nivel mundial según los informes de la industria siderúrgica se sitúa en torno a los 1885 millones de toneladas anuales en 2022,¹ un 4% menor comparado con el año anterior, siendo su mayor productor China, seguido muy de lejos por India, Japón, Estados Unidos y Rusia, como se refleja en las Figuras 2.1. y 2.2.

De la producción total mundial, un 52% del acero en 2022 fue destinado al sector de la edificación y construcción de infraestructuras, seguido con una proporción mucho menor por la industria manufacturera, con un 16%.

¹ World steel association. World Steel in Figures 2023.

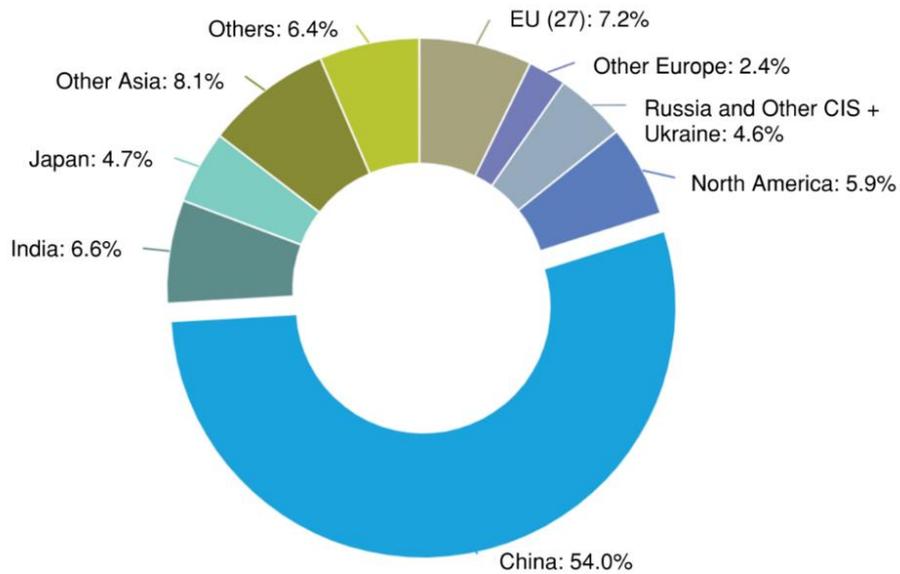


Figura 2.1. Utilización de acero en 2022 por sector económico. Fuente: WORLDSTEEL

Resulta relevante señalar que el acero como producto final es un material totalmente reciclable pudiéndose incluir en un contexto de material circular, mientras que no se puede decir lo mismo de las escorias generadas en el proceso de obtención del acero.

Durante la producción del acero, se añaden agentes desulfurantes y fundentes (principalmente piedra caliza, dolomita y arena de sílice) al alto horno o al horno de fabricación de acero para eliminar impurezas del mineral de hierro, chatarra de acero y otros materiales férricos. La escoria se encarga proteger el metal líquido del oxígeno externo y mantener su temperatura formando una capa sobre él. Dado que la escoria es más ligera que el metal líquido, flota y puede ser retirada fácilmente.

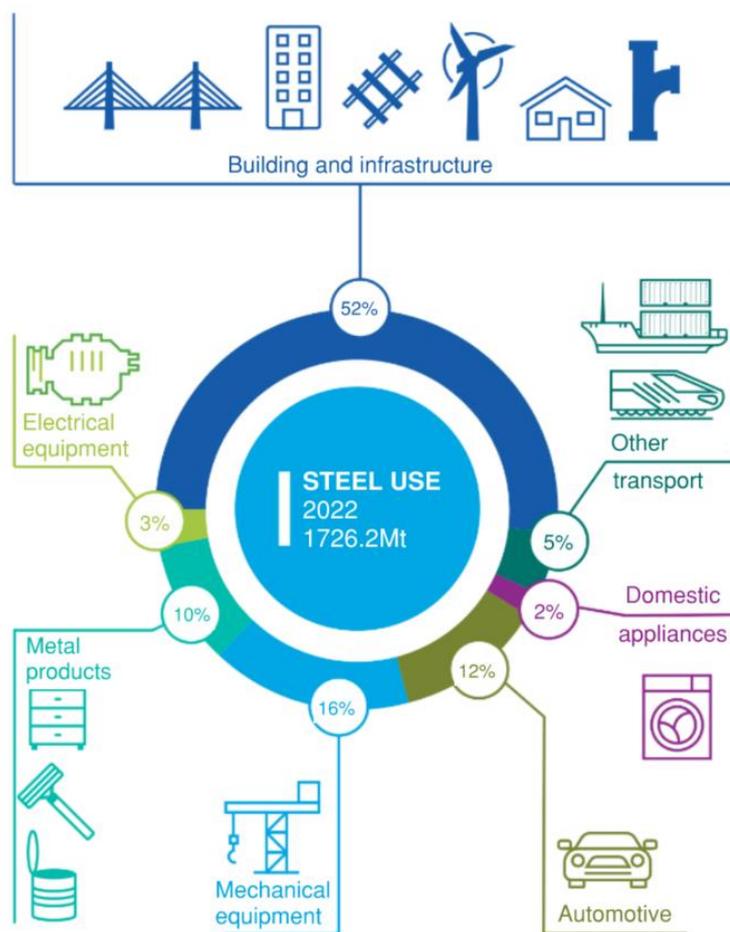


Figura 2.2. Utilización de acero en 2022 por sector económico.
Fuente: World Steel in Figures 2023.

De media, la producción de una tonelada de acero resulta en 200 kg subproducto de horno de arco eléctrico a 400 kg de subproductos de horno alto u horno de oxígeno básico. Estos subproductos incluyen escoria (90% en masa), polvo, lodo y otros materiales.²

² World steel association. Fact sheet, Steel industry co-products.



Dentro de los datos que se manejan a nivel de mercado europeo, según la Asociación Europea del Acero (EUROFER), en 2022 la producción de acero anual asciende a 152 millones de toneladas, con un impacto económico bruto anual de 130€ billones de euros.³

Buscando reducir la cantidad de residuos producida en la generación del acero que es llevada directamente a vertederos, la Unión Europea lleva años desarrollando normativas para que los estándares de producción sean inclusivos con el hecho de la generación simultánea de escorias. Este factor hace que se regule la calidad de las escorias generadas en el proceso de producción del acero. Algunas de las medidas para mejorar las propiedades de las escorias incluyen la selección de materiales de mayor pureza teniendo en cuenta la composición química final de las escorias, la elección de procesos de tratamiento de los materiales - como pueden ser un enfriamiento instantáneo o alargado en el tiempo - o la adición de arena u oxígeno a la mezcla para proporcionar a este subproducto propiedades adecuadas para poder ser reutilizada.⁴

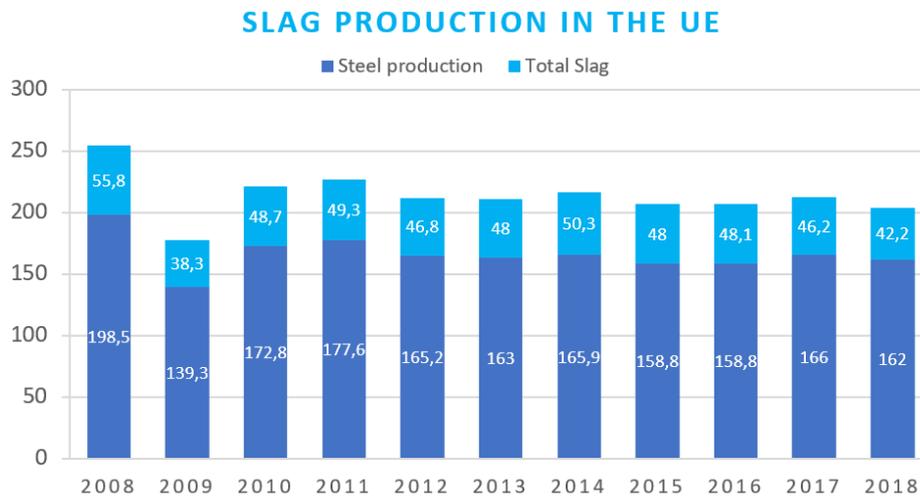
Pese a todos los esfuerzos empleados en la reducción de residuos en la generación del acero, todavía es inevitable que una parte de esos residuos sea directamente llevada a los vertederos. Hoy en día la generación de residuos producidos por la sociedad aumenta año a año, lo que incide en la problemática de la sociedad actual a nivel mundial. Este factor, sumado al escaso número de espacios de almacenaje de desecho de materiales, provoca un incremento de precios en la gestión de este tipo de subproductos.

³ EUROFER The European Steel association. European Steel in figures 2023.

⁴ H.Z. Yang, Z.C. Liu. Study on the strength of iron and steel smelting waste blast furnace slag. *Metalurgija*. Vol. 63, Issue 1, Pages 13 – 16. (2024).



Para determinar el impacto derivado de estos materiales a nivel europeo, y haciendo referencia al último informe publicado por EUROFER en 2018 (Figura 2.2.)³ los datos indican que la producción de escoria alcanzó un 26% en relación con la producción total de acero, un número muy relevante a tener en cuenta, y que justifica, por sí mismo, la línea planteada en este trabajo de investigación.



Gráfica 2.1. Producción y uso de escorias de acero en Europa 2008 - 2018.

Fuente: EUROFER

Dentro de todas las escorias derivadas de los distintos y numerosos procesos de fabricación del acero existentes, en esta Tesis Doctoral se han elegido escorias blancas de horno de cuchara (Ladle Furnace Slags - LFS), que son escorias generadas en el proceso de refinado del acero. El proceso de refinado llega después de fundirse el acero en un horno primario, y eliminar posteriormente la mayoría de las impurezas en un refinado adicional. En el proceso de refinado adicional se llevan a cabo las reacciones químicas necesarias para ajustar la composición del metal fundido y eliminar las impurezas restantes.



Las escorias empleadas en este Trabajo son precisamente las procedentes de este segundo refinado, lo que contribuye a garantizar una mayor calidad y homogeneidad del subproducto que se pretende valorizar.

2.3. Mezclas de yesos con incorporación de residuos orgánicos

Los productos ambientalmente favorables muestran una mejora en su desempeño ecológico. Integran residuos reciclados en su composición, lo que resulta en beneficios como la disminución de la utilización de recursos naturales y la reducción de las emisiones de CO₂. En términos generales, la inclusión de desechos añade un valor adicional que se refleja en las cualidades del producto pionero.

Uno de los materiales que más ha incrementado su producción en los últimos años son los polímeros. En 2021 su producción mundial se acercó a los 400 millones de toneladas.⁵ En Europa los polímeros más utilizados son el polipropileno (PP), el polietileno de baja densidad (PE-LD/-LDD) y el policloruro de vinilo (PVC), representando entre los tres el 43 % del total.⁶

La producción de desechos poliméricos aumenta a un ritmo vertiginoso, con aproximadamente el 50% de los polímeros convirtiéndose en residuos en menos de un mes.⁷ A nivel global, se estima que se generan 250 millones de toneladas de residuos poliméricos cada año, de los cuales solo el 35% se emplea siguiendo un enfoque de economía circular, el resto es desechado.⁸ Este hecho, ha dado pie a la investigación de los

⁵ Plastics Europe. (2022). Plastics - the Facts 2022.

⁶ Plastics Europe. (2021). Plastics - the Facts 2021. An analysis of European plastics production, demand and waste data.

⁷ Heinrich Böll Foundation. (2019). Plastic atlas 2019: Facts and figures about the world of synthetic polymers (second edition). Heinrich Böll Foundation.

⁸ The Conference Board. (2021). Plastic Solid Waste Management.



posibles riesgos e impacto que pueden tener estos materiales en la salud de los seres humanos, así como en la naturaleza.⁹

La comunidad científica ha reconocido la importancia de reducir esta gran cantidad de residuos poliméricos reciclados y se han desarrollado numerosas investigaciones en las que estos materiales son combinados con el yeso para la fabricación de materiales de construcción.

2.3.1. Polipropileno (PP)

Algunas de las investigaciones realizadas hasta el momento por Qiang Wang et al. han estudiado la incorporación de fibras de polipropileno en matriz de yeso donde se mejoran notablemente sus propiedades mecánicas, teniendo las fibras cortas de polipropileno un mejor efecto en la resistencia a compresión, pero no tan bueno en la resistencia a flexión.¹⁰ Romero-Gómez et al. en su investigación han logrado un incremento de la resistencia a flexión del 19% en las mezclas con un 2.5% de fibras de PP recicladas en comparación con la muestra de referencia.¹¹

La inclusión de polipropileno en yeso mejora no solo sus propiedades mecánicas, sino que también ha sido probado por el grupo de Yan et al. el aumento de la permeabilidad, pasando de un 8.6% a un 11.5%.¹²

⁹ M. R. Johansen, T. B. Christensen, T. M. Ramos, K. Syberg. A review of the plastic value chain from a circular economy perspective. *Journal of Environmental Management*. Vol. 302. (2022). <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113975>.

¹⁰ Q. Wang, Y. Cui, J. Xue. Study on the improvement of the waterproof and mechanical properties of hemihydrate phosphogypsum-based foam insulation materials. *Construction and Building Materials*. Vol. 230. (2020). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117014>

¹¹ M.I. Romero-Gómez, M.A. Pedreño-Rojas, F. Pérez-Gálvez, P. Rubio-de-Hita. Characterization of gypsum composites with polypropylene fibers from non-degradable wet wipes. *Journal of Building Engineering*. Vol. 34. (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101874>

¹² Y. Lu, X. Liu, K. Lü, Y. Li, K., F. Liu, P. Liu. Properties and Fracture Surface Features of Plaster Mold Reinforced with Short Polypropylene Fibers for Investment Casting. *International Journal of Metalcasting*. Vol. 15. Pages 700–709. (2021). <https://doi.org/10.1007/s40962-020-00505-3>



2.3.2. Polietileno (PE) y tereftalato de polietileno (PET)

Desde la Universidad Politécnica delle Marche, Ancona, Italia, se han desarrollado trabajos donde se emplean partículas de tereftalato de polietileno en enlucidos de yeso como sustitución del hasta un 100% de las materias primas como arena natural y relleno de piedra caliza. Aunque el reemplazo completo de residuo no ha sido la mezcla con los mejores resultados obtenidos, esta incorporación ha dado lugar a materiales respetuosos con el medio ambiente y con un comportamiento aislante mejor al producto inicial.¹³

Corinaldesi et al. Incluyen PET triturado en mezclas de yeso, alcanzando reducciones en el coeficiente de conductividad térmica de hasta el 75% en reemplazos del 62% del PET por conglomerante yeso, en comparación con muestras de referencia. En este caso el polímero se pulveriza y se refuerza con fibra de vidrio y partículas de desechos de madera. La misma dosificación experimenta una reducción del 82% en la permeabilidad al vapor de agua y una reducción de la densidad del 65%.¹³

En el departamento de Ingeniería Civil de la *Technical University of Denmark (DTU)* se ha analizado la incorporación de residuos de polietileno procedente de las redes de pesca como refuerzo de fibra en materiales a base de yeso. Las propiedades mecánicas estudiadas se encuentran en el mismo rango que el de otras fibras sintéticas comerciales estudiadas, siendo la ductilidad la propiedad a destacar, ya que se logró un aumento positivo en el rendimiento post fisura del material.¹⁴

¹³ V. Corinaldesi, J. Donnini, A. Nardinocchi. Lightweight plasters containing plastic waste for sustainable and energy-efficient building. *Construction and Building Materials*. Vol. 94. Pages 337-345. (2015). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.069>

¹⁴ I.M.G. Bertelsen, L.M. Ottosen. Recycling of Waste Polyethylene Fishing Nets as Fibre Reinforcement in Gypsum-based Materials. *Fibers and Polymers*. Vol. 23. Pages 164-174. (2022). <https://doi.org/10.1007/s12221-021-9760-3>



2.3.3. Poliestireno expandido (EPS) y extruido (XPS)

Desde la Universidad Politécnica de Madrid, el Grupo de Investigación de Tecnología Edificatoria y Medio Ambiente (TEMA) ha estudiado la inclusión de residuo de poliestireno expandido (EPS) combinado con residuos cerámicos en matriz de yeso, dando lugar a productos que mejoran la dureza superficial en torno a un 22%, a la vez que se consigue una reducción de la absorción de agua por capilaridad del 32%.¹⁵ En la misma línea se ha considerado la incorporación de residuos de poliestireno extruido (XPS) en yesos aligerados, logrando una reducción en las prestaciones mecánicas y densidad del 25%, al mismo tiempo que se consigue una mejora en el comportamiento térmico del producto final del 62% con una sustitución del 4% de yeso por XPS.¹⁶

En general una de las ventajas más beneficiosas de los materiales con incorporación de residuos de poliestireno es su ligereza, donde en placas del mismo espesor que el material de referencia la reducción en peso por m² puede llegar a ser de hasta el 55%, lo que facilita el traslado e instalación en obra del producto final.¹⁷

Combinando poliestireno con papel y poliéster en matrices de yeso, el grupo de Sameh et al. han logrado la optimización

¹⁵ M. del Río Merino, J. Santa Cruz Astorqui, P. Villoria Sáez, R. Santos Jiménez., M. González Cortina. Eco plaster mortars with addition of waste for high hardness coatings. *Construction and Building Materials*. Vol.158. Pages 649–656. (2018). <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2017.10.037>

¹⁶ A. San-Antonio-González, M. Del Río Merino, C. Viñas Arrebola, P. Villoria-Sáez. Lightweight material made with gypsum and extruded polystyrene waste with enhanced thermal behaviour. *Construction and Building Materials*. Vol. 93. Pages 57–63. (2015). <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2015.05.040>

¹⁷ F. J. González Madariaga, J. Lloveras Macia. Mezclas de residuos de poliestireno expandido (EPS) conglomerados con yeso o escayola para su uso en la construcción. *Informes De La Construcción*. Vol.60, 509. Pages 35-43 (2008). <https://doi.org/10.3989/ic.2008.v60.i509.589>



de las propiedades mecánicas y físicas de este material. Tomando como referencia una muestra de yeso sin incorporación de residuos, los resultados obtenidos muestran un aumento notable de la resistencia a flexión, de hasta 5.75MPa, así como un incremento de la absorción de agua de hasta el 96%. Por el contrario, la caída en densidad del material hace que éste sea más aislante y ligero, sumado a una reducción de la velocidad de propagación del sonido y de la conductividad térmica del 34% y 40.5% respectivamente.¹⁸

2.3.4. Poliuretano

Una de las alternativas más beneficiosas para el medio ambiente ha sido la consideración de la incorporación de residuos de poliuretano reciclados en materiales de construcción, lo que mejora su sostenibilidad y les concede un valor añadido.¹⁹ En los últimos cinco años en número de estudios con relevancia sobre este tema ha aumentado un 400% en comparación con periodos similares anteriores, lo que deja vigente el interés de los investigadores en la inclusión de este tipo de residuos en productos de construcción.²⁰

Desde el Departamento de Ingeniería de Materiales y Química de la Universidad Técnica de Praga se han llevado a cabo estudios que han demostrado que la incorporación de espuma de poliuretano en morteros da lugar a productos con

¹⁸ S. Balti, A. Boudenne, L. Dammak, N. Hamdi. Mechanical and thermophysical characterization of gypsum composites reinforced by different wastes for green building applications. *Construction and Building Materials*. Vol. 372. (2023). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130840>

¹⁹ V. Calderón, S. Gutiérrez-González, J. Gadea, Á. Rodríguez, C. Junco. Construction Applications of Polyurethane Foam Wastes. *Recycling of Polyurethane Foams*. Pages 115–125. (2018). <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-51133-9.00010-3>

²⁰ B. Samali, S. Nemati, P. Sharafi, F. Tahmoorian, F. Sanati. Structural performance of polyurethane foam-filled building composite panels: A state-of-the-art. *Composite Science*. Vol. 3. (2019). <https://doi.org/10.3390/jcs3020040>



una reducción en su resistencia mecánica, 2.9MPa a 7 días, al mismo tiempo se consigue un producto con la mejor conductividad térmica de todos los productos estudiados, 0.211W/mK.²¹ La inclusión de poliuretano en morteros ha dado lugar a compuestos que pueden ser utilizados para fines constructivos ya que cumplen con todas las normativas, a la vez que se consigue un bajo impacto ambiental.

Residuos del sector automotriz formados por poliuretano mezclado con cartón y fibras de vidrio también ha sido estudiados como sustitutos del yeso. En esta línea de investigación las muestras han sido sometidas a ensayos de resistencia a flexión, compresión, densidad aparente, dureza superficial y adherencia. Los resultados obtenidos reflejan que se puede añadir hasta un 11% de residuos variados superando los valores mínimos establecidos en las regulaciones, logrando además materiales más ligeros con un mejor comportamiento a flexión y compresión en comparación con las muestras de referencia sin inclusión de residuos.²²

2.3.5. Poliamidas

Se ha considerado la adición de residuos de poliamida en mezclas de yeso, donde se registra un descenso de las propiedades mecánicas y densidad unido a un aumento de la resistencia térmica y permeabilidad. En muestras con una ratio en volumen 4/1 poliamida/yeso se ha dado un descenso de la resistencia a compresión de hasta un 91% a 28 días con una disminución de la densidad de 53%, al mismo tiempo que se

²¹ M. Doleželová, L. Scheinherrová, J. Krejsová, M. Keppert, R. Černý, A. Vimmrová. Investigation of gypsum composites with different lightweight fillers. *Construction and Building Materials*. Vol. 297. (2021). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123791>

²² A. Asadi Ardebili, P. Villoria Sáez, M. González Cortina, D. M. Tasán Cruz, Á. Rodríguez Sáiz, E. Atanes-Sánchez. Mechanical characterization of gypsum mortars with waste from the automotive sector. *Construction and Building Materials*. Vol. 310. (2023). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130675>



consigue un aumento del 54% de la resistencia térmica, obteniendo una permeabilidad superior al 100% en comparación con la muestra de referencia.²³

Los resultados obtenidos por Gutiérrez-González et al. han sido validados por Romero-Gómez et al. en estudios realizados donde fibras de nailon se introducen en la matriz de yeso. En esta investigación se analizó además la influencia de la inclusión de las fibras en dos longitudes diferentes, 20-25mm y 10-12.5mm. Los resultados obtenidos muestran que las fibras de mayor longitud tienen mejores resultados en comparación con las muestras de referencia que las muestras de fibras 10-12.5mm de longitud, llegando a obtener una mejoría en la resistencia a flexión y a compresión de 7.5% y 17% respectivamente al utilizar un 2% en peso de fibras comprado con el material de referencia.²⁴

La inclusión de fibras de poliamidas en matrices de yeso y su consecuente reducción de ciertas propiedades mecánicas, como puede ser la resistencia a flexión y a compresión, a medida que aumenta la concentración de fibras es explicada por Eve et al.²⁵. La presencia de estas fibras absorbentes de agua en la mezcla impide la hidratación de los granos de yeso cercanos a las fibras y altera la generación de los dihidratos resultando en una interfaz débil entre la matriz y la fibra, siendo el primer daño la fisuración de la matriz.

²³ S. Gutiérrez-González, J. Gadea, A. Rodríguez, M. T. Blanco-Varela, V. Calderón. Compatibility between gypsum and polyamide powder waste to produce lightweight plaster with enhanced thermal properties. *Construction and Building Materials*. Vol. 34. Pages 179–185. (2012). <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2012.02.061>

²⁴ M.I. Romero-Gómez, R.V. Silva, I. Flores-Colen, P. Rubio-de-Hita. Mechanical performance of waste fishing net fibre-reinforced gypsum composites. *Construction and Building Materials*. Vol. 387. (2023). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131675>

²⁵ S. Eve, M. Gomina, A. Gmouh, A. Samdi, R. Moussa, G. Orange. Microstructural and mechanical behaviour of polyamide fibre-reinforced plaster composites. *Journal of the European Ceramic Society*. Vol. 22. Pages 2269-2275. (2002). [https://doi.org/10.1016/S0955-2219\(02\)00014-6](https://doi.org/10.1016/S0955-2219(02)00014-6)



2.4. Mezclas de yesos con incorporación de residuos inorgánicos.

En los últimos años, el aumento en la actividad edificatoria ha llevado consigo una generación masiva de residuos de construcción y demolición (RCD), llegándose a producir casi 25 millones de toneladas de residuos en España en 2020.²⁶ Esto, como en el caso de los residuos poliméricos, tiene un efecto nocivo para la sociedad, el medio ambiente y las personas, lo que justifica el desarrollo de estudios e investigaciones sobre su reciclaje y reutilización.

Entre los beneficios de añadir residuos inorgánicos al yeso que los distintos investigadores han encontrado está la mejora de propiedades mecánicas, la capacidad de protección contra la radiación y la adsorción de gases nocivos.

2.4.1. Ladrillo

Dentro de los residuos de construcción y demolición, algunas de estas investigaciones se han centrado en analizar el impacto que tienen los residuos inorgánicos de ladrillo rojo cuando se incorporan como parte del conglomerante en materiales de construcción. Los resultados obtenidos de estos estudios reflejan una mejora en la absorción capilar de agua, la dureza superficial y la adherencia en comparación con los

²⁶ Asociación española de reciclaje de residuos de construcción y demolición. Informe de Producción y Gestión de Residuos de Construcción y Demolición (RCD) en España. Resumen del periodo 2016-2020.



morteros sin adiciones,^{27,28} al mismo tiempo que se registra una reducción del módulo de elasticidad en los morteros con agregado reciclados cerámicos de hasta un 30% y una mayor resistencia al desgaste,²⁹ así como una disminución del 20-30% del tiempo de fraguado de la mezcla.³⁰

La estabilidad dimensional también mejora, ya que se reduce la contracción por secado del yeso, lo que minimiza la formación de grietas y asegura una mejor integridad estructural a largo plazo. Este factor contribuye a una mejora frente a condiciones climáticas adversas, haciéndolo más adecuado para aplicaciones exteriores.

2.4.2. Fibras naturales de madera

Según los estudios llevados a cabo por Kugo et al. sobre las propiedades mecánicas, incluyendo resistencia a flexión, compresión, y resistencia al impacto, así como la dureza del yeso compuesto con fibras de madera de pino, se determina que los compuestos que contienen hasta un 2% de fibra de madera desarrollan una resistencia a flexión y compresión mejorada de casi un 30%; sin embargo, una adición mayor de fibras empeoró estas propiedades. Las pruebas de dureza superficial indicaron que las fibras de madera más pequeñas

²⁷ M. Del Rio, R. Santos, M. González, J. Santa Cruz, J. García, P. Villoria Sáez. Preliminary study of the mechanical behavior of gypsum plastering mortars with ceramic waste additions. *Materials in Civil Engineering*. Vol. 34. (2021). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.000407](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.000407)

²⁸ J. Silva, J. de Brito, R. Veiga. Recycled Red-Clay Ceramic Construction and Demolition Waste for Mortars Production. *Materials in Civil Engineering*. Vol. 22. (2010). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2010\)22:3\(236\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2010)22:3(236))

²⁹ G. Mellman, U. Meinhold, M. Maultzsch. Processed concrete rubble for the reuse as aggregates. *Exploiting Wastes in Concrete*. (1999). Thomas Telford, London, 171–178.

³⁰ Q. Chen, Q. Zhang, C. Qi, A. Fourie, C. Xiao. Recycling phosphogypsum and construction demolition waste for cemented paste backfill and its environmental impact. *Cleaner Production*. Vol. 186. Pages 418-429. (2018). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.131>



son más efectivas para transferir la carga a pequeña escala y, por lo tanto, pueden mejorar la resistencia localizada.³¹

Unas conclusiones muy parecidas fueron obtenidas por el equipo investigador de la Facultad de Ingeniería Civil de Ostrava-Poruba de la República Checa, donde se demostró que sobrepasando los valores medios la reducción en la resistencia a compresión y flexión es literalmente dependiente de la cantidad de fibras de madera introducidas en la muestra base. Con la adicción del 7.50% en peso de fibras de madera respecto a la fracción de yeso, la resistencia a la compresión se reduce en un 78% y la resistencia a la flexión en un 55%.³²

2.4.3. Fibras de vidrio

Otro de los materiales cuyos residuos se utilizan como incorporación en compuestos a base de yeso son las láminas de fibra de vidrio. La adición de fibras a la matriz puede modificar el comportamiento del material evitando un comportamiento puramente frágil y aumentando la resistencia a la flexión.

Esto ha sido demostrado por el equipo de Gonçalves, de la Universidade Nova de Lisboa, donde se prueba que la adición de fibras de vidrio no solo facilita una deformación plástica considerable del compuesto, sino que también aumenta su resistencia a flexión. En este estudio se ha diferenciado y estudiado el comportamiento de fibras de vidrio tradicionales frente a fibras de vidrio recicladas, mostrando los resultados que la adicción de fibras recicladas evita un comportamiento frágil del material y aumenta la resistencia a flexión un 66% cuando se

³¹ A. Kuqo, C. Mai. Mechanical properties of lightweight gypsum composites comprised of seagrass *Posidonia oceanica* and pine (*Pinus sylvestris*) wood fibers. *Construction and Building Materials*. Vol. 282. (2021). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122714>

³² M. Hošťáková, N. Vavřínová, V. Longauerová. Mechanical properties of the gypsum composite reinforcement with wooden fibers. *International Review of Applied Sciences and Engineering*. Vol 10. Pages 15-21. (2019). <https://doi.org/10.1556/1848.2019.0003>



añade un 6% en peso. La incorporación de fibras de vidrio comerciales permite una deformación plástica masiva del compuesto al mismo tiempo que consigue un incremento de casi el 290% de su resistencia a flexión cuando se incorpora una proporción en masa de fibras de vidrio del 12% de conglomerante.³³

El grupo de Rovero, Galassi y Misseri han analizado la adherencia entre el ladrillo y los compuestos estudiados formados por una red de fibra de vidrio integrada en la matriz de yeso o de cemento. Como era de esperar, los resultados obtenidos reflejan que el compuesto formado a base de yeso muestra cargas máximas más elevadas y un comportamiento más frágil en comparación con la respuesta del compuesto en base cemento.³⁴

2.5. Incorporación de residuos de escoria en materiales en base cemento.

La investigación relativa a la incorporación de escorias como sustitutos de parte del conglomerante en base cemento son extensas y con un elevado recorrido a lo largo de los últimos 20 años.³⁵ Sus amplios usos y aplicaciones han sido demostrados en múltiples investigaciones dónde las características del material inicial han sido mejoradas con la incorporación de

³³ R.M. Gonçalves, A. Martinho, J.P. Oliveira. Evaluating the potential use of recycled glass fibers for the development of gypsum-based composites. *Construction and Building Materials*. Vol. 321. (2022). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126320>

³⁴ L. Rovero, S. Galassi, G.Misseri. Experimental and analytical investigation of bond behavior in glass fiber-reinforced composites based on gypsum and cement matrices. *Composites Part B: Engineering*. Vol. 194. (2020). <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108051>

³⁵ J. M. Manso, M. Losañez, J.A. Polanco, J.J. González. Ladle furnace slag in construction. *Materials in Civil Engineering*. Vol. 17. (2005). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2005\)17:5\(513\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2005)17:5(513))



escorias como parte del conglomerante, dado el carácter puzolánico que puede llegar a desarrollar este residuo³⁶

Como ejemplo de esta mejora, en el estudio llevado a cabo por Adediran et al. se estudia la inclusión de escoria de fayalita, de horno de cuchara y de alto horno. Los resultados demuestran que la incorporación de escorias de cuchara y alto horno como fuentes adicionales de aluminio y calcio impactan positivamente el comportamiento de los morteros a altas temperaturas, mostrando mejores resultados que los morteros que fueron mezclados con escorias de fayalita.³⁷

Siguiendo los resultados de Adediran et al., uno de los grupos más destacados en este ámbito de aplicación, el grupo de la Dra. Puertas ha resaltado en sus conclusiones la importancia de la procedencia y de la naturaleza de las escorias que se emplean, ya que los resultados obtenidos pueden variar en gran medida. En su caso, estudian la inclusión de escoria en la matriz de cemento no como agregado sino como sustitución directa del conglomerante y sin aditivos, con sustituciones entre un 25% y un 50% y una relación agua/cemento de 1. En general, los resultados obtenidos muestran una mejora en la trabajabilidad de todas las muestras estudiadas, mientras que las propiedades mecánicas no se pueden considerar homogéneas, ya que dependen en su mayor parte en el tipo de escoria utilizada. Un ejemplo han sido los resultados obtenidos en la resistencia a compresión donde pueden variar de un 35% de mejora a un 85% de reducción en comparación con la muestra de referencia, en este caso

³⁶ A. Lübeck, A.L.G. Gastaldini, D.S. Barin, H.C. Siqueira. Compressive strength and electrical properties of concrete with white Portland cement and blast-furnace slag. *Cement and Concrete Composites*. Vol. 34. Pages 392-399. (2012). <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.11.017>

³⁷ A. Adediran, J. Yliniemi, S. Moukannaa, D.D. Ramteke, P. Perumal, M. Illikainen. Enhancing the thermal stability of alkali-activated Fe-rich fayalite slag-based mortars by incorporating ladle and blast furnace slags: Physical, mechanical and structural changes. *Cement and Concrete Research*. Vol. 166. (2023). <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2023.107098>



debido a la cantidad de SiO_2 contenido en la muestra de escoria y su tratamiento inicial antes de su utilización.³⁸

2.6. Incorporación de residuos de escoria en materiales en base yeso y resultados previos del grupo de investigación

Pese a la enorme cantidad de escorias generadas a nivel mundial anualmente y sus extendidos usos, no existe prácticamente bibliografía sobre adición de escorias blancas de horno de cuchara en la fabricación de conglomerantes a base de yeso. Sin embargo, por otro lado, se destaca la posibilidad de añadir materiales que contengan cal a yesos y escayolas según recoge el nuevo Reglamento Europeo sobre Yesos de Construcción, lo que da pie a la creación de yesos marcados como Tipo B.³⁹

En esta línea, Hagiri y Honda analizan la adición de escoria de cobre en pastas de yeso. El residuo que emplean proporciona una capacidad de protección contra la radiación que podría permitir la protección contra los rayos X, demostrando que los compuestos desarrollados podrían tener aplicaciones como materiales estructurales y podrían fomentar el uso futuro de escoria de cobre y yeso.⁴⁰

Otro de los estudios relevantes, de Kielé et al. Cuyas investigaciones se centran en enlucidos basado en compuestos alcalinos activados, incluyen mezclas de composición de escoria granulada de alto horno molida activada

³⁸ F. Pérez-García, M.E. Parron-Rubio, J. García-Manrique, M.D. Rubio-Cintas. Study of the suitability of different types of slag and its influence on the quality of green grouts obtained by partial replacement of cement. *Materials*. Vol. 12. (2019). <https://doi.org/10.3390/ma12071166>

³⁹ Asociación Española de Normalización (AENOR) (2014). UNE-EN ISO 13279. Yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción.

⁴⁰ M. Hagiri, K. Honda Preparation and evaluation of gypsum plaster composited with copper smelter slag. *Cleaner Engineering and Technology*. Vol. 2. (2021), 100084 <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100084>



alcalinamente, con la adición de fosfoyeso, arena y fibra de polipropileno. Una vez expuestas a una temperatura de 1000 °C, presentan hasta un 2% de contracción en la dimensión longitudinal. Después de la exposición a la temperatura elevada, estas fibras se derriten dejando una red de canales que permiten que el vapor de agua se evapore y la presión interna en el material disminuya. Adicionalmente, el empleo de aglutinantes alcalinos activados sirve de revestimiento ignífugo y como capa de barrera para aumentar la seguridad pasiva de las estructuras en los edificios.⁴¹

Una de las líneas de trabajo más activas en este campo de conocimiento, viene avalada por el Grupo de Investigación de Ingeniería de la Edificación de la Universidad de Burgos, dentro del que se desarrolla este trabajo de investigación. La experiencia previa del grupo cuenta con varios años trabajando en mitigar el efecto nocivo que conlleva la disposición de residuos en vertedero, incorporándolos en la fabricación de productos de yeso y teniendo como objetivo la obtención de materiales con características mejoradas como pueden ser su resistencia al fuego o durabilidad.⁴² Estos estudios están siendo realizados en materiales donde la sustitución del yeso por escorias de horno eléctrico de arco u horno de cuchara pueden llegar hasta un 75% del total del conglomerante.⁴³

Estas sustituciones dependen de las características de cada uno de los productos, pero siempre se garantiza que las propiedades finales en estado endurecido del producto

⁴¹ A. Kielé, D. Vaičiukynienė, G. Tamošaitis, R. Bistrickaitė. Thermal Properties of Alkali Activated Slag Plaster for Wooden Structures. *Scientific Reports*. Vol. 10. Issue 11. (2020). Article number 726. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-57515-8>

⁴² A. Rodríguez, A. Gutiérrez-González, M.I. Prieto, A. Cobo, V. Calderón. Analysis of long-term corrosion behavior in mortars containing recycled ladle furnace slag using computerized tomography and SEM. *Materials Corrosion*, Vol. 66. Pages 199-205. (2015). <https://doi.org/10.1002/maco.201407697>

⁴³ A. Rodríguez, S. Gutiérrez-González, M. Horgnies, V. Calderón. Design and properties of plaster mortars manufactured with ladle furnace slag. *Materials & Design (1980-2015)*. Vol. 52. Pages 987-994. (2013). <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.06.041>



obtenido cumplan con la normativa correspondiente,⁴⁴ se puedan aplicar como prefabricados de grandes dimensiones,⁴⁵ y dispongan de propiedades reológicas de las pastas lo suficientemente manejables.⁴⁶

A la vista de la escasez de trabajos de investigación en los que se aborda la incorporación de escorias en materiales exclusivamente en base yeso, resultan prácticamente inexistentes las experiencias previas de productos encaminados a una aplicación final en obra real, así como la determinación de la huella medioambiental, líneas que también se abordan y se justifican a lo largo del desarrollo de esta Tesis Doctoral.

2.7. Análisis medioambiental

Basado en el creciente reconocimiento de la importancia de evaluar y abordar el impacto ambiental de los productos en todas las etapas de su ciclo de vida, desde la extracción de materias primas hasta la fabricación, la distribución, el uso y la disposición final, se destinan cada vez más recursos y tiempo en la investigación de las decisiones de diseño y producción que afectan al medio ambiente y a la sostenibilidad a largo plazo.

⁴⁴ J. García-Cuadrado, I. Santamaría-Vicario, A. Rodríguez, V. Calderón, S. Gutiérrez-González. Lime-cement mortars designed with steelmaking slags as aggregates and validation study of their properties using mathematical models. *Construction and Building Materials*, Vol. 188. Pages 210-220. (2018). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.093>

⁴⁵ I. Santamaría-Vicario, Á. Alonso-Díez, M. Horgnies, Á. Rodríguez-Saiz. Properties of gypsum mortars dosed with LFS for use in the design of prefabricated blocks. *New Technologies in Buildings and Construction*. Vol 258. Pages 265-282. (2022). https://doi.org/10.1007/978-981-19-1894-0_15

⁴⁶ S. Gutiérrez-González, M.M. Alonso, J. Gadea, A. Rodríguez, V. Calderón. Rheological behaviour of gypsum plaster pastes with polyamide powder wastes. *Construction and Building Materials*. Vol. 38. Pages 407-412. (2013). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.08.034>



Este cambio de enfoque se ha visto impulsado por una serie de factores, incluyendo la creciente conciencia pública sobre los problemas ambientales, la presión regulatoria para disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero y minimizar los residuos, así como la demanda de los consumidores de productos más sostenibles y responsables basados en estudios recientes de investigación.^{47, 48, 49}

En este contexto, la construcción juega un papel crucial. La edificación ha sido tradicionalmente una actividad intensiva en recursos y energía, con una huella ambiental significativa.^{50,51} A nivel europeo, los inmuebles generan el 36% de las emisiones de dióxido de carbono, agotan el 50% de los recursos naturales extraídos y utilizan aproximadamente el 40% de la energía total demandada.⁵² Sin embargo, en los últimos años, ha habido un cambio hacia prácticas más sostenibles y tecnologías más limpias en esta industria.

⁴⁷ A. Rodrigo-Bravo, L. Alameda Cuenca-Romero, V. Calderón, Á. Rodríguez, S. Gutiérrez-González. Comparative Life Cycle Assessment (LCA) between standard gypsum ceiling tile and polyurethane gypsum ceiling tile. *Energy and Buildings*. Vol. 259. (2022). <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.111867>

⁴⁸ C. Moretti, L. Hamelin, L.G. Jakobsen, M.H. Junginger, M.M. Steingrimsdottir, L. Høibye, L. Shen. Cradle-to-grave life cycle assessment of single-use cups made from PLA, PP and PET. *Resources, Conservation and Recycling*. Vol. 169. (2021). <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105508>

⁴⁹ L.J. Rodríguez, S. Fabbri, C.E. Orrego, M. Owsianiak. Comparative life cycle assessment of coffee jar lids made from biocomposites containing poly (lactic acid) and banana fiber. *Journal of Environmental Management*. Vol. 266. (2020). <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110493>

⁵⁰ Y. Chang, R.J. Ries a, Y. Wang. Life-cycle energy of residential buildings in China. *Energy Policy*. Vol. 62. Pages 656-664. (2013). <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.07.053>

⁵¹ E. Yılmaz, H. Arslan, A. Bideci. Environmental performance analysis of insulated composite facade panels using life cycle assessment (LCA). *Construction and Building Materials*. Vol 202. pages 806-813. (2019). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.057>

⁵² Y. Niu, K. Rasi, M. Hughes, M. Halme, G. Fink. Prolonging life cycles of construction materials and combating climate change by cascading: The case of reusing timber in Finland. *Resources, Conservation and Recycling*. Vol. 170. (2021). <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105555>



Durante el proceso de evolución de la sociedad hacia el desarrollo e implementación de sistemas de construcción más eficientes se han desarrollado una serie de herramientas y metodologías que permiten contabilizar el impacto ambiental del sistema constructivo utilizado. Algunas de estas herramientas son certificaciones que evalúan de una manera cuantitativa el impacto en el ecosistema de método de construcción empleado para la obtención del producto final.⁵³

La primera de estas certificaciones se designa como LEED (Leadership in Energy and Environmental Design - Liderazgo en Energía y Diseño Ambiental). Se trata de un sistema de certificación de edificaciones desarrollado por U.S. Green Building Council para promover prácticas de construcción sostenible.

El sistema de certificación LEED se basa en la evaluación sostenible de edificios basados en su diseño, sistema constructivo y gestión y mantenimiento de los mismos. Entre las categorías de caracterización de una edificación está la ubicación de la misma, si está bien ubicada y con acceso al transporte público, eficiencia en el uso del agua y la implementación de tecnologías para la conservación de este bien, la elección de materiales sostenibles para su construcción, o la utilización de energías renovables para su mantenimiento.

En función de los puntos obtenidos en la valoración del edificio basado en los criterios anteriormente mencionados, se pueden obtener diferentes niveles de certificación – Certificado, Plata, Oro o Platino.

Otro sistema de certificación conocido internacionalmente, también empleado para promover sistemas constructivos

⁵³ M. Vidaurre-Arbizu, S. Pérez-Bou, A. Zuazua-Ros, C. Martín-Gómez. From the leather industry to building sector: exploration of potential applications of discarded solid wastes. *Journal of Cleaner Production*. Vol. 291. (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.125960>



sostenibles es el PassivHaus. Se trata de una verificación externa que proporciona un sello de garantía de calidad que acredita que el edificio cumple con altos niveles de rendimiento y confort. Se basa en cinco principios fundamentales que guían el diseño, la construcción y el mantenimiento del edificio, y son los siguientes:

1. *Aislamiento térmico*, se busca tener una envolvente térmica en el edificio con gran cantidad de aislamiento, buscando minimizar las pérdidas de calor en invierno y reducir las ganancias de calor en verano.
2. *Hermeticidad al aire*, se persigue la construcción de edificios herméticos para evitar las fugas de aire no controladas que puedan comprometer la eficiencia energética del sistema.
3. *Ausencia de puentes térmicos*, ya que son los puntos de la envolvente donde se producen las transferencias de calor no deseadas.
4. *Carpinterías de altas prestaciones*, tratándose de los puntos débiles de la envolvente hay que reducir la transmisión de energía en los lugares donde son instaladas.
5. *Ventilación mecánica con recuperación de calor*, con el fin de reaprovechar la temperatura del aire interior para precalentar o enfriar el aire limpio entrante antes de expulsar el aire viciado al exterior.

Otra de las herramientas empleadas para analizar el rendimiento ambiental de los materiales de construcción es el Análisis del Ciclo de Vida (ACV), que es el que se ha seguido en la determinación de la huella ecológica de los productos obtenidos en esta Tesis Doctoral. Consiste en la evaluación ambiental siguiendo la normativa europea que determina el marco de referencia y los principios a utilizar en las normas UNE-



EN ISO 14040⁵⁴ y UNE-EN ISO 14040:2006/A1,⁵⁵ así como las directrices y requisitos para llevar a cabo el análisis en UNE-EN ISO 14044⁵⁶ y UNE-EN ISO 14044:2006/A1.⁵⁷

Esta valoración es uno de los objetivos claves y diferenciadores de este Trabajo, donde la reducción de las emisiones de carbono en la fabricación de placas prefabricadas de escayola cuando son creadas incorporando residuos de la industria metalúrgica resulta un fato crítico para las posibilidades finales de aplicación.

Siendo los materiales de construcción sostenibles una de las áreas de innovación e investigación que reciben mayor atención e inversión en la actualidad, y, si bien aún son escasos, ya existen trabajos de investigación conducentes a evaluar el impacto de la huella de carbono que dejan a lo largo de su vida útil. De hecho, ya existen estudios que determinan la reducción y absorción de dióxido de carbono, a través de la carbonatación de la escoria de acero utilizada en la producción de materiales de construcción a base de yeso.⁵⁸

El término de análisis de ciclo de vida fue utilizado por primera vez en la década de 1990 por la Sociedad de Toxicología y Química Ambiental (SETAC). En la actualidad sirve como método de evaluación del grado de sostenibilidad del producto o proceso donde se calcula su huella ambiental. Para

⁵⁴Asociación Española de Normalización (AENOR). (2006). UNE-EN ISO 14040 Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Principios y marco de referencia.

⁵⁵Asociación 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.

⁵⁶Asociación Española de Normalización (AENOR). (2006). UNE-EN ISO 14044 Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Requisitos y directrices.

⁵⁷Asociación Española de Normalización (AENOR). (2017). UNE-EN ISO 14044:2006/A1 Gestión ambiental. Evaluación del ciclo de vida. Requisitos y directrices. Modificación 1.

⁵⁸X. Wang, W. Ni, J. Li, S. Zhang, M. Hitch, R. Pascual. Carbonation of steel slag and gypsum for building materials and associated reaction mechanisms. *Cement and Concrete Research*. Vol. 125. (2019). <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105893>



ello se realiza un inventario y el examen de los aspectos ambientales durante todo el ciclo de vida del producto o sistema en cuestión. El análisis se desglosa en cuatro etapas interconectadas: establecimiento de objetivos y alcance, inventario, evaluación de impacto e interpretación.

El ACV basa su proceso de toma de decisiones sobre la sostenibilidad de un producto o proceso en la evaluación de todos los aspectos ambientales relacionados con su ciclo de vida completo. En este análisis no solo se incluyen la contaminación del aire y agua o las emisiones de gases de efecto invernadero, sino que engloba también el uso de recursos naturales, la energía consumida en cada etapa y los residuos generados desde la extracción de materias primas a su disposición final. En esta investigación el software utilizado para el cálculo del impacto del ACV es SimaPro.



Objetivos



CAPÍTULO 3. OBJETIVOS

3.1. Objetivos generales

El objetivo principal de esta Tesis Doctoral se basa en el estudio amplio, desde la fabricación hasta su puesta en obra, de placas prefabricadas de escayola reforzadas con residuos procedentes de acerías. Asimismo, se analiza la reducción de la huella de carbono de estos materiales con respecto a las placas de yeso tradicionales, y se determinan los posibles usos finales.

Se busca la reducción del impacto final, disminuyendo la cantidad de emisiones generadas durante la fabricación de placas de yeso para construcción, y se explora la obtención de materiales más amigables con el medio ambiente que permitan, además, prestaciones añadidas.

3.2. Objetivos específicos

- Obtener placas de yeso técnicamente viables que incorporen grandes cantidades de residuos de acería (escorias). La evaluación se realiza determinando las propiedades físicas, mecánicas y de durabilidad acorde a la normativa vigente.
- Establecer resultados complementarios de caracterización menos habituales pero necesarios para la validación final del producto, como son la conductividad térmica a distintas temperaturas, la reacción y resistencia frente al fuego y las variaciones del color en función de la cantidad de residuo añadido.
- Estudiar el comportamiento de placas de yeso recicladas en perfiles reales con el fin de parametrizar la aplicación a



escala, gracias a las conclusiones obtenidas de estos demostradores.

- Calcular el análisis del ciclo de vida y la huella de carbono de fabricación de estos materiales, variando el contenido en residuo en la matriz de la placa de yeso, lo que permite registrar una carta de posibles dosificaciones y evaluar el impacto ambiental correspondiente.
- Elaborar una comparativa del comportamiento ambiental general por el producto innovador en comparación con el material de referencia. Estudiar el incremento o reducción del impacto ambiental de ambos productos.
- Determinar, desde una perspectiva realista, posibles usos y aplicaciones de los productos finales, con relación a las propiedades añadidas de aislamiento y robustez de los nuevos materiales; por ejemplo, en edificios para usos industriales, o de almacenamiento de explosivos.



**Equipos y ensayos.
Procedimiento
experimental**



CAPÍTULO 4. EQUIPOS Y ENSAYOS. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Se han utilizado numerosos equipos y ensayos en la caracterización de materiales de construcción en base yeso y escayola, resultando la caracterización básica esencial para optimizar su diseño. Los resultados obtenidos de los ensayos y técnicas de caracterización son utilizados para la selección adecuada de los materiales, el diseño y dimensionamiento de las estructuras, y la evaluación de la vida útil de los materiales en servicio.

Es importante seguir normas y estándares internacionales reconocidos en la caracterización de materiales de construcción. En este capítulo se explican las técnicas instrumentales requeridas para establecer las propiedades de las mezclas y placas de escayola prefabricadas, así como los diferentes equipos empleados en la caracterización de las materias primas (escayola, escorias y agua).

Las mezclas utilizadas en el desarrollo de esta Tesis tienen propiedades físicas y características diferentes dependiendo de su estado físico. Las mezclas pueden encontrarse en estado fresco o en estado endurecido.

- a) El estado fresco se consigue una vez se han mezclado todos los componentes de la mezcla, este estado tiene una duración determinada dependiendo de los materiales añadidos en la mezcla.
- b) El estado endurecido se da a continuación del estado fresco cuando los materiales han fraguado y se ha producido el endurecimiento de éstos.

Ambos estados son realidades diferentes del material obtenido en la mezcla, cabiendo estudiar sus propiedades y características en ambos estados ya que la información y



resultados obtenidos van a ser diferentes. Las propiedades del estado fresco van a influir en las propiedades del material una vez endurecido y fraguado.

4.1. Ensayos sobre materiales obtenidos en estado fresco y endurecido

4.1.1. Análisis elemental CHNS

Un analizador elemental CHNS es un equipo de laboratorio utilizado para determinar los contenidos de carbono (C), hidrógeno (H), nitrógeno (N) y azufre (S) en una muestra de material. Por lo general, el equipo consta de una serie de componentes, incluyendo una unidad de muestreo, un horno de combustión, un detector y un sistema de análisis.

El equipo utilizado es un analizador LECO CHNS-932 y VTF-900 (Figura 4.1.). El sistema de análisis del analizador elemental CHNS es responsable de medir la cantidad de gases producidos durante la combustión de la muestra y determinar el contenido de CHNS en la muestra en base a las proporciones de los gases detectados. Los resultados se muestran en la pantalla o panel de control del equipo, y pueden ser registrados o exportados para su posterior análisis.



Figura 4.1. Analizador elemental LECO

4.1.2. Difracción de Rayos X (DRX)

La difracción de Rayos X se realiza con la muestra en polvo. El equipo utilizado es un Difractómetro de Rayos X de la marca Bruker D8 Advance (Diseño Davinci) con el objetivo de determinar la composición mineralógica de la escayola. (Figura 4.2.) Este equipo consta de una fuente de rayos X, un detector, y un sistema de análisis de datos. La muestra de escayola se coloca en la trayectoria de los rayos X emitidos por la fuente de rayos X. Los rayos X interactúan con la estructura cristalina de la escayola, produciendo patrones de difracción que son recogidos por el detector.



Figura 4.2. DRX utilizado en la caracterización

Los datos de difracción recopilados se analizan para determinar la posición y la intensidad de los picos de difracción. Estos picos de difracción corresponden a la información sobre la estructura cristalina de la escayola, la distancia entre los planos de cristal, la orientación de los cristales, y la presencia de fases cristalinas específicas. Los datos obtenidos se comparan con bases de datos de patrones de difracción conocidos para identificar y caracterizar la composición cristalina de la escayola en forma de óxidos.

4.1.3. Microscopía electrónica de barrido (SEM)

La microscopía electrónica de barrido es una técnica de imagen que utiliza un haz de electrones para explorar la superficie de una muestra y obtener información detallada sobre su topografía, morfología y composición química a nivel microscópico. En lugar de utilizar luz visible como en el microscopio óptico, la microscopía electrónica de barrido utiliza



un haz de electrones para generar imágenes de alta resolución de la superficie de la muestra.

Durante la microscopía electrónica de barrido, el haz de electrones interactúa con la muestra, produciendo diferentes señales, como electrones retrodispersados, electrones secundarios y rayos X característicos. Estas señales se detectan y se utilizan para generar imágenes de la superficie de la muestra con una resolución mucho mayor que la que se puede obtener con un microscopio óptico. El equipo utilizado es un modelo ZEISS, FESEM GeminiSEM560 de ultra alta resolución con cátodo de emisión de campo tipo Schott. (Figura 4.3.)



Figura 4.3. FESEM para determinar la microestructura

4.1.4. Microscopía óptica

Para la determinación de la morfología y el tamaño de las partículas de las muestras, éstas son analizadas mediante microscopía óptica usando el microscopio Morphologi G3 de Malvern.



Para ello, se colocó una cucharada de 19 mm³ de la muestra en la cámara de dispersión, dispersando la misma con aire comprimido de forma automática en la pletina del microscopio.

En el caso de las escorias, las partículas fueron estudiadas mediante el uso de una macro, creada a medida para el análisis de estas muestras que combinaba los objetivos de x 2.5 y x 50 (cubriendo el rango de tamaños que va 1.8 μm hasta 1000 μm).

4.1.5. Análisis termogravimétrico (TGA)

Este ensayo mide el cambio en la masa de una muestra, mientras es calentada a una velocidad constante. El objetivo es determinar la pérdida de masa en función de la temperatura de degradación de la escayola y las escorias, en atmósfera de nitrógeno y en un rango de 100°C a 900°C. El equipo utilizado es un analizador TGA-DSC-DTA modelo TA Instruments con doble brazo. (Figura 4.4.)



Figura 4.4. Termogravimetría (TGA)



4.1.6. Densidad real y densidad aparente

Para el cálculo de la densidad real de la escayola y las escorias se aplica lo establecido en la norma UNE-EN 1936,⁵⁹ utilizando el método del picnómetro. Para realizar este ensayo se tritura la muestra de la materia prima hasta conseguir un tamaño máximo de partícula que pase por el tamiz de 0,063mm, introduciendo una cantidad de 10g de material en alcohol isopropílico en el picnómetro y procediendo a continuación a su pesado. Se determina el volumen que ocupa la muestra triturada y junto con el peso se calcula la densidad real sin poros. La densidad aparente de un material se calcula determinando el peso/volumen, una vez seco el material.

4.1.7. Consistencia. Método de la mesa de sacudidas

Para calcular la relación agua/escayola se sigue lo establecido en la norma UNE-EN 13279.³⁹ La escayola se mezcla con las escorias en seco y se añade el agua removiendo manualmente 1 minuto. Después se continua la mezcla en la amasadora mecánica (marca PROETI) durante otro minuto más a baja velocidad como se muestra en la Figura 4.5.

La mezcla amasada se coloca en el interior de un molde cónico en el centro de la mesa de sacudidas, se retira el molde y se aplican 15 golpes verticales. El ensayo se realiza hasta la formación de una galleta de un diámetro medio de (165 ± 5) mm, medido en dos direcciones perpendiculares.

⁵⁹ Asociación Española de Normalización (AENOR). (2007). UNE-EN ISO 1936. Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la densidad real y aparente y de la porosidad abierta y total.



Figura 4.5. Amasadora y mesa de sacudidas

4.1.8. Principio de fraguado. Método del cono de Vicat

La norma UNE-EN 13279-2³⁹ establece los tiempos de principio de fraguado de una muestra. Para ello, se rellena de la muestra un molde cónico de caucho dispuesto sobre una placa de vidrio, colocándose el conjunto bajo el dispositivo de Vicat marca IBERTEST según se muestra en la Figura 4.6.



Figura 4.6. Cono de Vicat



Se realizan incursiones con una aguja en la muestra hasta obtenerse una profundidad de penetración de (22 ± 2) mm de la aguja sobre el cono. El tiempo transcurrido desde el momento en el que la mezcla de escayola y escorias se vierte sobre el agua para formar la pasta, hasta el momento en el que se obtiene la profundidad deseada, es lo que se denomina principio de fraguado.

4.2. Placas de escayola prefabricadas

Para la caracterización de placas de escayola prefabricadas se realizan los ensayos descritos a continuación, siguiendo la Norma UNE-EN 520+A1.⁶⁰

4.2.1. Densidad aparente

La densidad de las placas prefabricadas de escayola con escorias es calculada considerando la masa media de las placas y las dimensiones de la probeta.

Antes de realizar el ensayo, las placas deben dejarse reposar en estufa hasta alcanzar una masa constante a una temperatura de (40 ± 2) °C, pesando cada placa con una precisión de 0,1g. Las dimensiones de las probetas deben ser medidas, para la anchura en tres puntos situados a lo largo de la longitud de la placa y para la longitud en tres puntos situados a lo largo de la anchura de la placa. El espesor de la placa se mide en 6 puntos situados cerca de uno de los bordes transversales.

⁶⁰Asociación Española de Normalización (AENOR). (2010). UNE-EN ISO 520:2005+A1. Placas de yeso laminado. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo.



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

Para este ensayo se emplea un dispositivo de carga marca Servosis, conectado a un equipo de medida digital con una precisión del 2%. La probeta se seca hasta masa constante a (40 ± 2) °C y el ensayo se realiza antes de que hayan pasado 10 minutos desde que se ha sacado la probeta de la estufa. La placa se coloca sobre dos apoyos cilíndricos paralelos, con una separación entre ejes de (350 ± 1) mm, y la carga se aplica de forma controlada a una velocidad de (250 ± 125) N/min en el centro del vano, de forma paralela a los apoyos, y por medio de un rodillo cilíndrico.



Figura 4.7. Dispositivo de carga



4.2.3. Capacidad de absorción total de agua

Este ensayo contribuye a determinar el tipo de porosidad existente en las placas recicladas obtenidas. Las probetas se acondicionan hasta masa constante, se pesan y se sumergen en un baño de agua a (23 ± 2) °C, cubriéndolas con 25-35 mm de agua durante $2h\pm 2$ min. La probeta debe colocarse en posición horizontal sin que apoye en el fondo del recipiente (Figura 4.8.).

Una vez sacada la probeta del recipiente, se elimina el exceso de agua de la superficie y de los bordes, pesándose inmediatamente después. La diferencia de peso nos permite calcular la capacidad de absorción total de agua de la probeta.



Figura 4.8. Probeta sumergida totalmente en agua

4.2.4. Resistencia al impacto

Para el cálculo de la resistencia al impacto de las placas prefabricadas, se deja caer una bola de acero de 50 mm de diámetro y 510 g de masa desde una distancia vertical de medio metro, obteniéndose la huella superficial causada por el impacto de la bola sobre la superficie de la probeta.



El ensayo es repetido tres veces sobre la misma probeta (Figura 4.9.). La huella superficial producida por el impacto de la bola de acero se calcula como la media de los tres valores medidos con una precisión de 1 mm. La dureza superficial de la placa de escayola es caracterizada por este valor medio.

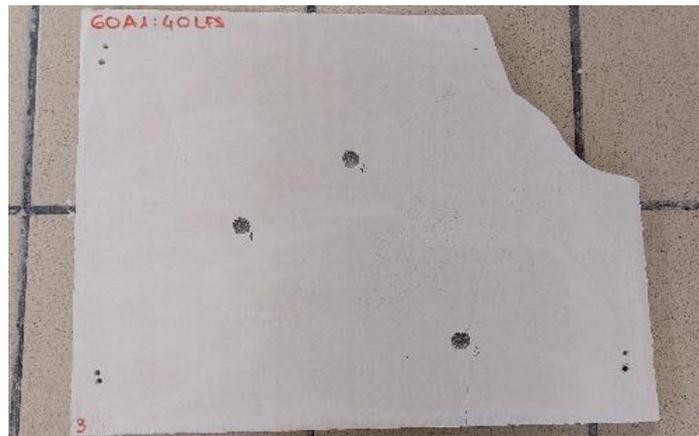


Figura 4.9. Ensayo de dureza superficial

4.2.5. Ensayo de reacción al fuego. Ensayo de no combustibilidad

Este ensayo es adecuado para evaluar el comportamiento de materiales de construcción a altas temperaturas. El aparato de prueba sigue lo establecido en la norma EN ISO 1182.⁶¹ Las muestras se colocan en un horno vertical compuesto por un espacio cilíndrico de 75 mm de diámetro y 150 mm de altura. La forma de la muestra introducida en el horno es cilíndrica, con un diámetro de 45 mm y una altura de 50 mm. La temperatura del horno se eleva desde la temperatura ambiente hasta 750°C en 2 horas. Posteriormente, el horno mantiene la temperatura a 750°C durante otros 60 minutos. Se registran las temperaturas de la superficie y el centro de la muestra cada 10 segundos.

⁶¹ Asociación Española de Normalización (AENOR). (2020). UNE-EN ISO 1182. Reaction to fire tests for products. Non-combustibility test.



Asimismo, se mide el tiempo de ignición y la pérdida de masa de la muestra. Los resultados de la prueba se clasifican de acuerdo a la norma EN 13501-1.⁶²

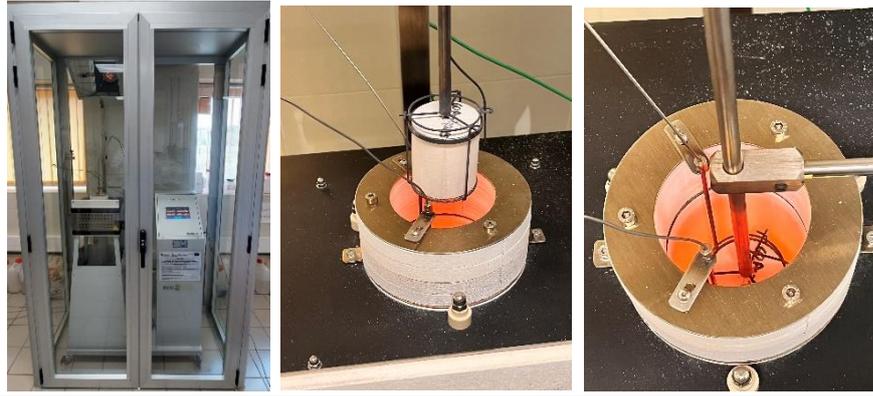


Figura 4.10. Ensayo de no combustibilidad

4.2.6. Ensayo de conductividad térmica

El ensayo de conductividad térmica es una prueba utilizada para determinar la conductividad térmica de materiales. Este ensayo se lleva a cabo siguiendo el método FOX50 GmbH.

Este método de ensayo es utilizado para medir la conductividad térmica de materiales sólidos y se basa en la medición de la transferencia de calor a través de una muestra de material a una temperatura constante.

Se prepara una muestra de material en forma de disco o cilindro, que se coloca en un dispositivo de medición de conductividad térmica. La muestra se somete a una diferencia de temperatura constante entre sus dos caras, y se mide la

⁶²Asociación Española de Normalización (AENOR). (2019). UNE-EN ISO 13501-1:2019. 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.



cantidad de calor que fluye a través de la muestra en un determinado periodo de tiempo.

A partir de estos datos, se calcula la conductividad térmica del material en ($\text{W/m} \cdot \text{K}$), determinando la capacidad para conducir el calor de cada muestra. (Figura 4.11.) Mide en un rango de conductividad de entre $0,1 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ y $10 \text{ W/m} \cdot \text{K}$, acorde a las normas ASTM C518 e ISO 8301.⁶³



Figura 4.11. Ensayo de conductividad térmica

4.2.7. Ensayo de colorimetría

Con el objetivo de conocer la alteración del color de las muestras propuestas se realizar este ensayo de colorimetría. Para ello, se utiliza el Colorímetro de sobremesa CR-5 de la marca Konica Minolta (Figura 4.12.), siendo un colorímetro por reflectancia y/o transmisión.

⁶³ International Organization for Standardization. ISO 8301:1991/Amd 1:2010. Thermal insulation. Determination of steady-state thermal resistance and related properties. Heat flow meter apparatus-Amendment



El equipo cuenta con un tamaño de apertura de 3 a 30mm, sobre el que se coloca la muestra para la medición. Antes de realizar la medición colorimétrica de la muestra, el equipo realiza automáticamente la calibración blanco/100% utilizando una placa de calibración interna. Los resultados son obtenidos en el espacio de color $L^*a^*b^*$.



Figura 4.12. Detalle del colorímetro empleado.





Caracterización de materias primas



CAPÍTULO 5. CARACTERIZACIÓN DE MATERIAS PRIMAS

En este capítulo se lleva a cabo una evaluación detallada y un estudio exhaustivo de las propiedades de las materias primas que son objeto de desarrollo en esta Tesis Doctoral. Estas materias primas incluyen escayola (A1), escorias blancas (LFS), agua y aditivos, y se analizan sus características físicas, químicas y mecánicas para comprender su comportamiento y su potencial en el contexto de esta investigación.

Esta evaluación es fundamental para comprender como las materias primas interactúan entre sí y como pueden afectar a las propiedades de los materiales finales, cruciales para el desarrollo exitoso de la investigación.

- a) Escayola (A1): Se efectúa una evaluación completa de las propiedades de la escayola, siendo un material ampliamente utilizado en la construcción debido a su capacidad de fraguado y endurecimiento.
- b) Escorias blancas (LFS): Se lleva a cabo un estudio detallado de las propiedades de las escorias blancas, que son subproductos de la industria metalúrgica y se utilizan como materia prima en la producción de materiales de construcción.
- c) Aditivo: Alteran con sus propiedades químicas y efectos el comportamiento final de las mezclas a estudiar.

5.1. Escayola

La escayola utilizada es un conglomerante a base de yeso para la construcción según la Normativa Europea UNE-EN 13279-1.³⁹ Es una escayola procedente de la cantera Gelsa del Ebro



en Zaragoza, España y distribuida por la empresa Saint Gobain Placo Iberica, S.A. Posee marcado CE lo que le proporciona garantía de cumplir con las propiedades especificadas en su ficha técnica. En esta Tesis se va a referir de manera a la escayola E35 y al yeso tipo A.

Se trata de una escayola para la realización de elementos prefabricados con una resistencia a flexión igual o superior a 3,5 N/mm², una densidad aparente de 756 Kg/m³, un PH superior a 6 y un índice de pureza superior al 92%, según recoge la ficha de características del fabricante. El tamaño de partícula de la escayola se sitúa entre los 0 y los 2mm.

La densidad ha sido calculada según el procedimiento explicado en el Capítulo 4 “Equipos y ensayos”.



Figura 5.1. Escayola utilizada en la experimentación



5.2. Escoria blanca

Uno de los componentes principales de las mezclas desarrolladas en esta Tesis Doctoral son las escorias blancas de horno de cuchara (Ladle Furnace Slag) LFS son las siglas en inglés.

Las escorias son subproductos que se generan durante la producción de metales a partir de la fusión de minerales y otros materiales en un horno metalúrgico para separar el metal de la ganga. Dependiendo del tipo de mineral y del proceso de producción, la escoria puede tener diferentes colores, incluyendo blanco.

La escoria blanca de horno se refiere a la escoria que tiene un color blanco o casi blanco debido a su composición química y mineralógica. Se depositan en las zonas cercanas a los lugares de producción durante el proceso de afino del acero. Al depositarse habitualmente en zonas al aire libre, la meteorización o proceso de expansión previo a su utilización como materia prima en la producción de yesos y escayolas de construcción, se da durante su generación y almacenaje.

Estas escorias blancas de horno de cuchara son producidas en la acería Tubos Reunidos Industrial S.L.U. en Amurrio, Álava y tienen un aspecto pulverulento. (Figura 5.2.).

Teniendo en cuenta que estas escorias no han sido tratadas previamente se estabilizan químicamente dejándolas durante varios meses a la intemperie. Esto permite la hidratación y expansión de los óxidos que puedan quedar presentes, lo que evita cambios posteriores una vez que el residuo se incorpora como materia prima para la construcción.



Figura 5.2. Aspecto inicial de las escorias blancas

Para ello, las escorias son depositadas en el laboratorio durante el tiempo necesario para su estabilización química y meteorización. Durante este tiempo se llevan a cabo los procesos a continuación descritos para su acondicionamiento y uso.

- a) Meteorización a la intemperie, en este proceso se produce un volteo de las escorias para facilitar la estabilización tanto de los óxidos de magnesio como de los óxidos de cal presentes en la mezcla y así evitar la posible expansión de la mezcla por la presencia de estos óxidos sin apagar.
- b) Eliminación de terrones de cal y restos de colada de acero cribados con un tamiz de luz de malla de 0.5mm. Con esto se consigue una textura de material fina, con una composición uniforme, suave al tacto y con un color general blanquecino con matices grisáceos.



- c) Retirada de micropartículas de acero que han pasado el tamiz de luz de malla de 0.5mm utilizando un captador electromagnético.



Figura 5.3. Aspecto final de las escorias después de su acondicionamiento

Una vez las escorias están preparadas para su utilización se realiza una evaluación de sus características tanto físicas como químicas. (Tabla 5.1, Tabla 5.2., Gráfica 5.1 y Figura 5.4.)

5.2.1. Caracterización física

La caracterización física es clave a la hora de conocer datos determinantes como son las densidades real y aparente, su humedad o el equivalente de arena.

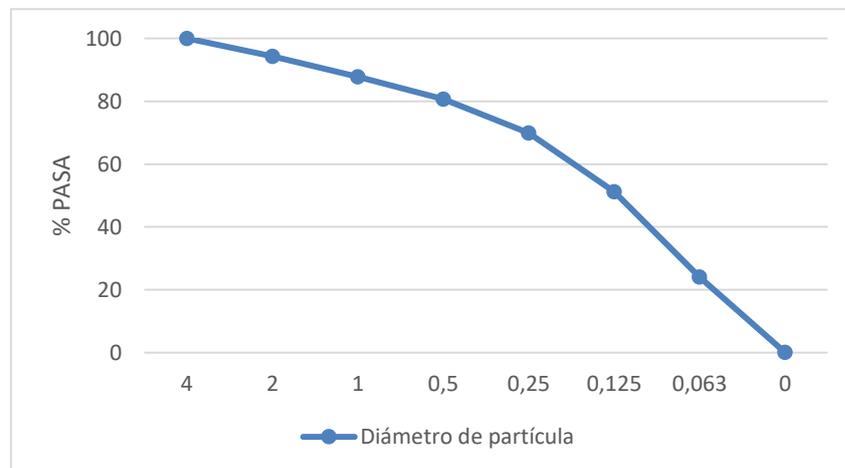
Los resultados obtenidos en la granulometría reflejan la composición de la escoria blanca en función del tamaño, con un tamaño máximo de 2mm. Se ha pretendido escoger una muestra lo más homogénea posible con una representación proporcional de todos los tamaños de partículas en ella.



Propiedad	Ácido siderúrgico
Densidad de conjunto como árido (densidad aparente)	1360 Kg/m ³
Humedad natural	0,35%
Superficie específica Blaine	2654-3091 cm ² /g
Equivalente de arena	50%
Plasticidad	No plástico
Humedad	0,04%

Tabla 5.1. Caracterización física de las escorias blancas (LFS)

El límite de tamaño de la partícula fijada en 2mm se debe a que una vez generadas las mezclas con la escayola se obtiene una compactación mayor, lo que mejora su resistencia mecánica y reduce los índices de porosidad.



Gráfica 5.1. Granulometría de las escorias blancas



Figura 5.4. Distribución por tamaños de las escorias blancas

5.2.2. Microscopía electrónica de barrido (SEM)

A través de las imágenes obtenidas por el microscopio de barrido se determina la microestructura de las escorias blancas. Se realiza la toma de imágenes a diferentes aumentos con el objetivo de conocer las propiedades de este material antes de ser mezclado y combinado con otros subproductos de la mezcla final. Para que la muestra sea conductora del chorro de electrones que ayuda con la toma de imágenes se les aplica un pretratamiento de recubrimiento de oro o de carbono.

La microscopía electrónica contribuye a clarificar la morfología, la estructura cristalina, la composición química y las propiedades físicas de las escorias como residuos. Este tipo de análisis proporciona información valiosa que puede ayudar a comprender su formación y propiedades. (Figura 5.5.).

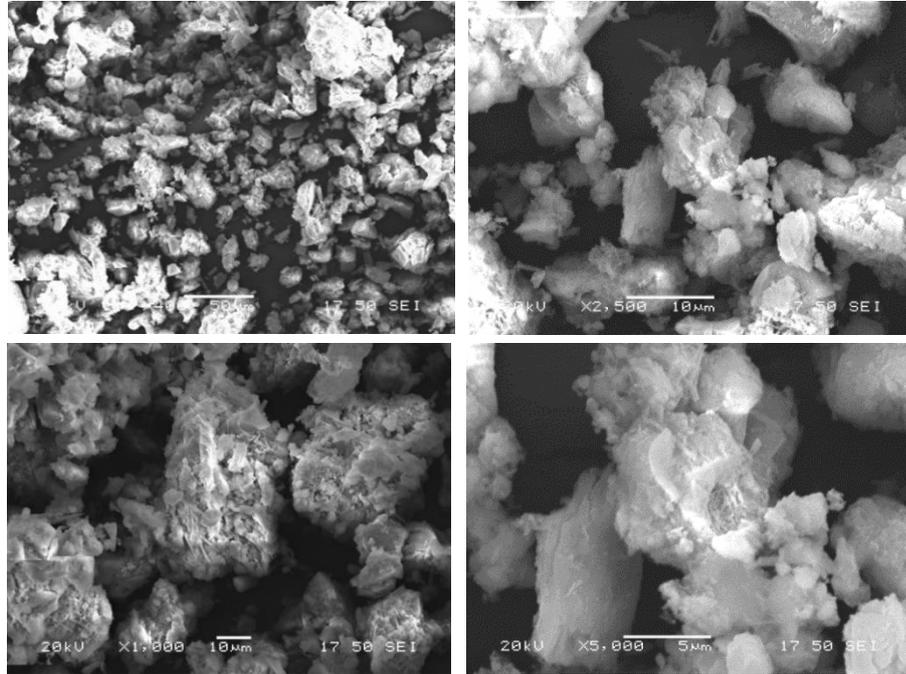
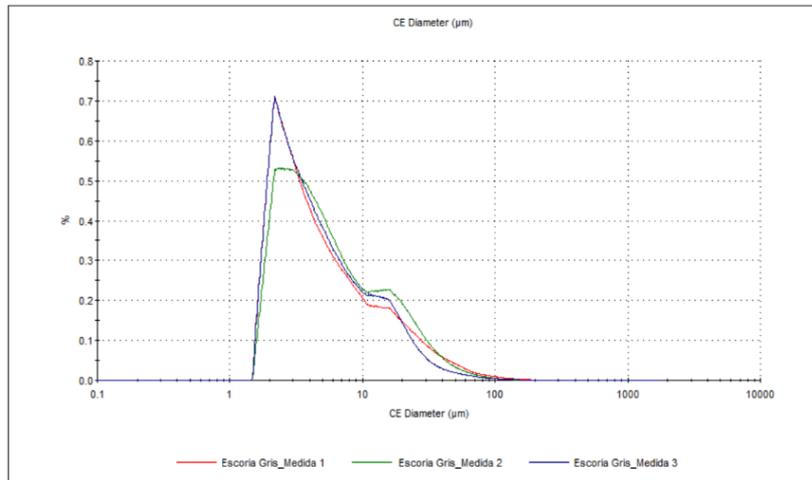


Figura 5.5. Imágenes SEM de las escorias blancas

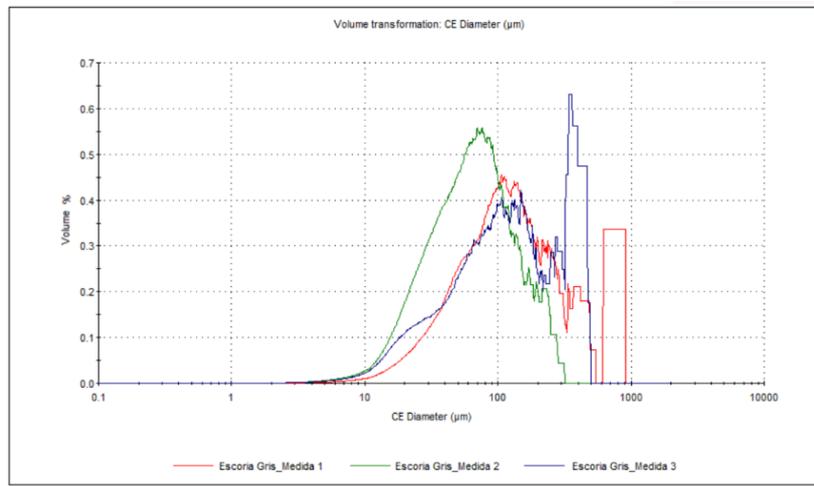
5.2.3. Microscopía óptica o confocal

En este ensayo cada una de las muestras se ha medido 3 veces para tener una mayor estadística. Su objetivo es la determinación de la morfología y el tamaño de las partículas de las muestras. En la Gráfica 5.2. se muestra la frecuencia relativa en número en función del diámetro de partícula (μm).



Gráfica 5.2. Frecuencia relativa en número frente al diámetro de partícula (μm)

La Gráfica 5.3. refleja la frecuencia relativa en volumen en función del diámetro de partícula (μm).



Gráfica 5.3. Frecuencia relativa en volumen frente al diámetro de partícula (μm)

Adicionalmente, en la Tabla 5.2. se muestra la morfología de las partículas estudiadas. Se muestran partículas del rango



de tamaño más pequeño, del rango de tamaño intermedio, así como del rango de tamaño más grande, obteniendo con ello una representación de cada una de las muestras analizadas. En las imágenes elegidas se muestra el diámetro de partícula, que no tiene la misma magnificación, mostrando los detalles morfológicos.

Finalmente se hace una clasificación por microscopía óptica en número y volumen de las escorias en función del diámetro de la distribución al 4.3, al 10, al 50 y al 90% (D4,3, D10, D50 y D90). Tabla 5.3.

Muestra	Rango de tamaños pequeños	Rango de tamaños intermedios	Rango de tamaños grandes
Escoria blanca. Número total de partículas analizadas = 369.262	 Diámetro = 5.07 μm	 Diámetro = 72.19 μm	 Diámetro = 451.14 μm

Tabla 5.2. Muestras de escorias analizadas por tamaños

Muestra	D [4,3] (μm)	D10 (μm)	D50 (μm)	D90 (μm)
Distribución en número	8.33	2.05	4.21	18.77
Distribución en volumen	187.30	31.71	109.40	409.50

Tabla 5.3. Valores medios del diámetro de partícula

5.2.4. Caracterización química y mineralógica

En la Tabla 5.4. se refleja la caracterización química de las escorias blancas LFS.



Propiedad	Ácido siderúrgico
Contenido en cloruros	< 0,01%
Contenido en compuestos totales de azufre (%S)	0,86%
Contenido de sulfatos solubles en ácido (%SO₃)	0,32%
Sales solubles en agua	0,92%
Sales solubles sin yeso	0,80%
Contenido en yesos	0,00%
Materia orgánica	0,00%

Tabla 5.4. Caracterización química de las escorias blancas (LFS)

Con el objetivo de tener un estudio más detallado de la composición química de las escorias blancas LFS, Se realiza un Análisis de Fluorescencia de Rayos X (FRX), Los resultados se reflejan en la tabla 5.5. En este análisis se observa unas altas cantidades de manganeso y cromo por lo que otro análisis adicional es necesario para concretar la concentración de estos elementos.

En este caso se realiza un microanálisis por energía dispersa de rayos X, donde se corrobora que la escoria blanca LFS se compone principalmente de aluminatos cálcicos y silicatos, así como de óxido de magnesio y cal.

Cabe resaltar la presencia de elementos metálicos como pueden ser el arsénico, mercurio, plomo, níquel, zinc o cadmio, que se encuentran en pequeñas cantidades, pero podrían llegar a ser contaminantes si se encontrasen en cantidades más elevadas.

Dependiendo del tipo de acero refundido y del proceso siderúrgico aplicado se produce una variación en la composición química de las escorias blancas. Sin embargo, hay



que tener en cuenta también que esta composición se mantiene estable con el paso del tiempo, dado que los procesos de fabricación de donde proceden no cambian de manera sustancial.

Composición Química	
CaO	56,75
SiO₂	17,72
MgO	9,56
Al₂O₃	6,75
FeO	2,21
SO₃	0,86
TiO₂	0,34
MnO	0,29
Na₂O	0,07
P₂O₅	0,04
K₂O	0,02
Otros	5,39

Tabla 5.5. FRX, composición química de las escorias blancas LFS

Las escorias blancas tienen la capacidad de fraguar y endurecer al ser molidas y amasadas,⁶⁴ lo que se conoce como capacidad hidráulica latente o potencial. Esta capacidad latente necesita ciertos activadores para agilizar su reacción de hidratación ya que se trata de una capacidad muy tenue y prolongada en el tiempo. Hay ciertos compuestos que mejoran su hidráulica como puede ser el aumento del contenido de CaO, por el contrario, el aumento de compuestos como el SiO₂ puede ser perjudicial para el desarrollo de este proceso.

⁶⁴ S. Gissera, M.M. Alonso, M. Palacios, F. Puertas,. Rheology of alkali-activated mortars: Influence of particle size and nature of aggregates. *Minerals* (Vol. 10), (2020). <https://doi.org/10.3390/min10080726>



5.3. Aditivo

Los aditivos son sustancias que se añaden a los morteros con el fin de modificar sus propiedades físicas, químicas o mecánicas. Los aditivos pueden mejorar la trabajabilidad, la resistencia, la durabilidad, la adherencia, la retención de agua, la resistencia a la abrasión, la protección contra la corrosión, y otras características del mortero, según su composición y dosificación.

El aditivo utilizado es el Sikamix 3300, que es una mezcla líquida de polímeros de alto rendimiento diseñada para reducir la viscosidad y la tensión superficial del agua en las mezclas de yeso. Se trata de un superplastificante, también conocido como reductor de agua de alta eficiencia, y es un tipo de aditivo utilizado en la industria de la construcción para mejorar la trabajabilidad y fluidez sin aumentar la cantidad de agua en la mezcla, hecho que permite reducir la relación agua/yeso. Puede ser incorporado en el agua de amasado o añadirse directamente a la mezcla fresca y su dosificación varía entre el 0,25 y 0,6% del peso de la escayola.

En la tabla 5.6. se muestran las características principales del Sikamix 3300.

Propiedades	
Forma	Líquido
Color	Marrón
PH	11 a 13
Densidad	1,23 g/cm ³
Duración	12 meses desde su fabricación

Tabla 5.6. Caracterización del Sikamix 3300





Caracterización de mezclas y placas prefabricadas



CAPÍTULO 6. CARACTERIZACIÓN DE MEZCLAS Y PLACAS PREFABRICADAS

En este capítulo se estudian las propiedades de las mezclas de escayola utilizada como conglomerante con diferentes cantidades de escoria blanca de horno de cuchara, así como las propiedades de las placas prefabricadas. La escayola es un material estable con buenas propiedades y se prevé que con el añadido de las escorias mejore algunas de ellas, como pueden ser la permeabilidad, la porosidad o la densidad. 10

Pueden darse casos en los que algunas de sus propiedades pueden verse perjudicadas al sustituir parte del conglomerante por escorias blancas, entre éstas están la durabilidad, la resistencia mecánica o la adherencia.

Para obtener resultados objetivos y conclusiones determinantes se van a realizar muestras de diferentes dosificaciones y se van a ensayar cada una de ellas tanto en estado fresco como en estado endurecido con el objetivo de poder compararlas y ver que cumplen los criterios establecidos y especificaciones técnicas de cada una de las normativas aplicables.

6.1. Proceso productivo de las mezclas

Con el fin de establecer valores comparativos de las propiedades de cada mezcla en función de sus dosificaciones, se van a preparar los materiales para realizar las probetas necesarias para los ensayos.



6.1.1. Preparación de los materiales

Con el propósito de obtener escorias blancas homogéneas, se clasifica el material en función del tamaño de sus partículas. Para ello, se realiza un análisis granulométrico de las partículas utilizando tamices normalizados con el objetivo de obtener una línea granulométrica continua y lo más cerrada posible.

El tamaño de partícula máximo utilizado ha sido menor de 1.00mm ya que por su finura se considera óptimo para las mezclas.

6.1.2. Preparación de las mezclas

Para cumplir con la Normativa UNE-EN 13279-2/2014,³⁹ las mezclas obtenidas deber tener una cantidad de entre 1,2dm³ y 1,5dm³ de escayola. Considerando que la densidad de la escayola es de 0,756 g/cm³ y la del agua de 1.00 g/cm³, se obtiene una relación aproximada agua/escayola de 0,40. Este dato nos permite estimar de una manera más rápida la cantidad de material necesario exacta para cada una de las dosificaciones. Tabla 6.1.

Dosificación de las muestras objeto del estudio		
Muestra	Relación % Escayola/LFS	Aditivo (%)
PL20S	80/20	SikaMix 0,8%
PL40S	60/40	SikaMix 0,8%
PL60S	40/60	SikaMix 0,8%

Tabla 6.1. Dosificación de las muestras objeto del estudio

Basándonos en las dosificaciones de la tabla anterior, parte de la escayola usada como conglomerante es sustituida por



escorias blancas LFS y aditivos. Para cumplir con la normativa y siguiendo lo establecido en la norma UNE-EN 13279-2/2014³⁹ las mezclas finales deben tener una consistencia plástica con un escurrimiento de 165 ± 5 mm en la mesa de sacudidas.

6.1.3. Proceso de fabricación

En primer lugar, se mezcla en seco la escayola con la escoria blanca, se vierte la mezcla a la cantidad anteriormente calculada de agua, y se añade el aditivo. Se remueve la mezcla manualmente con una espátula durante 1 minuto aproximadamente y a continuación, se introduce en la amasadora mecánica con movimiento planetario durante otro minuto.

6.2. Caracterización de las mezclas en estado fresco

Siguiendo la norma UNE-EN 13279-2/2014³⁹ en este apartado se describen todos los ensayos realizados para definir y caracterizar cada una de las mezclas en estado fresco, antes de que las muestras terminen su proceso de fraguado.

En primer lugar, se determina la relación agua/escayola como punto inicial para el cálculo de las materias primas de cada una de las dosificaciones y a continuación se establecerá el principio de fraguado como característica principal para determinar los posibles diferentes usos de cada una de las mezclas. Por último, se calcula la densidad en fresco de todas las mezclas.



6.2.1. Relación agua/conglomerante

Se trata de un proceso experimental llevado a cabo por el método de ensayo-error, en el que se trata de calcular la relación de agua/escayola+escoria adecuada para la que mezcla final sea trabajable y cumpla con un escurrimiento de 165 ± 5 mm en la mesa de sacudidas establecido en la norma UNE-EN 13279-2/2014.³⁹

El aditivo se añade siguiendo las recomendaciones establecidas por el fabricante, tomando como referencia la cantidad de conglomerante (escayola + escoria). Los resultados se muestran en la Tabla 6.2.

Relación agua/conglomerante			
Muestra	Relación % Escayola/LFS	Aditivo %	a/c
PL20S	80/20	SikaMix 0,8%	0,50
PL40S	60/40	SikaMix 0,8%	0,45
PL60S	40/60	SikaMix 0,8%	0,40

Tabla 6.2. Relación agua / conglomerante de las mezclas

Como se muestra en la tabla anterior, a mayor cantidad de escoria incorporada en la mezcla, menor es la cantidad de agua y aditivo necesario garantizando una trabajabilidad de la mezcla similar en todos los casos, siempre cumpliendo con la normativa vigente. Esto refleja que se puede reducir la cantidad de escayola utilizada en la mezcla en favor de la incorporación de escorias blancas sin impactar en este aspecto.



6.2.2. Principio de fraguado

El principio de fraguado es el tiempo transcurrido desde que se elabora la mezcla agua/conglomerante y se vierte en un recipiente de forma cónica hasta que la aguja penetra en la mezcla a una profundidad de 22 ± 2 mm. Este ensayo normativo es conocido como el Método del Cono de Vicat.

Como se muestra en la Tabla 6.3. los tiempos de principio de fraguado se van reduciendo a medida que se incrementa la cantidad de escayola sustituida por las escorias blancas, aunque como se muestra a continuación, la reducción del tiempo de fraguado es poco significativa.

Tiempo de principio de fraguado		
Muestra	Relación % Escayola/LFS	Tiempo de fraguado (min)
PL20S	80/20	9´33"
PL40S	60/40	8´47"
PL60S	40/60	8´40"

Tabla 6.3. Tiempo de principio de fraguado de las mezclas

En base a los resultados de la tabla anterior se puede determinar la disminución de la trabajabilidad de las mezclas a medida que se incrementa la sustitución de conglomerante por las escorias blancas.

6.2.3. Densidad aparente

Para el cálculo de la densidad aparente de las muestras en estado fresco se utiliza la relación peso/volumen y está



directamente relacionada con las características de los materiales utilizados y el aire ocluido en la misma.

Como se muestra a continuación, en la Tabla 6.4., la densidad en fresco de las muestras aumenta a medida que se aumenta la cantidad de escorias añadidas. Esto puede deberse a una evaporación menor del agua de amasado lo que disminuye la porosidad de la muestra o a la adicción de materiales con una densidad mayor.

Densidad en fresco		
Muestra	Relación % Escayola/LFS	Densidad en fresco (Kg/m ³)
PL20S	80/20	1759
PL40S	60/40	1804
PL60S	40/60	1854

Tabla 6.4. Densidad en fresco de las mezclas

6.3. Introducción a la caracterización de las placas de escayola

En este y los siguientes apartados se analizan tanto las propiedades físicas como las mecánicas de placas prefabricadas de escayola realizadas a partir de la sustitución de parte del conglomerante por escorias blancas LFS en diferentes proporciones para su posterior uso en edificación.

El uso general de estos elementos es como producto de revestimiento de techos o muros interiores ya que poseen una buenas propiedades mecánicas y térmicas, pero sobre todo por su buen comportamiento frente al fuego, debido a su composición química y los procesos de deshidratación



endotérmica a temperaturas elevadas⁶⁵ a los que son sometidos, favoreciendo su resistencia.

La sustitución del conglomerante por las escorias blancas LFS favorece sus propiedades a largo plazo, una vez que su potencial comportamiento expansivo inicial ha pasado.⁴²

La utilización de las escorias blancas como parte del conglomerante de las placas prefabricadas hace que el coste ambiental sea menor al tratarse de productos reciclados, así como hace que el coste económico final de las placas prefabricadas también acabe siendo menor.⁶⁶

Como se ha señalado anteriormente, siendo el objetivo final de estas placas prefabricadas su utilización en edificación, mayoritariamente en techos y en revestimientos de muros interiores, en este capítulo se llevan a cabo ensayos de resistencia a flexión, resistencia al impacto o reacción al fuego para verificar que cumplen con la normativa de aplicación correspondiente.

6.4. Caracterización de las placas de escayola

Para la realización de las placas prefabricadas y las probetas necesarias para los ensayos se han utilizado los siguientes materiales, ya descritos en el capítulo de caracterización: como hemidrato se ha empleado escayola E35, como adición al conglomerante se han utilizado escorias blancas de horno de cuchara LFS y un aditivo superfluidificante SikaMix 3300 para mejorar la unión entre los distintos materiales.

⁶⁵ D.A. Kontogeorgos, I.D. Mandilaras, M.A. Founti. Fire behavior of regular and latent heat storage gypsum boards. *Fire and Materials*. Vol. 39. Pages 507-517. (2015). <https://doi.org/10.1002/fam.2246>

⁶⁶ A. Rodríguez, S. Gutiérrez-González, M. Horgnies, V. Calderón. Design and properties of plaster mortars manufactures with ladle furnace slag. *Materials and Design*. Vol.52. Pages 987-994. (2013). <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.06.041>



Como se ha indicado en el apartado 6.3. todas las dosificaciones deben tener una trabajabilidad adecuada y para ello la cantidad de agua necesaria en cada mezcla debe ser la idónea ya que va a condicionar el comportamiento del producto final. La trabajabilidad de cada una de las muestras se va a medir en la mesa de sacudidas y deben tener un diámetro de escurrimiento de 165 ± 5 mm.

En la siguiente tabla (Tabla 6.5.), se muestran las cantidades de escayola, escoria blanca, agua de amasado y aditivo utilizadas en cada una de las dosificaciones. La designación elegida para las mezclas es PL seguida del porcentaje de sustitución de la escayola por el residuo de escoria (20,40 o 60) y terminando con la letra S aclarando la presencia de escorias en las mezclas. La muestra de referencia va a ser designada con las siglas PLR.

Para los ensayos de caracterización se han realizado 3 placas de cada dosificación de dimensiones (300 x 400 x 15) mm³ según lo establecido en la norma EN 520:2005+A1.⁶⁰ Las probetas pasan por un proceso de curado con una humedad relativa del 50% y una temperatura ambiente de 20°C durante 7 días, a continuación se introducen en una estufa a una temperatura de (40 ± 2) °C durante 24 horas para adquirir una masa constante y finalmente se estabilizan a temperatura ambiente previamente a realizarse los ensayos.

Cabe destacar que las placas realizadas en el laboratorio no van a llevar el revestimiento exterior de papel, como sí lo hacen las placas comerciales industriales. Es un proceso complicado para realizar en el laboratorio del que se ha decidido prescindir.



Dosificaciones y propiedades de las muestras de placas prefabricadas de escayola						
Muestra	Escayola/escoria (%)	Escayola (g)	Escoria blanca (g)	Agua (g)	Aditivo (%)	a/c
PLR	100/0	1500	-	900	-	0,60
PL20S	80/20	1280	320	800	0,8	0,50
PL40S	60/40	1020	680	765	0,8	0,45
PL60S	40/60	720	1080	720	0,8	0,40

Tabla 6.5. Dosificaciones y propiedades de las placas prefabricadas de escayola

Para llevar a cabo los ensayos de reacción frente al fuego se han realizado unas probetas de cada una de las dosificaciones de forma cilíndrica con un diámetro de 45 ± 2 mm, una altura de 50 ± 3 mm y un volumen de 76 ± 8 cm³, según lo establecido en la norma EN ISO 1182.⁶¹ La preparación y el acondicionamiento de las probetas previas a los ensayos se hace siguiendo la norma EN 13238⁶⁷ en la que se establece que las probetas tienen que mantenerse a una humedad relativa del $50\pm 5\%$ y a una temperatura de 23 ± 2 °C durante 144 horas antes de ser ensayadas.

6.5. Proceso experimental

Como ya se ha indicado anteriormente, todos los ensayos realizados se hacen en base a la normativa EN 520:2005+A1⁶⁰ excepto los de resistencia al fuego que se hacen en función de una normativa específica.

⁶⁷ Asociación Española de Normalización (AENOR). (2011). UNE-EN ISO 13238. Ensayos de reacción al fuego para productos de construcción. Procedimiento, de acondicionamiento y reglas generales para la selección de sustratos.



Con el objetivo de validar el procedimiento de estudio aplicado, se hacen 6 ensayos por cada dosificación, muy por encima de los tres ensayos requeridos por estándares internacionales. Con ello se busca una reproductibilidad de los resultados cercana al 90%.

6.5.1 Densidad

La densidad de las placas prefabricadas se calcula dividiendo la masa de cada una de las placas (Kg) entre el volumen total de las placas (m^3) calculado en base a las dimensiones de las probetas. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 6.6.

Muestra	Densidad (Kg/m ³)
PLR	1340
PL20S	1433
PL40S	1557
PL60S	1625

Tabla 6.6. Densidad placas de escayola prefabricadas

Como se puede observar en la tabla anterior, la densidad de las placas aumenta a medida que la proporción de escoria en la muestra es mayor. Esto se explica ya que la densidad de la escoria es más elevada que la de la escayola y hace que la densidad total de la mezcla sea mayor, aunque cabe señalar que este incremento no es muy drástico ya que con una sustitución del 60% del conglomerante por escoria solo repercute en un aumento de su densidad de un 21.3%.



6.5.2. Resistencia a flexión

La resistencia a flexión de las placas prefabricadas de escayola es determinada a través del cálculo de la carga de rotura de las mismas. El procedimiento adecuado de realización del ensayo consiste en disponer la placa a ensayar sobre dos apoyos cilíndricos paralelos separando sus ejes 350mm, aplicando una carga de 250 N/min por medio de un rodillo cilíndrico en el centro del vano a una velocidad controlada.

Muestra	Resistencia a flexion (N)
PLR	540
PL20S	440
PL40S	350
PL60S	210

Tabla 6.7. Resistencia a flexión placas de escayola prefabricadas

Pese a los resultados obtenidos en los que se observa la disminución considerable de la carga máxima de rotura a flexión a medida que se aumenta la cantidad de residuos incorporados en el conglomerante, de hasta un 39% en el caso de las placas con una sustitución de la escayola por escorias del 60%, todos los registros están por encima de los 100N,⁶⁸ valor mínimo establecido en la normativa.

6.5.3. Capacidad de absorción de agua

Para el cálculo de absorción de agua, se sumergen las placas prefabricadas en agua a 23°C durante 2 horas cubiertas

⁶⁸ P. Dalmay, A. Smith, T. Chotard, P. Sahay-Turner, V. Gloaguen, P. Krausz. Properties of cellulosic fibre reinforced plaster: influence of hemp or flax fibres on the properties of set gypsum. *Journal of Materials Science*. Vol. 45. Pages 793-803. (2010). <https://doi.org/10.1007/s10853-009-4002-x>



con una lámina de agua de 25-35mm. Las placas no se deben apoyar en el fondo del recipiente y deben colocarse en posición horizontal.

Como resultado de este ensayo se registra el incremento porcentual medio del aumento de masa de cada una de las placas prefabricadas sumergidas en agua. Cuanto mayor es el volumen de sustitución de los residuos de escorias por conglomerantes menor es la absorción del material (Tabla 6.8.).

Muestra	Absorción de agua (%)
PLR	26,31
PL20S	27,17
PL40S	25,32
PL60S	25,12

Tabla 6.8. Absorción de agua en placas de escayola prefabricadas

El incremento de residuo en la mezcla implica una mayor densidad del material final, disminuyendo por tanto su porosidad. La reducción del número de huecos en la masa hace que la posibilidad de absorción de agua dentro de la misma sea menor. Sin embargo, como se observa en la Tabla 6.8, la muestra PL20S alcanza un incremento de la absorción de agua 3.3% mayor que la muestra tipo. Esto también puede deberse a una compactación diferente en los materiales lo que haya hecho que la porosidad en esta placa sea mayor. En las otras dos muestras ensayadas, PL40S y PL60S, la reducción de la absorción del agua es un 3,9% y 4,7% menor respectivamente.

6.5.4. Resistencia al impacto

El estudio de la dureza superficial de las placas se determina en función de la huella superficial causada al dejar caer una pequeña bola de acero desde una altura predeterminada.

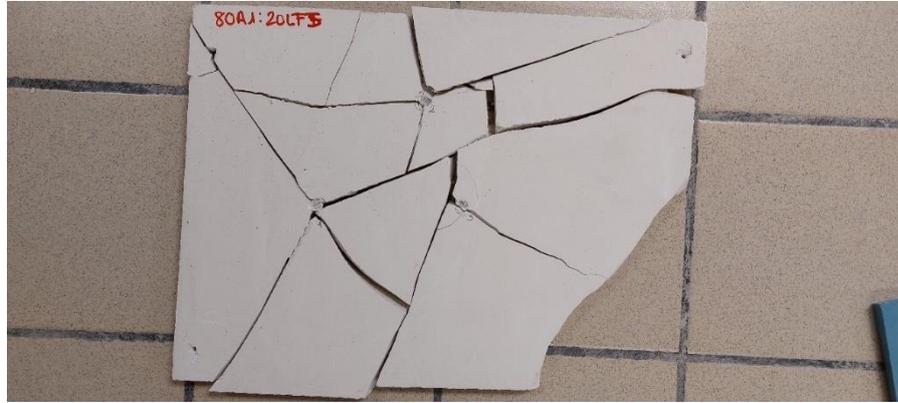


Figura 6.1. Resistencia al impacto en placas de escayola prefabricadas. PL20s

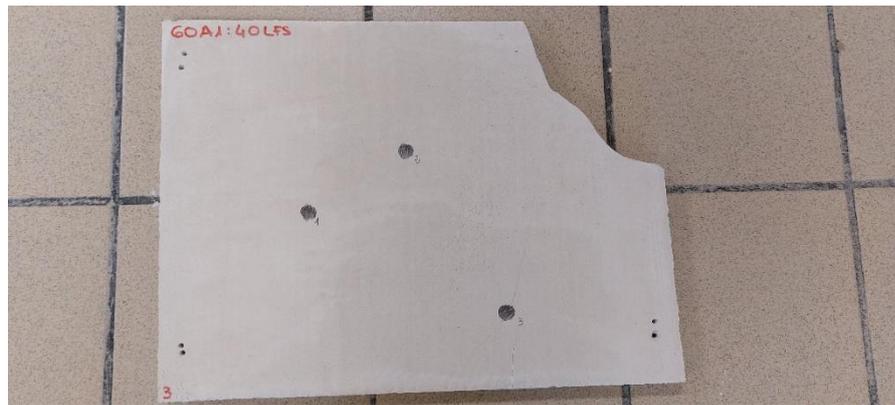


Figura 6.2. Resistencia al impacto en placas de escayola prefabricadas. PL40s



Figura 6.3. Resistencia al impacto en placas de escayola



prefabricadas. PL60s

La Tabla 6.9. recoge el diámetro de la huella creado al caer la bola sobre la placa, con precisión de mm.

Muestra	Lanzamiento 1	Lanzamiento 2	Lanzamiento 3	Media total
PLR	13/12mm Se rompe	12/11mm Se rompe	11/11mm Se rompe	11,67mm
PL20S	10/10mm Se rompe	13/12mm Se rompe	13/14mm Se rompe	12,00mm
PL40S	13/12mm No se rompe	12/12mm No se rompe	13/13mm Se rompe	12,67mm
PL60S	10/11mm Se rompe	13/13mm Se rompe	14/13mm No se rompe	12,33mm

Tabla 6.9. Resultados de la dureza superficial de las placas prefabricadas

Para cada una de las muestras se calcula la media de los tres valores medidos con una precisión de 1mm. A medida que se incrementa la incorporación de residuos en las placas estudiadas disminuye la continuidad de la matriz de conglomerante, rompiendo la estructura cristalina del yeso, y disminuyendo la resistencia al impacto. Son datos que se corresponden con los obtenidos en resistencia mecánica.

6.5.6. Microscopía óptica o confocal

La microscopía confocal es una técnica de imagen avanzada que se utiliza para estudiar muestras tridimensionales con alta resolución y especificidad. Se basa en la fluorescencia de las moléculas emitiendo luz cuando son excitadas con una longitud de onda específica. Para ello, se utilizan capas muy delgadas del material en las que la luz atraviesa la lámina y se



detecta la luz emitida por los fluoróforos con un detector de fotones.

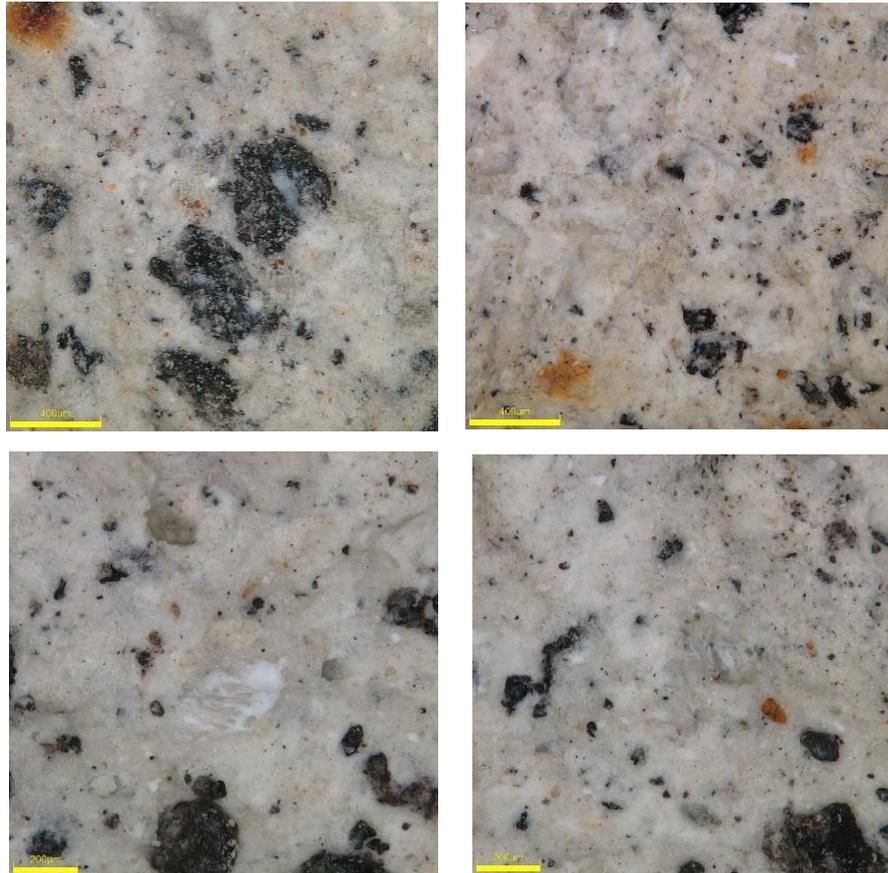


Figura 6.4. Imágenes de la microscopía confocal de la muestra PL40S

En los resultados obtenidos para el análisis de microscopía confocal (Figura 6.4.), se muestra una placa con partículas mezcladas de manera uniforme y bien repartidas.

Aun habiendo fracciones de residuo con diámetros de partícula que no son uniformes, esto no tiene repercusión en las propiedades de durabilidad, resistencia mecánica o alguna otra de sus características físicas, por lo que se deduce que se comportan como matrices muy estables.



En el caso de las escayolas, que son materiales de construcción compuestos principalmente de sulfato de calcio dihidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), y las escorias compuestas mayormente por óxidos de calcio (CaO), la microscopía confocal resulta una herramienta útil para investigar su estructura interna, la distribución de fases, la porosidad y otras características.

6.5.7. Resistencia térmica

Para determinar la transmitancia térmica de un producto, es necesario realizar una caracterización térmica de cada uno de los materiales que se van a estudiar.

El cálculo de la conductividad térmica de cada una de las placas tiene como objetivo conocer su capacidad de aislamiento. Esta información es esencial en la fase de diseño y selección de materiales para proyectos de construcción e influye directamente en la eficiencia energética de los edificios, y para garantizar un adecuado confort térmico en el interior de las edificaciones. Los materiales con una alta capacidad de aislamiento contribuyen a la reducción del consumo energético, ya que disminuyen la necesidad de calefacción y refrigeración, resultando en ahorros económicos y en un menor impacto ambiental.

Por lo tanto, se plantea como un análisis muy interesante que proporciona mucha en términos energéticos.



Figura 6.5. Ensayo de conductividad térmica

Los resultados de la conductividad térmica (λ) de las placas se obtienen utilizando el método del medidor del flujo de calor y el método de la placa caliente guardada.

Conductividad térmica (λ)	0°C	20°C	40°C	60°C	70°C
PLR	0,5112	0,4636	0,4183	0,3922	0,3803
PL20S	0,5236	0,4888	0,4518	0,4293	0,4164
PL40S	0,5417	0,5031	0,4659	0,4424	0,4295
PL60S	0,5389	0,5084	0,4751	0,4557	0,4489

Tabla 6.10. Resultados de conductividad térmica (λ) de las placas prefabricadas

Una vez se conoce el espesor de las placas ensayadas, de 0,015m en nuestro caso, y el dato de la conductividad térmica del material, se calcula su resistencia térmica utilizando la fórmula:

$$RT \text{ (m}^2 \cdot \text{K/W)} = \text{Espesor (m)} / \text{Conductividad térmica (W/m} \cdot \text{K)}$$

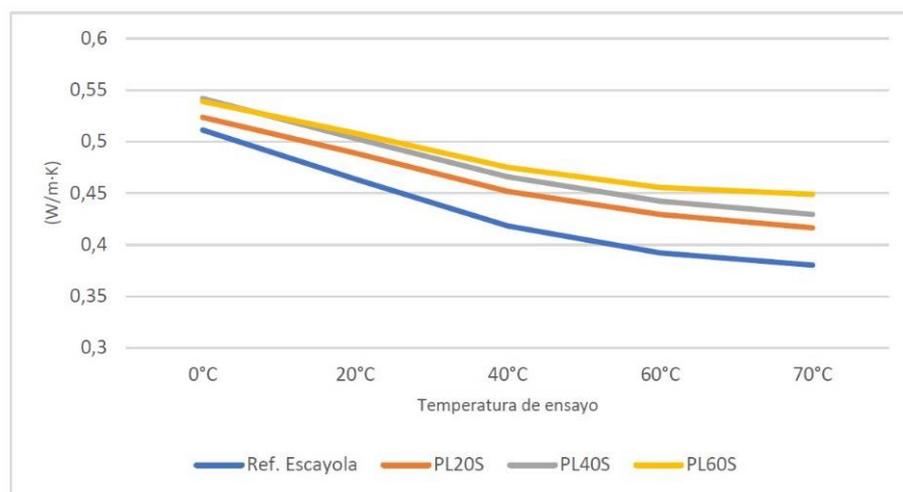


Resistencia térmica	0°C	20°C	40°C	60°C	70°C
PLR	0,0293	0,0324	0,0359	0,0382	0,03944
PL20S	0,0286	0,307	0,332	0,0349	0,0360
PL40S	0,0277	0,0298	0,0322	0,0339	0,0349
PL60S	0,0278	0,0295	0,0316	0,0329	0,0334

Tabla 6.11. Resultados de resistencia térmica de las placas prefabricadas

La conductividad térmica ha sido calculada a diferentes temperaturas ambientales para evaluar el impacto que las condiciones térmicas exteriores pueden tener en la capacidad de aislamiento del material.

Como se muestra en la Gráfica 6.1. a medida que aumenta la temperatura exterior la conductividad térmica del material disminuye, esto puede ser debido a que cuando la temperatura de un conductor se incrementa sus electrones empiezan a disminuir su movimiento lo que hace que aumente la resistividad del material y a su vez la resistencia térmica. Al tener una mayor resistencia térmica el material se convierte en peor conductor.





Gráfica 6.1. Comparativa de conductividad térmica (λ)

Otro dato observado en los ensayos realizados es que la conductividad térmica de las placas aumenta de forma moderada a medida que se incrementa la cantidad de residuo utilizado en su fabricación. Este hallazgo sugiere que el uso excesivo de residuos puede afectar la capacidad de aislamiento térmico de los materiales de construcción. Esta propiedad podría aprovecharse y ser útil en elementos constructivos que buscan transferir calor de manera eficiente, por ejemplo, en suelos radiantes o sistemas de calefacción.

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

Con el objetivo de conocer la contribución al fuego de las placas prefabricadas se realiza el ensayo de reacción al fuego de productos o ensayo de no combustibilidad. Es un ensayo realizado en condiciones ambientales concretas establecidas en la norma UNE-EN 1182:2020.⁶¹ Éstas son, el acondicionamiento de las muestras a una temperatura de $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ con una humedad de $50\pm 5\%$ y un tiempo de acondicionamiento de 144 horas.

Es importante tener en cuenta que los resultados obtenidos en este ensayo no son los únicos criterios de evaluación del riesgo potencial de incendio al utilizar cualquier material de construcción, si bien el ensayo resulta muy útil para obtener información sobre la respuesta al fuego. Otros factores como la aplicación del material, la instalación, el mantenimiento y la exposición deben tenerse en cuenta al evaluar el riesgo potencial de incendio.

Las muestras ensayadas mediante el procedimiento de no combustibilidad se muestran en la Tabla 6.12. En esta tabla se



incluyen los valores de la escayola E35 (A1), sin ningún tipo de residuo incorporado, para establecer una comparativa de los resultados obtenidos.

- PLR: 100% escayola blanca A1
- PL20S: 80% escayola blanca A1 con 20% de escoria blanca.
- PL40S: 60% escayola blanca A1 con 40% de escoria blanca.
- PL60S: 40% escayola blanca A1 con 60% de escoria blanca.

	PLR	PL20S	PL40S	PL60S
Incremento de la temperatura del horno (°C)	0,595	0,256	0,365	0,308
Persistencia de la inflamación (s)	0,00	0,00	0,00	0,00
Pérdida de masa (%)	20,797	18,208	14,515	11,319

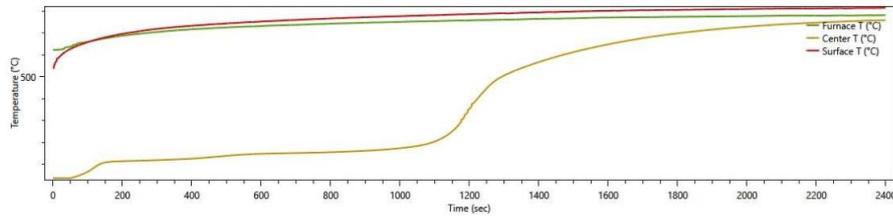
Tabla 6.12. Resultados ensayo de reacción al fuego de las placas prefabricadas

Como se muestra en la Tabla 6.12. todas las muestras cumplen con los criterios fijados en la norma para pasar satisfactoriamente el ensayo, ya que el tiempo de inflamación de cada una de las muestras es inferior a 20 segundos, con un incremento de temperatura en el horno menor de 50°C y una pérdida de masa por debajo del 50%. De hecho, la incorporación de escorias en la matriz de las placas de yeso mejora sustancialmente la capacidad de reacción al fuego, y disminuye la pérdida de masa en condiciones de incendio probándose que la escoria agregada es más inerte que el propio conglomerante que es la escayola.

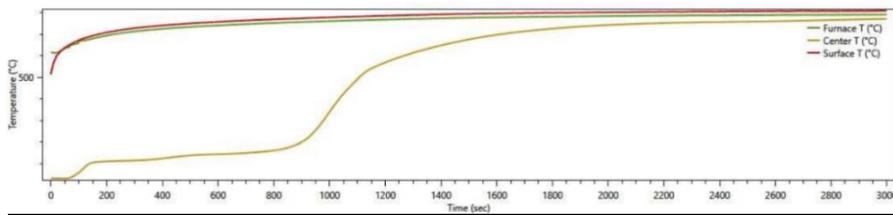
Además de proporcionar información sobre la respuesta al fuego de los materiales de construcción, este ensayo también ofrece gráficos que indican la evolución de la temperatura de cada muestra dentro del horno durante el experimento.



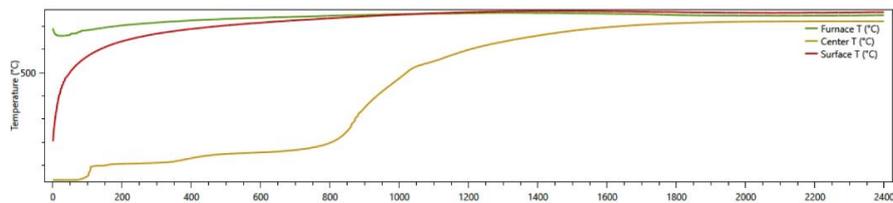
En las Gráficas 6.2., 6.3., 6.4. y 6.5. se muestran los gráficos correspondientes a cada una de las dosificaciones ensayadas. Estos gráficos son útiles para comprender mejor cómo reaccionan los materiales al calor y cómo se comportan en diferentes condiciones de temperatura.



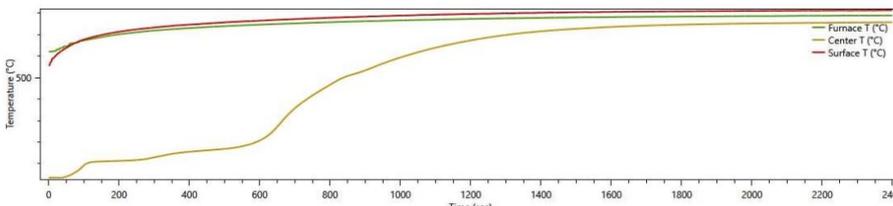
Gráfica 6.2. Evolución de las temperaturas del horno en Escayola E35 (A1) PLR



Gráfica 6.3. Evolución de las temperaturas del horno en muestra PL20S



Gráfica 6.4. Evolución de las temperaturas del horno en muestra PL40S



Gráfica 6.5. Evolución de las temperaturas del horno en muestra PL60S



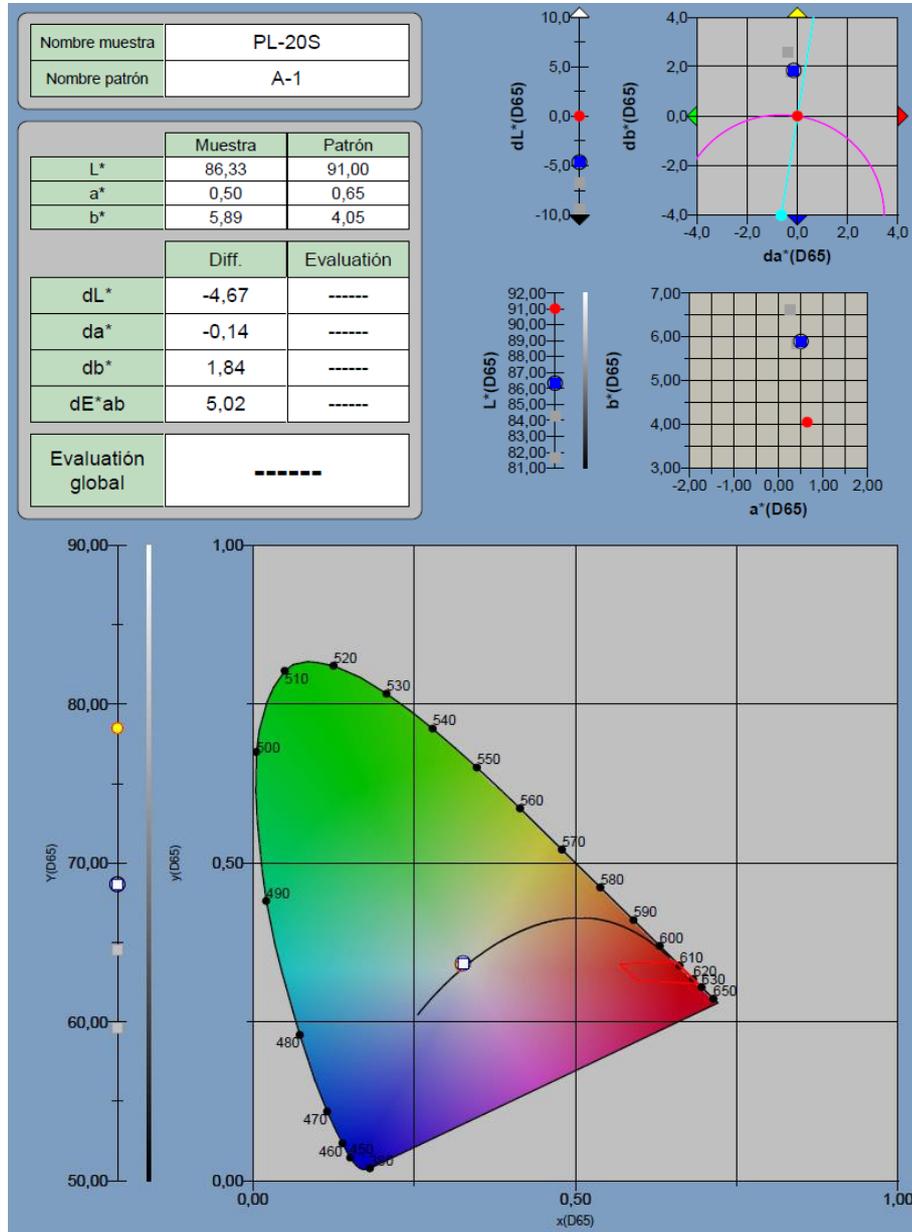
Teniendo en cuenta únicamente la contribución al fuego del material, estos resultados indican que las muestras ensayadas corresponden a la Euroclase A2. De acuerdo con la norma UNE-EN 13501-1:2019,⁶² se trata de un producto No combustible, Sin contribución al fuego.

Los resultados obtenidos en el ensayo de reacción al fuego en las muestras ensayadas son muy favorables ya que, a medida que se incorpora escoria en la matriz, la resistencia al fuego mejora de manera proporcional a la cantidad de residuo. Este hecho conlleva la posibilidad de que estos productos sean utilizados en ambientes industriales térmicamente muy exigentes como pueden ser fundiciones o plantas siderúrgicas, centrales eléctricas, plantas de industria química donde se llevan a cabo procesos exotérmicos o fábricas de producción de vidrio.

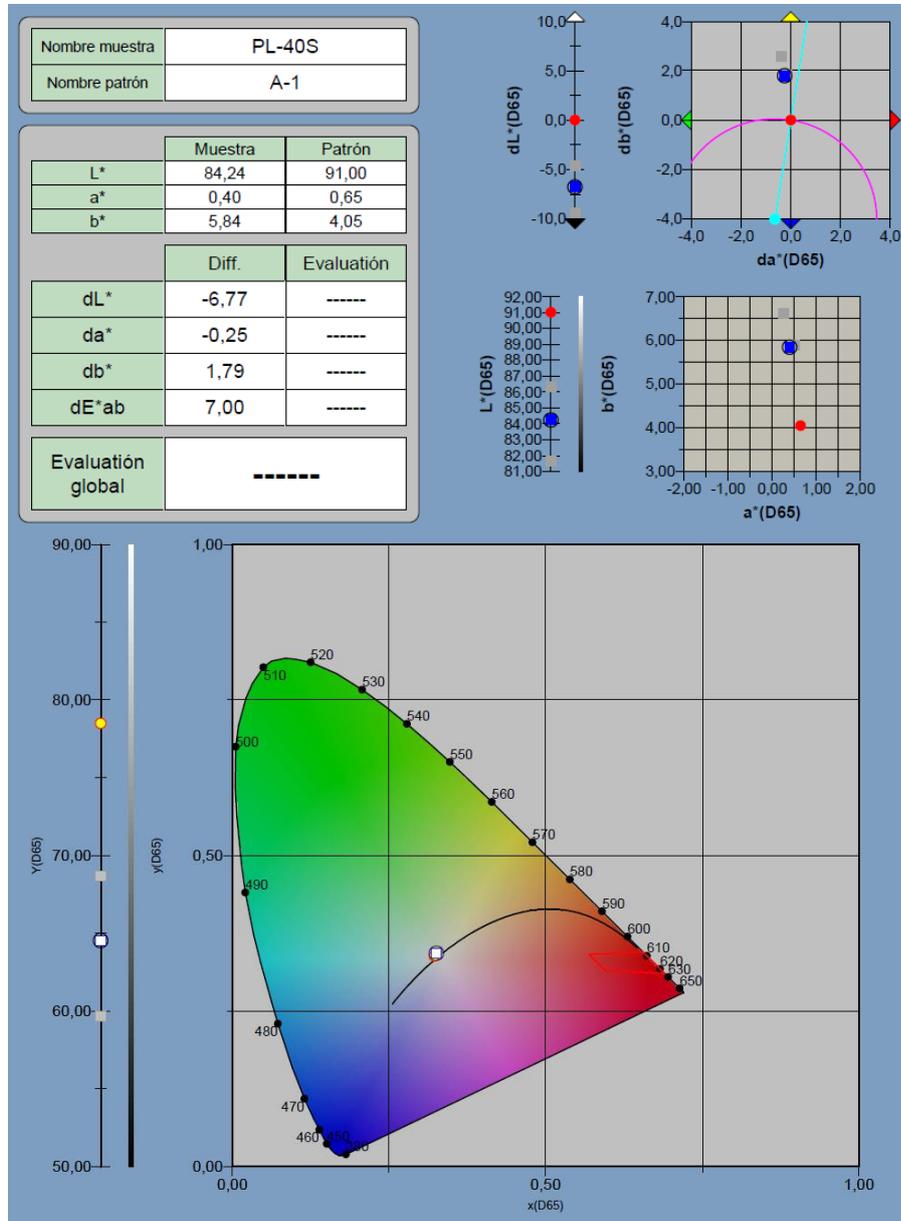
6.5.9. Ensayo de colorimetría

Con el objetivo de conocer la alteración del color en las diferentes muestras en función de los aditivos y escorias incorporadas se realiza el ensayo de colorimetría. Es un ensayo que nos aporta el color exacto de las muestras estudiadas en el espacio de color $L^*a^*b^*$.

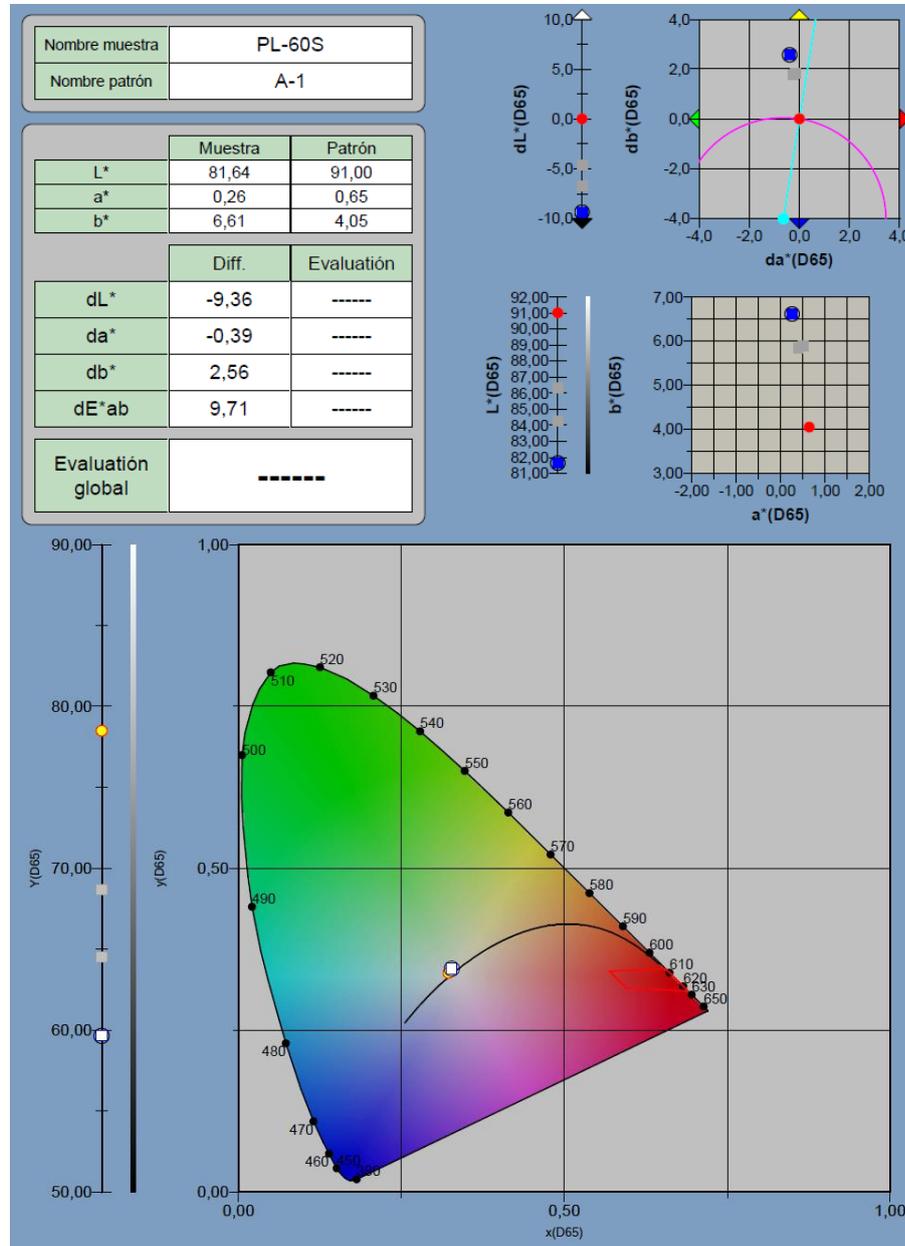
Los resultados del ensayo y las variaciones de color obtenidas en las muestras estudiadas se reflejan en las Gráficas 6.6., 6.7. y 6.8. En ellas, los puntos rojos representan la muestra de escayola pura establecida como punto de referencia en la evaluación del color.



Gráfica 6.6. Ensayo de colorimetría en muestra PL20S



Gráfica 6.7. Ensayo de colorimetría en muestra PL40S.



Gráfica 6.8. Ensayo de colorimetría en muestra PL60S

En la Tabla 6.13. se establece la comparativa de los datos obtenidos en cada una de las muestras. La luminosidad, recogida por el valor L*, disminuye a medida que se incrementa la cantidad de escoria en las muestras, al mismo tiempo que



aumenta dE^* que es la diferencia total de color. Se puede afirmar que, a mayor cantidad de residuo introducida en la mezcla, mayor es la diferencia de color absoluto comparado con la muestra de referencia, obteniendo tonos más oscuros. En todo caso son parámetros cuantitativos muy precisos, si bien estos cambios de color no se aprecian a simple vista. Esto significa que este tipo de placas pueden ser empleadas como materiales vistos en sus aplicaciones habituales.

Muestra	Patrón número	L* (D65)	a* (D65)	b* (D65)	dL* (D65)	da* (D65)	db* (D65)	dE*ab (D65)
PLR	---	89,76	0,58	4,17	---	---	---	---
PL20S	1	86,33	0,50	5,89	-4,67	-0,14	1,84	5,02
PL40S	1	84,24	0,40	5,84	-6,77	-0,25	1,79	7,00
PL60S	1	81,64	0,26	6,61	-9,36	-0,39	2,56	9,71

Tabla 6.13. Comparativa de resultados en el ensayo de colorimetría

6.6. Conclusiones

Según los resultados obtenidos en los diferentes ensayos realizados, la utilización de escorias blancas de altos hornos como sustitución del material conglomerante principal, escayola E35, se reflejan ventajas competitivas respecto a las placas de escayola E35 tradicionales, destacando sobre todo su comportamiento frente al fuego a mayor incorporación de escorias en sustitución del conglomerante.

En cuanto a la densidad de las placas prefabricadas, ésta aumenta a medida que se añade residuo en la mezcla. Esto es debido a la sustitución de parte del conglomerante de la matriz base por otro material cuya densidad es mayor. Otro efecto de esta sustitución es la reducción de la cantidad de agua



necesaria para trabajar estas mezclas y la disminución en la porosidad de las mezclas a medida que se aumenta la adicción de residuos metalúrgicos.

La resistencia a flexión de las muestras se ve mermada a medida que se incrementa la cantidad de residuo en la mezcla. Pese a esta reducción, los resultados obtenidos de resistencia a flexión de las placas ensayadas están por encima del valor mínimo establecido en la normativa de 100N.

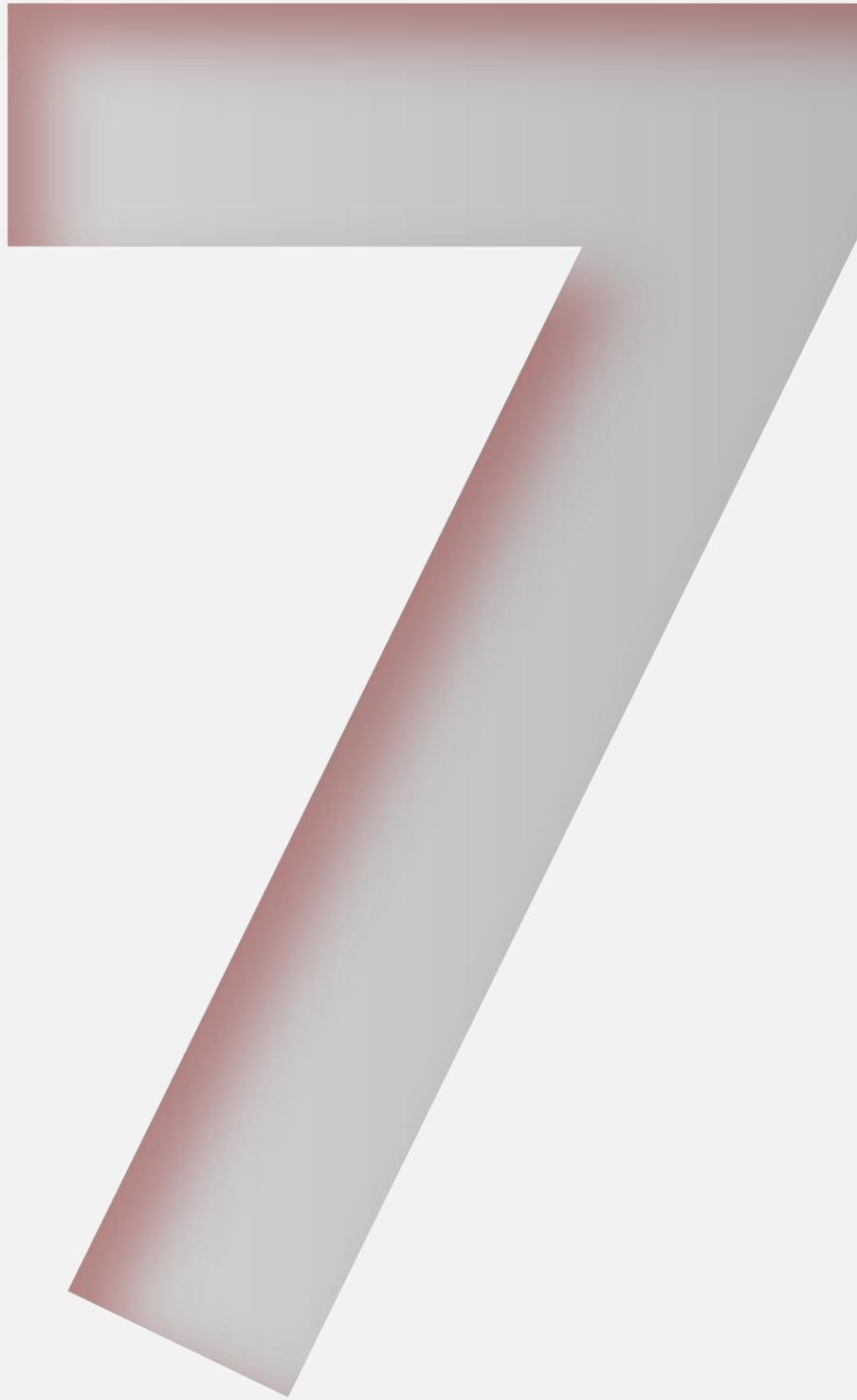
La absorción de agua en las placas ensayadas prueba que es cada vez menor a medida que se aumenta la presencia de residuos metalúrgicos en las mezclas. Esto puede estar provocado por una menor porosidad de las mezclas con el aumento de la presencia de escorias en las mismas.

La dureza superficial es una propiedad que se ve mermada a medida que se incrementa la proporción de escorias en la dosificación de las placas, aunque la reducción de la misma no es drástica.

La capacidad aislante de las placas de escayola con residuos ensayadas se ha evaluado en función de su resistencia térmica, la cual disminuye a medida que aumenta la cantidad de escoria en las mezclas. Pese a esta reducción, el uso de las placas está garantizado por su buen comportamiento al fuego probado en los ensayos de no combustibilidad.

Los ensayos realizados en base a la norma UNE-EN 13501-1⁶² han indicado que la composición de las placas corresponde con una Euroclase A2, materiales no combustibles.





Aplicabilidad de placas prefabricadas de escayola



CAPÍTULO 7. APLICABILIDAD DE PLACAS PREFABRICADAS DE ESCAYOLA

En este capítulo se ha procedido a incorporar las placas de escayola obtenidas en perfilerías al uso para comprobar su viabilidad en situación real de prestación. Estos sistemas prototipo o modelo de prueba demuestran su funcionamiento y comprueban su aptitud al ser colocados antes de su uso en una aplicación o proyecto más grande.

En este caso, la puesta en obra de los materiales en el demostrador implica la instalación y uso de los materiales en una estructura de tamaño reducido para simular las condiciones reales de uso. Además, con este demostrador se pretende no solo comprobar la robustez de los materiales, sino también definir las técnicas constructivas que van ligadas a su colocación, identificando posibles dificultades y realizando los ajustes necesarios antes de comprometer recursos y tiempo en proyectos a gran escala.

7.1. Sistemas de placas de escayola laminadas

Este tipo de tabiques se obtienen a partir de materiales prefabricados, lo que reduce significativamente el tiempo de ejecución y minimiza el desperdicio de materiales, ya que se producen a medida en la fábrica.

Antes de su instalación en la obra, es necesario demostrar que estos tabiques cumplen con los requisitos del Código Técnico de la Edificación en materia de seguridad contra incendios, ahorro de energía y protección acústica. De esta manera, se asegura que cumplen con los estándares de calidad y seguridad requeridos en el sector de la construcción.



7.1.1. Exigencias básicas de seguridad en caso de incendio (SI)

Este documento incluye las exigencias dirigidas a limitar el riesgo de incendio relacionado con los elementos que formen parte del proyecto de edificación. Estos elementos constructivos deben cumplir las condiciones de reacción al fuego que se establecen en la Tabla 7.1.

Situación del elemento	Revestimientos	
	Techos y paredes	Suelos
Zonas ocupables	C-s2, d0	E _{FL}
Pasillos y escaleras protegidos	B-s1, d0	C _{FL} -s1
Aparcamientos y recintos de riesgo especial	B-s1, d0	B _{FL} -s1
Espacios ocultos no estancos, tales como patinillos, falsos techos y suelos elevados (excepto los existentes dentro de las viviendas) etc. o que, siendo estancos, contengan instalaciones susceptibles de iniciar o de propagar un incendio.	B-s3, d0	B _{FL} -s2

Tabla 7.1. Clases de reacción al fuego de los elementos constructivos

7.1.2. Exigencias básicas de ahorro de energía (HE)

Este Documento Básico (DB) tiene por objeto establecer reglas y procedimientos que permiten cumplir el requisito básico de ahorro de energía.⁶⁹ Con el objetivo de conseguir un ahorro energético el Código Técnico de la Edificación limita a un máximo la transmitancia térmica de cada material que compone la envolvente del edificio (fachada, forjados, carpintería), dependiendo de la zona climática en la que el edificio vaya a estar ubicado. (Tabla 7.2)

⁶⁹ Código Técnico de la Edificación. DB-HE "Ahorro de Energía".



	Tipo de Elemento	Zona climática de invierno					
		a	A	B	C	D	E
Unidades del mismo uso	Particiones horizontales	1,90	1,80	1,55	1,35	1,20	1,00
	Particiones verticales	1,40	1,40	1,20	1,20	1,20	1,00
Unidades de distinto uso y zonas comunes	Particiones horizontales y verticales	1,35	1,25	1,10	0,95	0,85	0,70

Tabla 7.2. Máxima transmitancia térmica aceptada en el CTE DB-HE para particiones interiores

7.1.3. Exigencias básicas de protección frente al ruido (HR)

El objetivo del requisito básico “Protección frente el ruido” del CTE consiste en limitar, dentro de los edificios y en condiciones normales de utilización, el riesgo de molestias o enfermedades que el ruido pueda producir a los usuarios como consecuencia de las características de su proyecto, construcción, uso y mantenimiento.

Los elementos de separación interiores de construcción deben tener unas características tales que cumplan la protección frente al ruido mostrado a continuación en la Tabla 7.3.



Protección contra el ruido procedente de:	Recinto habitable protegido	Recinto habitable no protegido
Mismo usuario (en edificios residenciales privados)	$R_A > 33 \text{ dBA}$	$R_A > 33 \text{ dBA}$
Distinto usuario	$D_{nT,A} > 50 \text{ dBA}$	$D_{nT,A} > 45 \text{ dBA}$
Zonas comunes	$D_{nT,A} > 50 \text{ dBA}$	$D_{nT,A} > 45 \text{ dBA}$
Recintos de instalaciones y/o actividad	$D_{nT,A} > 55 \text{ dBA}$	$D_{nT,A} > 45 \text{ dBA}$
Fachadas	$D_{2m,nT,Atr} > 30-47 \text{ dBA}$	-
Medianerías con otro edificio	$D_{nT,A} > 55 \text{ dBA}$	$D_{nT,A} > 55 \text{ dBA}$
Medianerías sin otro edificio	$D_{2m,nT,Atr} > 40 \text{ dBA}$	$D_{2m,nT,Atr} > 40 \text{ dBA}$
Cerramiento del ascensor con cuarto de maquinaria independiente	$R_A > 50 \text{ dBA}$	$R_A > 50 \text{ dBA}$

Tabla 7.3. Exigencias mínimas de protección frente al ruido en elementos de separación verticales según CTE DB-HR

7.2. Sistemas de construcción en seco

Se denomina comúnmente un tabique a cada unidad de obra estudiada y replanteada, formada por la combinación de una o varias placas de yeso prefabricadas de diferentes espesores y tipos, atornilladas a una estructura metálica formada a base de elementos verticales y horizontales, rellena o no de material aislante.

Atendiendo a esta definición, se realiza la siguiente clasificación de tabiques:

Tabiques sencillos

Son aquellos formados por una estructura metálica sencilla a la cual se atornilla una única placa de yeso prefabricada a cada lado. Para cumplir con las especificaciones recogidas en el Código Técnico de la Edificación, el alma de la estructura metálica debe ser rellena de material aislante tanto térmico como acústico.

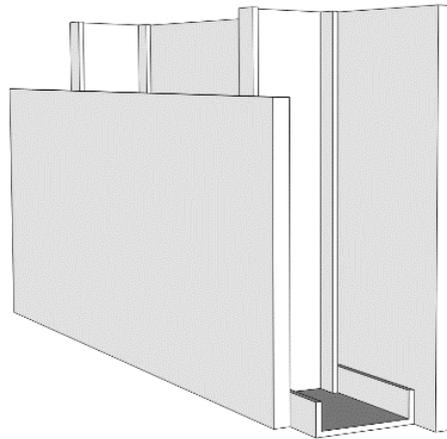


Figura 7.1. Esquema de tabique sencillo

Tabiques múltiples

Los tabiques múltiples están compuestos por una estructura metálica sencilla, a cuyos lados se atornillan dos o más placas de yeso de diferentes tipos y espesores.

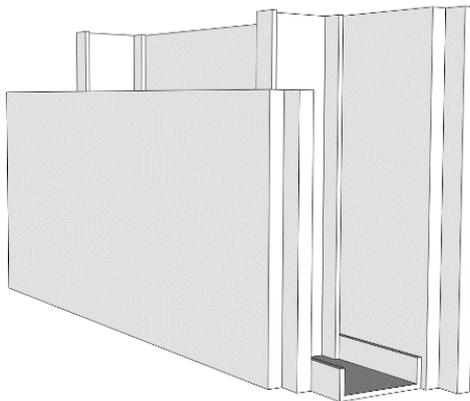


Figura 7.2. Esquema de tabique múltiple

Tabiques dobles

A diferencia de los tabiques múltiples, los tabiques dobles están formados por dos estructuras metálicas sencillas, sujetas y



arriostradas entre sí, y a cada uno de los sus lados exteriores se fija una placa de yeso prefabricada.

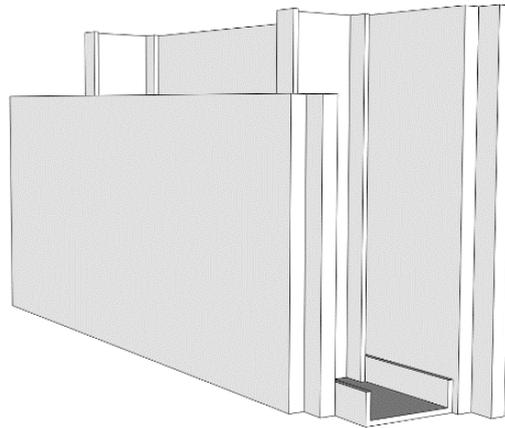


Figura 7.3. Esquema de tabique doble

Trasdosados directos

Entendiéndose por trasdosado como el revestimiento interior de un muro exterior o el revestimiento de cualquiera de las dos caras de un muro interior, los trasdosados directos son aquellos que se hacen directamente sobre el muro con pastas de agarres o utilizando una estructura auxiliar para facilitar la puesta en obra.

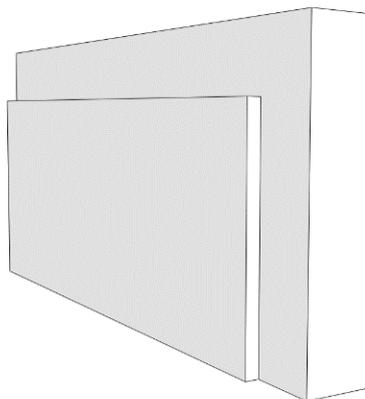


Figura 7.4. Esquema de trasdosado directo



Trasdosados autoportantes

Son aquellos trasdosados en los que la placa o placas de yeso son atornilladas a una estructura autoportante independiente y ésta puede o no estar anclada al muro existente.

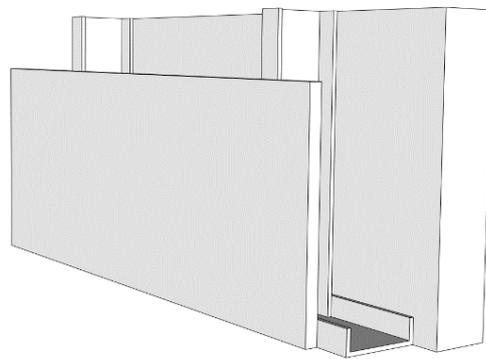


Figura 7.5. Esquema de trasdosado autoportante

7.3. Simulación de puesta en obra y resultados obtenidos

Con el objetivo de comprobar la idoneidad de las diferentes dosificaciones de placas prefabricadas de escayola con escorias, se ha fabricado a escala de laboratorio un sistema constructivo singular. La intención principal consiste en poder reproducir una colocación similar a una puesta en obra al uso, simulando el comportamiento que tendría a escala real. Se ha planteado la construcción de un sistema de tabiquería interior autoportante formado por los siguientes elementos:

- *Estructura base*, formada por perfiles de acero galvanizados dispuestos tanto verticalmente (montantes) de 70 x 39/41mm,



como horizontalmente (canales) de 70 x 35mm, con un espesor nominal de 55mm.

- *Cámara de aire interior de 60mm*, creada entre los paneles que se rellena con aislamiento de lana de roca comercial.
- *Doble placa de escayola prefabricada*, elaboradas en el laboratorio con 15mm de espesor y colocadas a ambas caras de tabique.

Esquema	Sistema Ensayado	Rt	Zona climática
	Aire interior	0,13	Burgos Zona E1
	PL20S/PL40S/PL60S	0,03	
	PL20S/PL40S/PL60S	0,03	
	Lana mineral	1,76	
	PL20S/PL40S/PL60S	0,03	
	PL20S/PL40S/PL60S	0,03	
	Aire interior	0,13	
	Total Rt	2,13	
	U=1/Rt	0,47	< 1,00 (W/m ² ·K) Partición Vertical

Tabla 7.4. Cálculo de transmitancias del sistema ensayado en el laboratorio

El tabique final generado es un sistema autoportante de doble capa con un espesor total de 130mm. Posee una resistencia térmica $R_t = 2,13 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ con una transmitancia $U=0,47 \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$.

En las Tablas 7.4 y 7.5, se detalla la composición específica de los materiales utilizados en cada sistema constructivo. Uno de los resultados principales que se puede observar es que la transmitancia térmica de las placas con residuos de escorias es menor que la de las placas utilizadas en



el sistema comercial, lo que le convierte en un producto más aislante y menos transmisor.

Esquema	Sistema Ensayado	Rt	Zona climática
	Aire interior	0,13	Burgos Zona E1
	Placa estándar	0,06	
	Placa estándar	0,06	
	Lana mineral	1,75	
	Placa estándar	0,06	
	Placa estándar	0,06	
	Aire interior	0,13	
	Total Rt	2,25	
	U=1/Rt	0,44	< 1,00 (W/m ² ·K) Partición Vertical

Tabla 7.5. Cálculo de transmitancias de sistema comercial

En el ensayo realizado se coloca la estructura metálica sobre un soporte de madera (Figura 7.6.). Se rellena la estructura metálica con 60mm de lana de roca y se colocan las placas prefabricadas de escayola con escorias, de dimensiones de 300 x 400 x 15mm, a ambos lados de la estructura metálica.

El objetivo principal se basa en utilizar las placas elaboradas en el laboratorio como parte del ensayo, sin necesidad de utilizar ninguna placa comercial como parte del sistema constructivo.



Figura 7.6. Estructura base sobre soporte de madera



7.3.1. Placas prefabricadas dosificación PL20S

La primera placa (PL20S) con una dosificación de 80% Escayola A1 y 20% de escorias blanca se atornilla a la base metálica en 3 puntos y como se ve en la Figura 7.7. no hay rotura de la placa.



Figura 7.7. Colocación placa prefabricada PL20S



Sobre esta placa se coloca otra placa prefabricada de la misma dosificación. En el momento de atornillar la segunda placa y fijarla a la estructura metálica de perfiles galvanizados se produce una rotura de ésta en dos de los tres puntos de perforación del tornillo.



Figura 7.8. Rotura placa prefabricada PL40S



7.3.2. Placas prefabricadas dosificación PL40S

El segundo ensayo trata de replicar lo anteriormente realizado, pero utilizando las placas prefabricadas con una dosificación de 60% Escayola A1 y 40% de escorias blancas (PL40S).

La placa base es atornillada en tres de sus cuatro esquinas, y como se puede ver no se produce rotura o fragmentación de la placa en el momento del atornillado.



Figura 7.9. Colocación placa prefabricada PL60S



Una vez se tiene la primera placa colocada, se atornilla la segunda placa a la estructura de perfiles galvanizados y como se observa en la Figura 7.10. tampoco se produce rotura en ninguno de los puntos de fijación.



Figura 7.10. Colocación placa prefabricada PL40S



7.3.3. Placas prefabricadas dosificación PL60S

Se repite por tercera vez el ensayo, pero esta vez se utilizan las placas prefabricadas con una dosificación de 40% Escayola A1 y 60% de escorias blancas (PL60S).

Como se aprecia en las Figuras 7.11. y 7.12. en el momento que el tornillo atraviesa la placa para su sujeción en la estructura metálica se produce la rotura de la placa.



Figura 7.11. Rotura placa prefabricada PL60S



Figura 7.12. Rotura placa prefabricada PL60S



Aun habiéndose fracturado y roto la primera placa, se continúa con el proceso constructivo y se intenta colocar la segunda placa para ver su comportamiento. Como se muestra en la Figura 7.13, resiste mucho mejor, manteniendo su integridad en todo momento, incluso en el momento de su fijación a la estructura base.



Figura 7.13. Colocación placa prefabricada exterior PL60S



7.4. Conclusiones

En este capítulo se han empleado placas prefabricadas de escayola que contienen residuos de escorias como una alternativa a las placas de yeso tradicionales en sistemas de entramados autoportantes para tabiques sencillos y múltiples, en situaciones reales de prestación. Se ha comprobado que estas placas pueden ser utilizadas en la obra, siempre que se manejen los sistemas y herramientas adecuados y se cumplan las normativas pertinentes.

Se observa que el comportamiento de las placas varía según la dosificación de residuo de escoria utilizada. En los tabiques dobles con los prefabricados de dosificación PL20S, la placa colocada en la parte interior del tabique se atornilla sin ningún contratiempo, mientras que la exterior se fisura y fractura cuando se le atornilla a la estructura metálica. Por otro lado, la dosificación PL40S presenta una mayor robustez, ya que ninguna de las dos placas se fisura al ser atornillada al sistema portante, lo que las hace más estables. A la vista de este buen resultado, especialmente considerando la elevada sustitución del 40% del yeso por residuos de escoria, significa que podría ser la mejor opción a la hora de elegir funcionalidad en una hipotética puesta en obra.

Tomando como referencia el mismo tipo de tabique, pero con dosificación PL60S, la placa interior se fractura al ser atornillada, pero la exterior resiste adecuadamente.

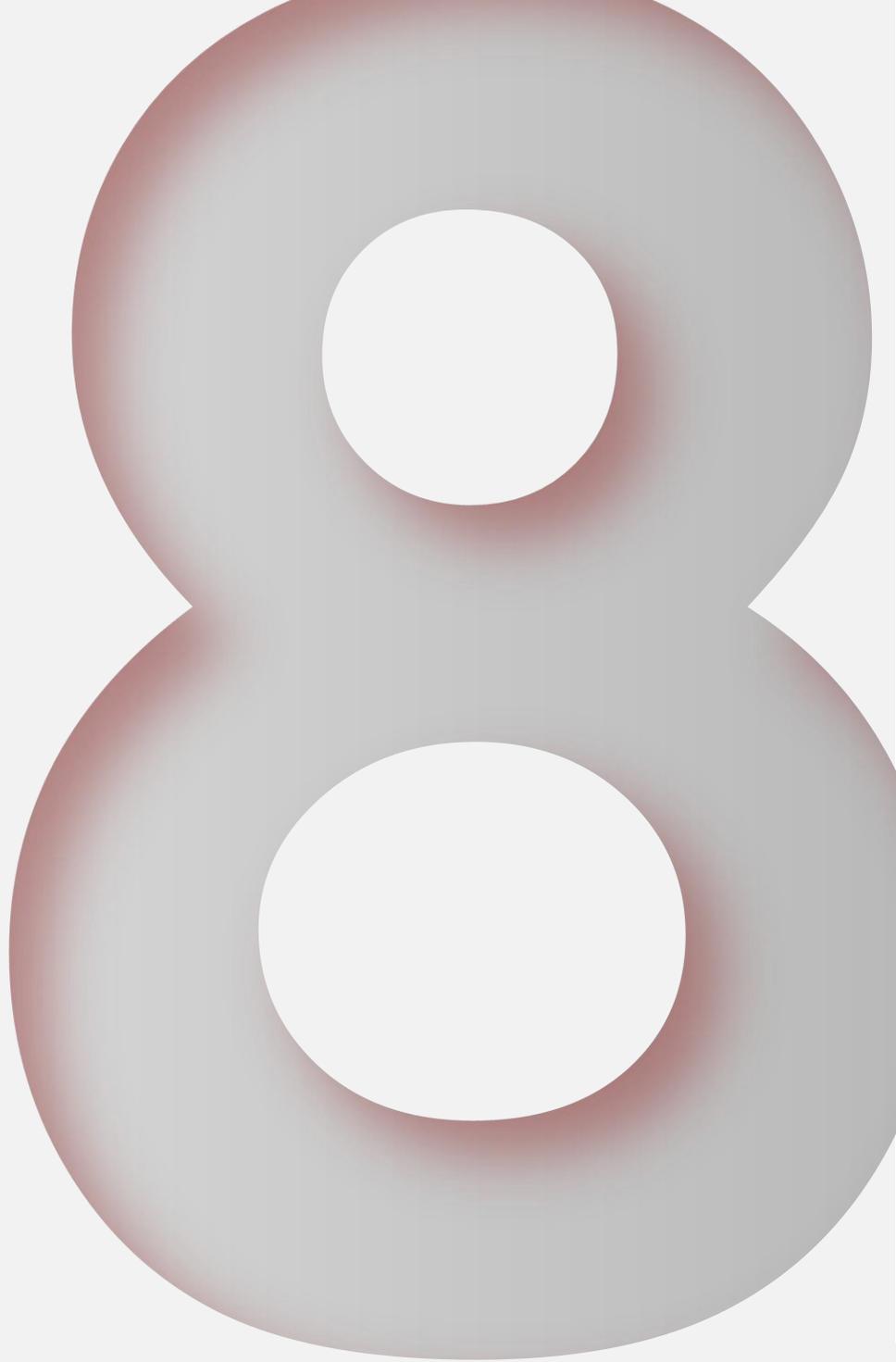
Con respecto a la eficacia de aislamiento térmico, se ha comprobado que el sistema ensayado tiene valores muy similares a los de un sistema estándar y cumple con los requisitos de transmitancia térmica del Código Técnico de la Edificación para particiones verticales.



Finalmente, se ha observado que las placas prefabricadas de escayola con escoria tienen un comportamiento mejorado frente al fuego, lo que posibilita su empleo en ambientes industriales o en casos específicos de elevadas solicitudes térmicas.



Capítulo 7. Aplicabilidad de placas prefabricadas de escayola



**Simulación energética.
Análisis del ciclo de vida**



CAPÍTULO 8. SIMULACIÓN ENERGÉTICA. ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA

En el desarrollo de esta investigación se ha tratado en varias ocasiones la importancia que tiene la investigación de productos respetuosos con el medio ambiente y la sociedad. En este capítulo se analiza y evalúa la sostenibilidad del producto innovador estudiado, placas de escayola prefabricadas con incorporación de residuos de escorias blancas de horno de cuchara.

8.1. Análisis del ciclo de vida (ACV)

La creciente concienciación social sobre los impactos ambientales de las actividades humanas fueron la base para la creación del ACV, sobre todo al final de la segunda mitad del siglo XX. Durante esa época hubo una evolución en percepción científica y pública sobre la relación entre el medio ambiente y la actividad humana. El gran desarrollo industrial, el aumento de la población y el crecimiento exponencial del consumo de bienes, llevaron a la generación de una preocupación cada vez mayor sobre la degradación del medio ambiente y el agotamiento de los recursos naturales.

Con el crecimiento y evolución de estas preocupaciones, los expertos, científicos y responsables políticos comenzaron a buscar maneras de evaluar los impactos ambientales de una manera más generalista y holística. Uno de los principales desafíos fue encontrar metodologías y herramientas que pudiesen evaluar estos impactos ambientales de una manera integral, considerando todas y cada una de las etapas de creación de ese producto o proceso.



Con estas bases surgieron los primeros pensamientos y enfoques que sentaron las bases de lo que se conoce hoy como análisis de ciclo de vida (ACV). A medida que ha avanzado la investigación en este campo, se ha hecho palpable la necesidad de una herramienta que evalúe y cuantifique el impacto ambiental del producto en todas sus etapas, desde la extracción de materias primas hasta su disposición final, de una manera integral y estandarizada.

En la década de 1990, el ACV comenzó a cobrar más y más protagonismo e importancia, con una aceptación generalizada sobre todo a partir de la publicación de las normas ISO 14040⁵⁴ y 14044.⁵⁶ Estas normas establecieron los requisitos y principios necesarios para la realización de un ACV, dentro de un marco normativo que ha sido aceptado de manera global.

Las pautas generales a seguir cuando se realiza un ACV están definidas por las normas UNE-EN ISO 14040⁵⁴ y UNE-EN ISO 14040:2006/A1,⁵⁵ donde se establece el contexto y los principios a considerar cuando se realiza este tipo de estudio y análisis. Por otro lado, las normas UNE-EN ISO 14044⁵⁶ y UNE-EN ISO 14044:2006/A1⁵⁷ establecen los criterios y pautas para lograr dichas evaluaciones.

El campo de aplicación del ACV tiene un espectro bastante amplio donde se incluyen entre otras la industria manufacturera, evaluando y mejorando la sostenibilidad de los procesos de producción, el sector energético donde compara diferentes fuentes de energía y sus tecnologías de generación, la construcción y arquitectura donde se evalúan los materiales de construcción utilizados optimizando el diseño y teniendo en cuenta la huella de carbono de los proyectos realizados, la alimentación y agricultura donde se considera el impacto ambiental de los distintos sistemas de producción agrícola, o la gestión de residuos y tratamiento de agua donde se analizan las diferentes opciones disponibles.



Prestando una mayor atención al sector de la construcción y la arquitectura, el ACV se utiliza para buscar y evaluar materiales de construcción más ecológicos y con una huella de carbono menos nociva para el medio ambiente^{51, 70, 71}. Se analizan los materiales incluidos en cada producto, incluyendo los materiales reciclados, para estudiar y conocer las ventajas de los mismos comparándolos con productos totalmente producidos a partir de materias naturales vírgenes. A este tipo de ACV se le denomina aseveración comparativa, donde dos productos que ejercen la misma función son comparados evaluando su declaración ambiental.

8.2. Metodología

El análisis ambiental desarrollado en este trabajo de investigación se va a realizar para las muestras de yeso con incorporación de residuos de escorias, así como para la muestra de referencia. Asimismo, se incluye un análisis del producto final obtenido, placas prefabricadas de yeso con residuos de escoria, añadiendo también la comparativa con la placa de yeso estándar.

El método desarrollado para determinar el impacto de la huella ambiental de un producto o servicio está dividido en cuatro etapas relacionadas entre sí: definición del objetivo y el alcance, análisis de inventario, evaluación del impacto e interpretación.

⁷⁰ M.A. Pedreño-Rojas, J. Fořt b, R. Černý, P. Rubio-de-Hita. Life cycle assessment of natural and recycled gypsum production in the Spanish context. (Vol. 253). (2020). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120056>

⁷¹ A. Quintana-Gallardo, J. Alba, R. Rey, J.E. Crespo-Amorós, I. Guillén-Guillamón. Life-cycle assessment and acoustic simulation of drywall building partitions with bio-based materials. (Vol. 12, pages 1-16). (2020). <https://doi.org/10.3390/polym12091965>



La fase de definición del objetivo y alcance es la primera de todas donde se incluyen los límites del sistema y el nivel de detalle. El alcance de un ACV depende del sistema a utilizar, el uso final del estudio y la unidad funcional utilizada en el estudio.

La segunda fase del análisis del inventario del ciclo de vida (fase ICV) es un inventario de los datos de entrada y salida considerados en el proceso, incluyendo entre otros la masa de los materiales, la energía utilizada en la modelación del producto o los vertidos y emisiones ambientales generadas.

La fase de evaluación del impacto del ciclo de vida (fase EICV) es la tercera fase del ACV. Su propósito es ofrecer datos adicionales que faciliten la evaluación de los resultados del inventario del ciclo de vida (ICV) de un producto o sistema, con el fin de mejorar la comprensión de su relevancia ambiental. En esta fase se analizan los valores obtenidos en la fase anterior asignándoles diferentes categorías de impacto.

Por último, la fase de interpretación, es la última fase donde se resumen y evalúan los resultados del IVC, de la EICV o ambos. Esta fase establece las bases para la obtención de conclusiones y recomendaciones, y se trazan las primeras líneas para la toma de futuras decisiones en base de los objetivos y alcance definidos previamente.

8.3. Definición del objetivo y alcance del análisis

Siguiendo la estructura que se ha llevado en toda esta investigación, el objetivo final del ACV es la realización de una aseveración comparativa donde las muestras de yeso con escorias estudiadas (PL20S, PL40S, PL60S), y la muestra de referencia son analizadas evaluando su rendimiento ambiental.



Se pretende hacer un análisis de la creación y fabricación de las masas estudiadas donde los procesos de obtención de las mismas son evaluados, obteniendo un rendimiento ambiental de los productos analizados. Se pretende determinar cuál de todas las mezclas estudiadas es la más respetuosa con el medio ambiente.

8.3.1. Alcance del estudio

Dado que el material estudiado está en fase experimental, se analizan las fases del ciclo de vida relativas al producto, que son la obtención de las materias primas y transporte de las mismas, y su fabricación. El producto que engloba las mezclas con residuos de escorias metalúrgicas es muy parecido al de las mezclas de referencia, al que hay que añadir la adquisición, transporte y de las escorias.

8.3.2. Unidad funcional

Se define en la Norma UNE-EN ISO 14040-2006⁵⁵ como desempeño cuantificado de un sistema del producto para su uso como unidad de referencia. En esta investigación se considera como unidad funcional a 1m² de revestimiento de pasta de yeso estándar de 15mm de espesor.

En esta misma norma se hace referencia al flujo de referencia como la medida de las salidas de los procesos requerida para cumplir la función expresada mediante la unidad funcional, en este caso siendo los flujos de referencia de cada análisis 1m² de pasta de yeso estándar de 15mm de espesor y 1 m² de pasta de yeso estándar mezclado con residuos escorias blancas de horno de cuchara de 15 mm de espesor.



Considerando que la placa final va a ser utilizada en paramentos verticales, se establece la unidad de referencia en 1m^2 de pasta para poder hacer evaluaciones comparativas de los resultados con diferentes productos de aplicaciones similares.

8.3.3. Límites del sistema

Los límites del sistema definen los procesos unitarios a ser incluidos en el sistema y se definen según la Norma UNE-EN ISO 14040-2006⁵⁵ como el conjunto de criterios que especifican cuales de los procesos unitarios son parte de un sistema del producto. En este análisis se calculan las etapas de suministro de materias primas, desplazamiento o transporte de las materias primas hasta el lugar fabricación y finalmente la fabricación de las mezclas y placas. Este ACV se conoce como realizado de la "cuna a la puerta". Los módulos considerados en este análisis se reflejan en la tabla 8.1.

Los datos utilizados han sido obtenidos en el año 2024, y se consideran los límites geográficos como la distancia comprendida entre el lugar de obtención de las materias primas y el laboratorio de fabricación de las masas y las placas finales, que ha sido el laboratorio de la Universidad Politécnica de Burgos.



Etapa de producto	A1	Suministro de materias primas	X
	A2	Transporte a fábrica	X
	A3	Fabricación	X
Construcción	A4	Transporte a obra	MNE
	A5	Instalación / Construcción	MNE
Uso	B1	Uso	MNE
	B2	Mantenimiento	MNE
	B3	Reparación	MNE
	B4	Sustitución	MNE
	B5	Rehabilitación	MNE
	B6	Uso de energía en servicio	MNE
	B7	Uso de agua en servicio	MNE
Fin de vida	C1	Deconstrucción / Demolición	MNE
	C2	Transporte	MNE
	C3	Tratamiento de los residuos	MNE
	C4	Eliminación	MNE
	D	Potencial de reutilización, recuperación y/o reciclaje	MNE

X = módulo incluido, MNE = módulo no evaluado

Tabla 8.1. Módulos considerados en el ACV de la fase experimental.

8.3.4. Requisitos de calidad de los datos

Para el análisis, se emplean tanto los datos obtenidos durante el desarrollo de esta investigación, como datos secundarios extraídos de la base de datos de Ecoinvent (v3.6.).



8.3.5. Metodología de evaluación de impacto

Los cálculos se realizan utilizando el software SimaPro (v9.1.), siguiendo el modelo de impacto EN 15804+A2 (v 1.00)⁷² de la Comisión Europea.

8.3.6. Categorías de impacto

Definiéndose la categoría de impacto como la clase que representa asuntos ambientales de interés a la cual se pueden asignar los resultados del análisis del inventario del ciclo de vida, las categorías consideradas en este análisis son:

-Cambio climático: se trata de un indicador a escala global que evalúa las emisiones de gases efecto invernadero a la atmósfera.

-Agotamiento de la capa de ozono: indicador a escala global que define el potencial de agotamiento del ozono de diferentes gases.

-Radiación ionizante: indicación del impacto de las emisiones radioactivas en el ser humano.

-Formación de ozono fotoquímico: evaluación de la oxidación fotoquímica realizada en productos que generan ozono a nivel de la troposfera. Es perjudicial en concentraciones altas.

-Partículas en suspensión: estudia la emisión de partículas en el medio ambiente y su impacto en el ser humano.

⁷² Comisión Europea. (2023, julio). European Platform on LCA | EPLCA - EN 15804 reference package.
<https://eplca.jrc.ec.europa.eu/LCDN/EN15804.xhtml>



-Toxicidad humana – no cancerígena: recoge los efectos en el ser humano de la ingesta o inhalación de sustancias tóxicas. Los factores de caracterización son calculados describiendo el destino, la exposición y los efectos de las sustancias para un horizonte temporal infinito.

-Toxicidad humana – cancerígena: recoge los efectos en el ser humano de la ingesta o inhalación de sustancias tóxicas cancerígenas. Los factores de caracterización son calculados describiendo el destino, la exposición y los efectos de las sustancias para un horizonte temporal infinito.

-Adificación: evalúa el impacto de las sustancias acidificantes en suelos, aguas subterráneas, aguas superficiales, ecosistemas, materiales y organismos.

-Eutrofización: analiza los impactos causados por niveles excesivos de macronutrientes en el medioambiente.

-Ecotoxicidad: evalúa el impacto en los ecosistemas de agua dulce la acción de las emisiones de sustancias tóxicas al agua, suelo y aire.

-Uso del suelo: recoge los efectos causados por la utilización de la superficie de la tierra.

-Uso del agua: recoge los efectos causados por la utilización del agua potable disponible en la naturaleza.

-Uso de recursos, fósiles: evalúa el impacto del consumo de los recursos fósiles no renovables.

-Uso de recursos, minerales y metales: evalúa el impacto del consumo de los recursos minerales y metales no renovables.



Categoría de impacto	Clave	Unidad
Cambio climático	CC	Kg CO ₂ eq
Agotamiento de la capa de ozono	ODP	Kg CFC ₁₁ eq
Radiación ionizante	IR	KBq U-235 eq
Formación de ozono fotoquímico	POF	Kg NMVOC eq
Partículas en suspensión	PM	Disease inc.
Toxicidad humana – no cancerígena	HTOX-NC	CTU _h
Toxicidad humana – cancerígena	HTOX-C	CTU _h
Adificación	AC	Mol H ⁺ eq
Eutrofización, agua dulce	FEU	Kg P eq
Eutrofización, marina	MEU	Kg N eq
Eutrofización, terrestre	TEU	Mol N eq
Ecotoxicidad, agua dulce	ECOTOX	CTU _e
Uso del suelo	LU	Pt
Uso del agua	WU	m ³
Uso de recursos, fósiles	FRD	MJ
Uso de recursos, minerales y metales	MRD	Kg Sb eq

Tabla 8.2. Categorías de impacto utilizadas en el análisis de ciclo de vida de la fase experimental.

8.4. Análisis del inventario del ciclo de vida (ICV)

Se trata de la fase en la que de manera cualitativa y cuantitativa se recopilan las entradas y salidas para un sistema del producto a través de su ciclo de vida.



8.4.1. Adquisición de materias primas (A1)

Las entradas consideradas en la adquisición de materias primas corresponden a la cantidad de materia prima necesaria para la elaboración de las masas estudiadas durante esta investigación. Tabla 8.3.

En el caso de las escorias, el impacto ambiental de éstas se considera nulo, ya que se trata de residuo proveniente de un producto inicial de acería. De no reutilizarse en la elaboración de estas placas prefabricadas, las escorias serían desechadas y depositadas en vertederos.

Muestra	Escayola/escoria (%)	Escayola (Kg/m ²)	Escoria blanca (Kg/m ²)	Agua (Kg/m ²)	Aditivo (Kg/m ²)
PLR	100/0	21,13	-	12,68	-
PL20S	80/20	18,76	4,69	11,73	0,15
PL40S	60/40	15,33	10,22	11,50	0,12
PL60S	40/60	11,12	16,69	11,12	0,09

Tabla 8.3. Composición de las mezclas por unidad funcional de la fase experimental

8.4.2. Transporte de materias primas (A2)

Con el objetivo de calcular el combustible utilizado en el transporte de las materias primas desde su punto de extracción hasta el laboratorio donde se han evaluado, se necesita conocer la distancia entre los dos puntos (Tabla 8.4.), la cantidad de material transportado, así como el tipo de vehículo utilizado para el transporte.



En nuestro caso, dado que la cantidad de materia prima utilizado en el análisis de las mezclas evaluadas es pequeña, y que el suministro realizado por parte de la empresa de transporte se ha hecho como parte de otro tipo de entrega de pedido, se desconocen los datos y el impacto que el transporte puede tener en el análisis final. Por ello, para la escayola, las escorias y el aditivo se han utilizado los datos de las bases de datos para el cálculo del impacto del transporte.

	Escayola	Escoria blanca	Agua	Aditivo
Distancia (Km)	724	282	-	462

Tabla 8.4. Distancia de transporte de las materias primas al laboratorio

8.4.3. Fabricación

En este proceso se cuantifican las entradas y salidas necesarias para la obtención del producto final, haciéndose un desglose por proceso unitario.

Para la elaboración de las mezclas descritas anteriormente, el tamaño de partícula utilizado en las escorias es igual o menor a 2mm, para ello, se ha realizado un cribado por el tamiz de 2mm de toda la escoria utilizada en las mezclas. Éste ha sido un cribado realizado a mano en el laboratorio, por lo que no se incluye en este ACV la energía de este proceso, este proceso tendría consideración y repercutiría en el caso de realizar un ACV económico.

Para las escorias se consideran nulos los residuos procedentes del embalaje de las mismas.

En el proceso de fabricación, la electricidad utilizada por cada equipo empleado en la formación de las mezclas



estudiadas se realiza de manera individual basándose en el tiempo de utilización de cada equipo y su potencia.

El tiempo de amasado de las mezclas es el mismo para cada una de ellas, ya que se rige según la norma UNE-EN 13279-2.³⁹ Cada mezcla debe ser amasada durante 60 segundos sin interrupción y la energía total por amasada en este proceso es de 0,0925Kw/m². Siendo el impacto de este proceso mínimo en el cálculo total del ACV, y teniendo el mismo impacto en cada una de las mezclas, este impacto es descartado en los resultados finales.

Una vez el proceso de fabricación de las mezclas es terminado, éstas se colocan en los moldes dónde se dejarán secando durante 24 horas. Este proceso de secado se da en unas estufas a temperatura y humedad constantes. El consumo de electricidad de este proceso es el mismo para todas las dosificaciones, por lo que no es tenido en cuenta para el cálculo del ACV.

Finalmente, pasadas las 24 horas de secado, se procede al desmolde de las placas de sus recipientes, siendo un proceso totalmente manual que no tiene impacto en este ACV.

En este proceso de fabricación se dan dos pasos, el primero dónde las entradas corresponden con las materias primas utilizadas en la elaboración de las mezclas y la electricidad empleada en el amasado, siendo las salidas las pastas de yeso con residuos obtenidas y las emisiones generadas en el proceso. En el segundo proceso, las entradas se corresponden con las pastas de yeso en estado húmedo y la electricidad utilizada en el secado de las mismas, y las salidas son las placas de yeso con escorias endurecidas y las emisiones generadas en el secado de las mismas.



8.5. Evaluación del impacto del ciclo de vida (EICV) e interpretación

En esta fase se realiza la evaluación e interpretación de los datos obtenidos en la fase anterior además de proporcionar algunos datos adicionales. Para llevar a cabo esta fase se utiliza el software SimaPro, dedicado a la realización de Análisis de Ciclo de Vida.

Los datos obtenidos en la evaluación de las mezclas en fase experimental considerando todas las categorías de impacto, se muestran en la Tabla 8.5. En esta fase las categorías estudiadas con valores más bajos significan que tienen un menor impacto en el estudio y por tanto un menor impacto ambiental, teniendo un rendimiento medioambiental mejor.



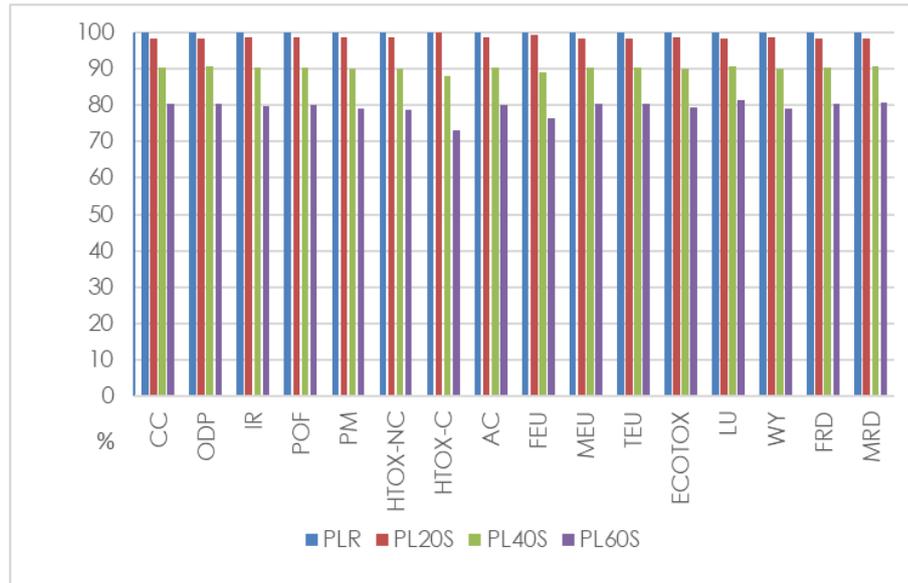
Clave	PLR	PL20S	PL40S	PL60S
CC Kg CO ₂ eq	2962191,7	2913439,99	2677599,64	2376259,25
ODP Kg CFC ₁₁ eq	0,66784592	0,65644981	0,60436554	0,53766014
IR KBq U-235 eq	240002,98	236388,28	216378,94	190941,43
POF Kg NMVOC eq	16428,64	16170,53	14829,56	13120,89
PM Disease inc.	0,22758935	0,22438708	0,20480687	0,17999778
HTOX-NC CTU _h	0,04258409	0,04201961	0,03826275	0,03351498
HTOX-C CTU _h	0,00160633	0,00160422	0,00141096	0,00117339
AC Mol H ⁺ eq	15340,5714	15099,2082	13847,9796	12253,5233
FEU Kg P eq	270,516091	268,190636	240,93804	206,935044
MEU Kg N eq	5145,1817	5059,62556	4652,33807	4131,5971
TEU Mol N eq	56374,8815	55440,2546	50970,1582	45255,9602
ECOTOX CTU _e	37940564,3	37394653,8	34162937,8	30063895,8
LU Pt	29366477,3	28815278,3	26659631,6	23879171,4
WU m ³	134760,567	132931,318	121158,086	106264,597
FRD MJ	44803102,7	44058131,6	40511489,2	35976909,6
MRD Kg Sb eq	78,6173625	77,2348176	71,2138062	63,4864556

Tabla 8.5. Categorías de impacto utilizadas en el análisis de ciclo de vida de la fase experimental.

Para facilitar la comprensión de datos recogidos en la Tabla 8.5., dado que el orden de magnitud de cada una de las categorías es muy diferente, éstos han sido representados de una manera más visual en la Gráfica 8.1. En esta gráfica los datos han sido recogidos de forma relativa en la que la



categoría con mayor impacto se le ha asignado el 100%, y el resto de las categorías han sido representadas en función a su impacto.



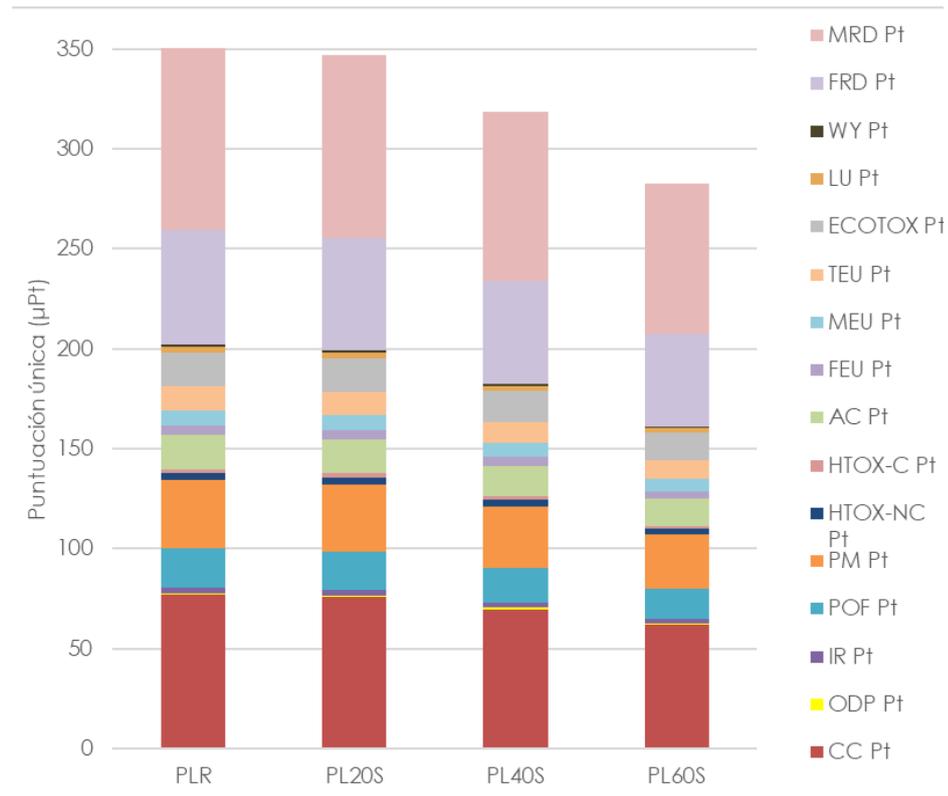
Gráfica 8.1. Comparativa de resultados obtenidos para cada una de las categorías de impacto utilizadas en el análisis de ciclo de vida de la fase experimental.

Como se refleja en la gráfica anterior, en todas y cada una de las categorías estudiadas el mayor impacto lo tiene la mezcla PLR, que se corresponde con la mezcla comercial sin incorporación de escorias. Esta gráfica también refleja que, a mayor cantidad de escorias utilizadas en las placas, menor es el impacto de cada una de las categorías estudiadas.

Un menor impacto ambiental de las mezclas a medida que se incorpora una mayor parte de escoria, puede deberse a una composición menos nociva de las escorias, un transporte al punto de estudio mayor en el caso de la escayola, o la combinación de ambas.



Con el objetivo de mostrar los resultados de una manera más visual se han sometido a un proceso de ponderación dónde se obtiene un indicador global del impacto y se obtiene una puntuación única.

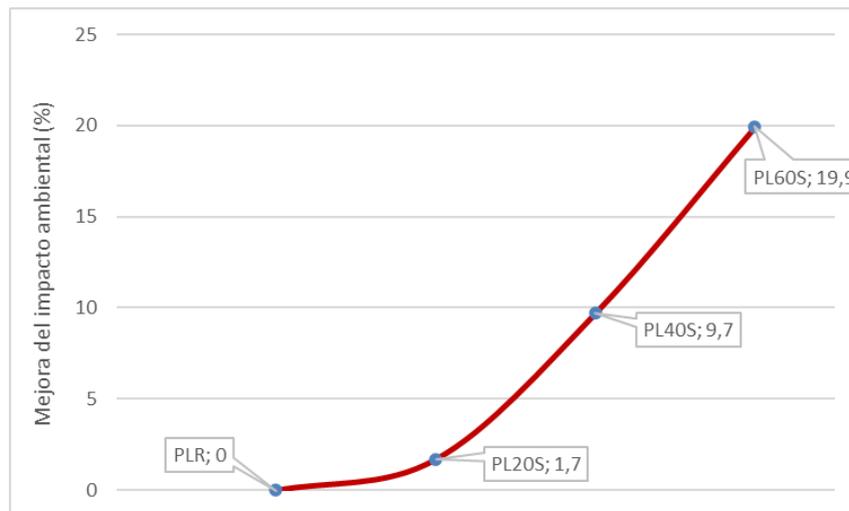


Gráfica 8.2. Comparativa de resultados obtenidos de puntuación única para cada una de las categorías de impacto utilizadas en el análisis de ciclo de vida de la fase experimental.

Dado que los materiales utilizados en las cuatro dosificaciones estudiadas son los mismos, pero en diferentes proporciones, los resultados obtenidos de puntuación única están alineados con los anteriormente obtenidos, dónde la placa de referencia sin incorporación de escorias tiene un mayor impacto ambiental.



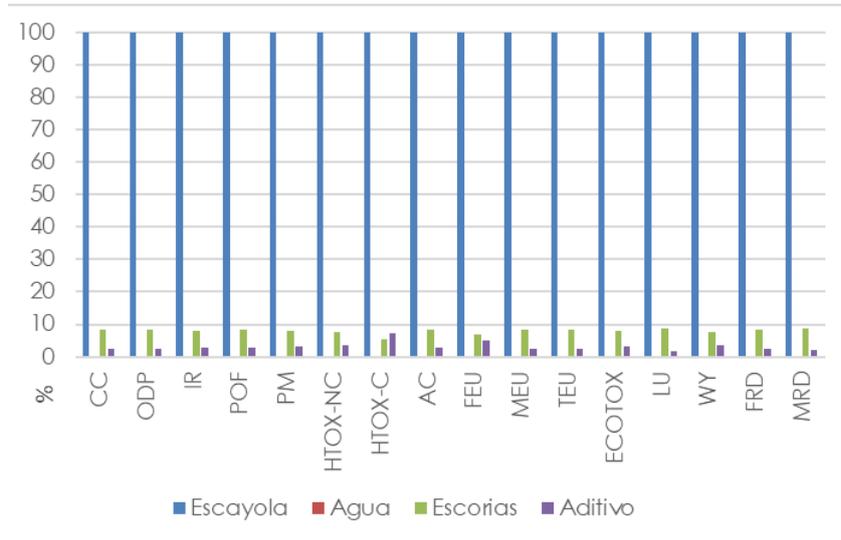
La dosificación PL20S presenta un impacto ambiental un 1.7% menor que la muestra de referencia, esta reducción es del 9.7% en el caso de la muestra PL40S, y de un 19.9% en el caso de la muestra PL60S. Este buen resultado se debe a una sustitución del 60% de conglomerante por las escorias recicladas.



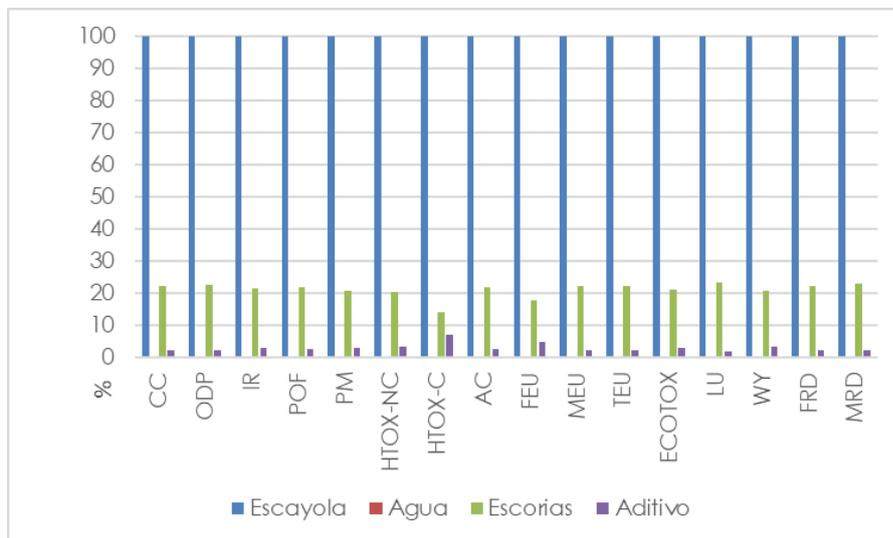
Gráfica 8.3. Reducción de la evolución del impacto ambiental de las muestras estudiadas.

La evolución de la mejora del impacto ambiental obtenido por las muestras estudiadas con incorporación de escorias recicladas presenta una tendencia lineal, como se muestra en la Gráfica 8.3., lo que puede suponer que con una sustitución de escorias de un 80% del conglomerante la tendencia de mejora del impacto ambiental será proporcional a las obtenidas hasta el momento en esta investigación.

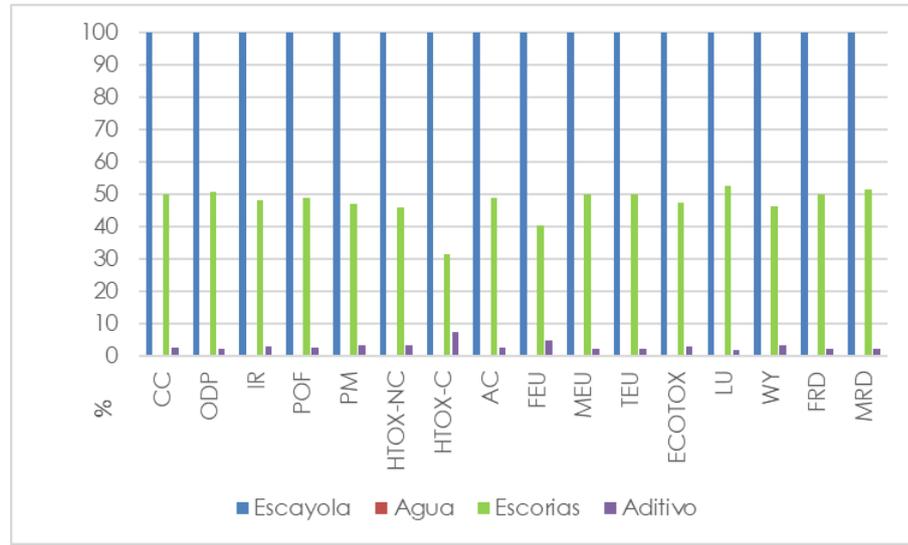
Una vez se ha realizado la comparativa general de todas las mezclas en cada categoría de impacto, se realiza un estudio de las categorías de impacto por material de manera individual para cada de las mezclas estudiadas.



Gráfica 8.4. Comparativa de resultados obtenidos para cada una de las categorías de impacto utilizadas en el análisis de ciclo de vida de la fase experimental en la muestra PL20S.



Gráfica 8.5. Comparativa de resultados obtenidos para cada una de las categorías de impacto utilizadas en el análisis de ciclo de vida de la fase experimental en la muestra PL40S.



Gráfica 8.6. Comparativa de resultados obtenidos para cada una de las categorías de impacto utilizadas en el análisis de ciclo de vida de la fase experimental en la muestra PL60S.

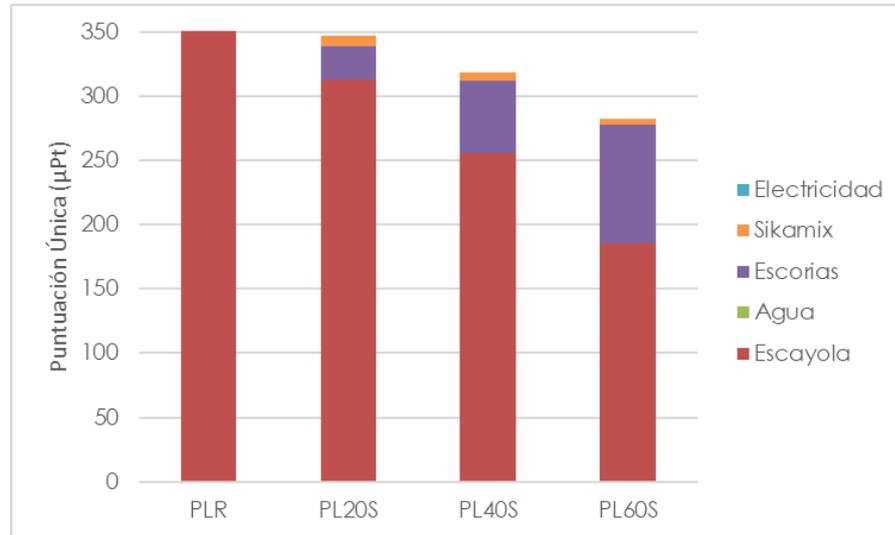
Como se muestra en las Gráficas 8.4., 8.5. y 8.6. el mayor impacto ambiental, con una gran diferencia, corresponde con la escayola, seguido de las escorias, el aditivo y finalmente el agua.

Cabe destacar que en la muestra PL60S, donde el 60% de la escayola ha sido substituida por escorias, el impacto de la escoria en comparación con el de la escayola es en la mayor parte de las categorías la mitad. Una de las razones del elevado impacto de la escayola puede ser debida al proceso de transporte, ya que la distancia desde su lugar de extracción al laboratorio es 2.5 veces mayor al de la escoria.

Los mismos resultados de puntuación única obtenidos hasta ahora se muestran en la Gráfica 8.6., donde se recoge el impacto de las materias primas que forman parte de las



muestras. Además, se incluye el consumo eléctrico generado en el proceso de amasado de las mezclas.



Gráfica 8.6. Comparativa de resultados obtenidos de puntuación única para cada una de las categorías de impacto utilizadas en el análisis de ciclo de vida de la fase experimental según materia prima.

De forma general se puede confirmar que los procesos de las mezclas estudiadas con mayor peso en el AVC son los relacionados con las materias primas, con un notable mayor impacto provocado por la escayola seguido con las escorias. Como se observa en la Gráfica 8.6., el impacto del agua y el aditivo es de muy poca relevancia en comparación con el resto de materiales.

En la mezcla PLR casi el 100% de su impacto ambiental proviene de la escayola con una ínfima parte proveniente de la electricidad del proceso de amasado. Cabe destacar que en la mezcla PL60S, donde el 60% de la escayola es substituida por escorias, el impacto de la escayola (185,6 µPt) es el doble que el de las escorias (92 µPt), siendo su presencia en la muestra de un 40% frente a un 60% de escorias. Esto refleja que el impacto medioambiental de las escorias recicladas es proporcionalmente menor al de la escayola. Por otra parte, a



mayor cantidad de escoria en las mezclas menor cantidad de aditivo se necesita, por lo que su impacto también disminuye. El consumo eléctrico de las mezclas es el mismo para cada una de ellas ya que el tiempo de amasado es el mismo para las cuatro muestras estudiadas.

8.6. Conclusiones

Basándose en los resultados obtenidos en el ACV sobre las diferentes dosificaciones estudiadas en la fase experimental, se puede reducir el impacto ambiental del producto de referencia con la incorporación de escorias de horno de cuchara.

Se puede concluir también que dicho impacto ambiental de las mezclas estudiadas mejora cuanto mayor es la cantidad de escorias recicladas incorporadas en masas de escayola. Se mejora el impacto que el producto final tiene en la naturaleza y disminuye los valores de todas las categorías ambientales estudiadas.

El ACV determina que la función del producto final como placa de yeso prefabricada para paramentos verticales, se puede cumplir con una menor cantidad de materia prima virgen utilizada e incorporando residuos de materiales reciclados.



Conclusiones



CAPÍTULO 9. CONCLUSIONES

Siguiendo la creciente preocupación que existe en la sociedad sobre la construcción y su impacto en el medio ambiente, se ha desarrollado una conciencia global para reducir los impactos ambientales negativos generados en el sector de la edificación. Esto ha llevado al desarrollo de estudios para generar nuevos materiales y técnicas de construcción de menor impacto en la naturaleza, que reduzcan la generación de residuos, den un segundo uso a los materiales ya utilizados, y disminuyan las emisiones de CO₂.

En el desarrollo de esta Tesis Doctoral se ha estudiado la fabricación de un producto innovador como es la placa prefabricada de escayola con incorporación de escorias de horno de cuchara blancas, para utilización en particiones verticales. En esta investigación se ha demostrado la viabilidad de creación de un producto que cumple con los estándares europeos de construcción a la vez que obtiene una mejora en el impacto ambiental en comparación con el producto estándar.

Las conclusiones obtenidas en la investigación son las siguientes:

- Se ha realizado el estudio y análisis de los materiales utilizados para la fabricación del producto final. La escayola, las escorias, el aditivo y el agua son combinados en distintas proporciones dando lugar a tres productos que se ensayan en esta investigación. PL20S, PL40S y PL60S.

- A medida que se incrementa la cantidad de escoria utilizada para sustituir al conglomerante, disminuye la cantidad de agua necesaria para obtener una trabajabilidad adecuada en la mezcla, siendo la cantidad de aditivo siempre



proporcional al porcentaje de conglomerante empleado (escayola + escorias).

- La densidad de las placas prefabricadas aumenta a medida que la proporción de escoria en la muestra es mayor, obteniendo un incremento del 21.3% cuando la sustitución del conglomerante es de un 60%.

- La reducción del número de huecos en la masa produce como consecuencia una menor absorción de agua dentro de la misma a mayor cantidad de escoria presente en la muestra, dándose una reducción del 4,7% en la absorción de agua para las muestras con un contenido de escorias del 60%.

- La resistencia a flexión de las mezclas se ve reducida de manera considerable a medida que aumenta la cantidad de escorias en las mezclas, pero cabe destacar que los datos obtenidos para todas las dosificaciones se encuentran, en todos los casos, por encima de los 100N, valor mínimo establecido en la normativa europea

- La conductividad térmica ha sido calculada a diferentes temperaturas ambientales, Se demuestra que, a medida que aumenta la temperatura exterior, la conductividad térmica del material disminuye. La explicación puede deberse al comportamiento inherente de los materiales conductores. Al incrementar la temperatura el movimiento de sus electrones disminuye, y la resistividad del material aumenta.

- Para la misma temperatura, la conductividad térmica de las placas aumenta de forma moderada a medida que se incrementa la cantidad de residuo utilizado en su fabricación.

- En el ensayo de reacción al fuego, todas las muestras cumplen con los criterios fijados en la norma europea, acreditando su buen comportamiento, y cumpliendo con los



estándares necesarios, incluyendo la muestra de referencia. La incorporación de escorias en la matriz de las placas de yeso mejora sustancialmente la capacidad de reacción al fuego, y reduce en gran medida la pérdida de masa en condiciones de incendio. De esta manera, queda probado que la escoria agregada es mucho más inerte que la escayola. Teniendo en cuenta la contribución al fuego del material, los resultados obtenidos indican que los productos finales obtenidos cumplen y se corresponden con una clasificación Euroclase A2, es decir se trata de un producto no combustible, sin contribución al fuego.

- El ensayo de colorimetría indica que, a mayor incorporación de residuo introducida en la mezcla, mayor es la diferencia de color absoluto comparado con la muestra de referencia, obteniendo tonos más oscuros. Asimismo, los datos obtenidos son parámetros cuantitativos muy precisos, pero se aprecian a simple vista, pudiéndose emplear las placas como materiales vistos en sus aplicaciones habituales.

- Los ensayos de puesta en obra realizados han tenido lugar en una estructura de tamaño reducido para simular las condiciones reales de uso. Las placas prefabricadas de dosificación PL40S presentan el mejor comportamiento en la puesta en obra, ya que ninguna se fisura al ser atornillada al sistema portante.

- Del ACV realizado, se concluye que la dosificación PL20S presenta un impacto ambiental un 1.7% menor que la muestra de referencia, esta reducción es del 9.7% en el caso de la muestra PL40S, y de un 19.9% en el caso de la muestra PL60S. Este buen resultado se debe a una sustitución del 60% de conglomerante por las escorias recicladas.

Como conclusión final, se determina que las placas de escayola prefabricadas reforzadas con escorias de acerías



estudiadas en esta investigación, son aptas para su uso y puesta en obra, logrando una reducción del impacto ambiental obtenido en comparación con el producto estándar. Dado su buen comportamiento frente a la temperatura y el fuego, podrían resultar especialmente interesantes en aplicaciones en ambientes industriales.

Futuras líneas de investigación



FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

A medida que se han ido obteniendo datos, resultados y conclusiones durante el desarrollo de esta Tesis Doctoral, han surgido diferentes temas derivados de la investigación cuyo análisis no ha sido incluido en la misma, pero plantean la posibilidad de que sean desarrolladas en futuras líneas de investigación:

1. Explorar la posibilidad de emplear otro tipo de escoria diferente a la empleada en esta Tesis para la sustitución de conglomerante, evaluar las características de los productos obtenidos y valorar la viabilidad del producto final.
2. Considerar la incorporación de otro tipo de aditivos a las mezclas estudiadas, para mejorar algunas de las propiedades físicas, químicas o mecánicas obtenidas, como puede ser la mejoría de la reducción de la resistencia a flexión de las placas prefabricadas con incorporación de escorias.
3. Ampliar el estudio de resistencia al fuego de las placas prefabricadas, utilizando en el estudio particiones verticales completas, incorporando la perfilería en el ensayo para tener un conocimiento más detallado de las propiedades del sistema constructivo como unidad.
4. Estudiar la posibilidad de la puesta en obra del material final, placas prefabricadas completas en particiones verticales. Analizar el comportamiento que éstas pueden tener en entornos industriales donde las exigencias térmicas ambientales sean mayores, siguiendo el buen rendimiento de las placas prefabricadas estudiadas en esta investigación.



5. Ampliar el ACV realizado en esta Tesis incorporando la parte de ACV industrial, dónde se incluye en el análisis la evaluación de la puesta en obra del material durante su vida útil, y su reciclaje, reutilización o desecho al final de su periodo de utilidad.
6. Completar el análisis medioambiental con la envolvente de un edificio tipo, comparando los resultados de referencia con los que se consiguen sustituyendo el yeso habitual por el producto reciclado con escorias.

Referencias Bibliográficas



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

Asociación Española de Normalización (AENOR). (2006). UNE-EN ISO 14044 Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Requisitos y directrices.

Asociación Española de Normalización (AENOR). (2007). UNE-EN ISO 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). (2010). UNE-EN ISO 520:2005+A1. Placas de yeso laminado. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo.

Asociación Española de Normalización (AENOR). (2011). UNE-EN ISO 13238. Ensayos de reacción al fuego para productos de construcción. Procedimiento, de acondicionamiento y reglas generales para la selección de sustratos.

Asociación Española de Normalización (AENOR) (2014). UNE-EN ISO 13279. Yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción.

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

Asociación Española de Normalización (AENOR). (2019). UNE-EN ISO 13501-1:2019. 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). (2020). UNE-EN ISO 1182. Reaction to fire tests for products. Non-combustibility test.



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/And 1:2020).

Asociación española de reciclaje de residuos de construcción y demolición. Informe de Producción y Gestión de Residuos de Construcción y Demolición (RCD) en España. Resumen del periodo 2016-2020.

A. Adediran, J. Yliniemi, S. Moukannaa, D.D. Ramteke, P. Perumal, M. Illikainen. Enhancing the thermal stability of alkali-activated Fe-rich fayalite slag-based mortars by incorporating ladle and blast furnace slags: Physical, mechanical and structural changes. *Cement and Concrete Research*. Vol. 166. (2023). <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2023.107098>

A. Asadi Ardebili, P. Villoria Sáez, M. González Cortina, D. M. Tasán Cruz, Á. Rodríguez Sáiz, E. Atanes-Sánchez. Mechanical characterization of gypsum mortars with waste from the automotive sector. *Construction and Building Materials*. Vol. 310. (2023). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130675>

A. Kielė, D. Vaičiukynienė, G. Tamošaitis, R. Bistrickaitė. Thermal Properties of Alkali Activated Slag Plaster for Wooden Structures. *Scientific Reports*. Vol. 10. Issue 11. (2020). Article number 726. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-57515-8>

A. Kuqo, C. Mai. Mechanical properties of lightweight gypsum composites comprised of seagrass *Posidonia oceanica* and pine (*Pinus sylvestris*) wood fibers. *Construction and Building Materials*. Vol. 282. (2021). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122714>

A. Lübeck, A.L.G. Gastaldini, D.S. Barin, H.C. Siqueira. Compressive strength and electrical properties of concrete with white Portland cement and blast-furnace slag. *Cement and Concrete Composites*, Vol. 34. Pages 392-399. (2012). <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.11.017>

A. Quintana-Gallardo, J. Alba, R. Rey, J.E. Crespo-Amorós, I. Guillén-Guillamón. Life-cycle assessment and acoustic



simulation of drywall building partitions with bio-based materials. Vol. 12. Pages 1-16. (2020). <https://doi.org/10.3390/polym12091965>

A. Rodrigo-Bravo, L. Alameda Cuenca-Romero, V. Calderón, Á. Rodríguez, S. Gutiérrez-González. Comparative Life Cycle Assessment (LCA) between standard gypsum ceiling tile and polyurethane gypsum ceiling tile. *Energy and Buildings*. Vol. 259. (2022). <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.111867>

A. Rodríguez, S. Gutiérrez-González, M. Horgnies, V. Calderón. Design and properties of plaster mortars manufactures with ladle furnace slag. *Materials and Design*. Vol. 52. Pages 987-994. (2013). <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.06.041>

A. Rodríguez, S. Gutiérrez-González, M.I. Prieto, A. Cobo, V. Calderón. Analysis of long-term corrosion behavior in mortars containing recycled ladle furnace slag using computerized tomography and SEM. *Materials and Corrosion*. Vol. 66. Pages 199-205. (2014). <https://doi.org/10.1002/maco.201407697>

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

B. Samali, S. Nemati, P. Sharafi, F. Tahmoorian, F. Sanati. Structural performance of polyurethane foam-filled building composite panels: A state-of-the-art. *Composite Science*. Vol. 3. (2019). <https://doi.org/10.3390/jcs3020040>

Código Técnico de la Edificación. DB-HE "Ahorro de Energía".

Comisión Europea. (2023, julio). European Platform on LCA EPLCA - EN 15804 reference package. <https://eplca.jrc.ec.europa.eu/LCDN/EN15804.xhtml>



C. Moretti, L. Hamelin, L.G. Jakobsen, M.H. Junginger, M.M. Steingrimsdottir, L. Høibye, L. Shen. Cradle-to-grave life cycle assessment of single-use cups made from PLA, PP and PET. *Resources, Conservation and Recycling*. Vol. 169. (2021). <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105508>

D.A. Kontogeorgos, I.D. Mandilaras, M.A. Founti. Fire behavior of regular and latent heat storage gypsum boards. *Fire and Materials*. Vol. 39. Pages 507-517. (2015). <https://doi.org/10.1002/fam.2246>

EUROFER The European Steel association. European Steel in figures 2023.

E. Yilmaz a, H. Arslan, A. Bideci. Environmental performance analysis of insulated composite facade panels using life cycle assessment (LCA). *Construction and Building Materials*. Vol. 202. Pages 806-813. (2019). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.057>

F. Pérez-García, M.E. Parron-Rubio, J. García-Manrique, M.D. Rubio-Cintas. Study of the suitability of different types of slag and its influence on the quality of green grouts obtained by partial replacement of cement. *Materials*. Vol. 12. (2019). <https://doi.org/10.3390/ma12071166>

F.J. González Madariaga, J. Lloveras Macia. Mezclas de residuos de poliestireno expandido (EPS) conglomerados con yeso o escayola para su uso en la construcción. *Informes De La Construcción*. Vol. 60, 509. Pages 35-43. (2008). <https://doi.org/10.3989/ic.2008.v60.i509.589>

G. Mellman, U. Meinhold, M. Maultzsch. Processed concrete rubble for the reuse as aggregates. *Exploiting Wastes in Concrete*. (1999). Thomas Telford, London, 171–178.

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



H.Z. Yang, Z.C. Liu. Study on the strength of iron and steel smelting waste blast furnace slag. *Metalurgija*. Vol. 63, Issue 1, Pages 13 – 16. (2024).

International Organization for Standardization. ISO 8301:1991/Amd 1:2010. Thermal insulation. Determination of steady-state thermal resistance and related properties. Heat flow meter apparatus-Amendment

I. Santamaría-Vicario, Á. Alonso-Díez, M. Horgnies, Á. Rodríguez-Saiz. Properties of gypsum mortars dosed with LFS for use in the design of prefabricated blocks. *New Technologies in Buildings and Construction*. Vol 258. Pages 265-282. (2022). https://doi.org/10.1007/978-981-19-1894-0_15

I.M.G. Bertelsen, L.M. Ottosen. Recycling of Waste Polyethylene Fishing Nets as Fibre Reinforcement in Gypsum-based Materials. *Fibers and Polymers*. Vol. 23. Pages 164-174. (2022). <https://doi.org/10.1007/s12221-021-9760-3>

J. García-Cuadrado, I. Santamaría-Vicario, A. Rodríguez, V. Calderón, S. Gutiérrez-González. Lime-cement mortars designed with steelmaking slags as aggregates and validation study of their properties using mathematical models. *Construction and Building Materials*, Vol. 188. Pages 210-220. (2018). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.093>

J. Silva, J. de Brito, R. Veiga. Recycled Red-Clay Ceramic Construction and Demolition Waste for Mortars Production. *Materials in Civil Engineering*. Vol. 22. (2010). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2010\)22:3\(236\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2010)22:3(236))

J.M. Manso, M. Losañez, J.A. Polanco, J.J. González. Ladle furnace slag in construction. *Materials in Civil Engineering*. Vol. 17. (2005). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2005\)17:5\(513\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2005)17:5(513))

L. Rovero, S. Galassi, G. Misseri. Experimental and analytical investigation of bond behavior in glass fiber-reinforced composites based on gypsum and cement matrices. *Composites Part B: Engineering*. Vol. 194. (2020). <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108051>



L.J. Rodríguez, S. Fabbri, C.E. Orrego, M. Owsianiak. Comparative life cycle assessment of coffee jar lids made from biocomposites containing poly (lactic acid) and banana fiber. *Journal of Environmental Management*. Vol. 266. (2020). <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110493>

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

M. del Río, R. Santos, M. González, J. Santa Cruz, J. García, P. Villoria Sáez. Preliminary study of the mechanical behavior of gypsum plastering mortars with ceramic waste additions. *Materials in Civil Engineering*. Vol. 34. (2021). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0004076](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004076)

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

M. Hagiri, K. Honda. Preparation and evaluation of gypsum plaster composited with copper smelter slag. *Cleaner Engineering and Technology*. Vol. 2. (2021). 100084 <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100084>

M. Hošťálková, N. Vavřínová, V. Longauerová. Mechanical properties of the gypsum composite reinforcement with wooden fibers. *International Review of Applied Sciences and Engineering*. Vol. 10. Pages 15-21. (2019). <https://doi.org/10.1556/1848.2019.0003>

M. Vidaurre-Arbizu, S. Pérez-Bou, A. Zuazua-Ros, C. Martín-Gómez. From the leather industry to building sector: exploration of potential applications of discarded solid wastes. *Journal of Cleaner Production*. Vol. 291. (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.125960>



M.A. Pedreño-Rojas, J. Fořt b, R. Černý, P. Rubio-de-Hita. Life cycle assessment of natural and recycled gypsum production in the Spanish context. Vol. 253. (2020). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120056>

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

M.I. Romero-Gómez, R.V. Silva, I. Flores-Colen, P. Rubio-de-Hita. Mechanical performance of waste fishing net fibre-reinforced gypsum composites. *Construction and Building Materials*. Vol. 387. (2023). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131675>

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

Plastics Europe. (2021). *Plastics - the Facts 2021*. An analysis of European plastics production, demand and waste data.

Plastics Europe. (2022). *Plastics - the Facts 2022*.

P. Dalmay, A. Smith, T. Chotard, P. Sahay-Turner, V. Gloaguen, P. Krausz. Properties of cellulosic fibre reinforced plaster: influence of hemp or flax fibres on the properties of set gypsum. *Journal of Materials Science*. Vol. 45. Pages 793-803. (2010). <https://doi.org/10.1007/s10853-009-4002-x>

Q. Chen, Q. Zhang, C. Qi, A. Fourie, C. Xiao. Recycling phosphogypsum and construction demolition waste for cemented paste backfill and its environmental impact. *Cleaner Production*. Vol. 186. Pages 418-429. (2018). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.131>

Q. Wang, Y. Cui, J. Xue. Study on the improvement of the waterproof and mechanical properties of hemihydrate phosphogypsum-based foam insulation materials. *Construction*



and Building Materials. Vol. 230. (2020).
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117014>

R.M. Gonçalves, A. Martinho, J.P. Oliveira. Evaluating the potential use of recycled glass fibers for the development of gypsum-based composites. *Construction and Building Materials*. Vol. 321. (2022).
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126320>

S. Balti, A. Boudenne, L. Dammak, N. Hamdi. Mechanical and thermophysical characterization of gypsum composites reinforced by different wastes for green building applications. *Construction and Building Materials*. Vol. 372. (2023).
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130840>

S. Eve, M. Gomina, A. Gmouh, A. Samdi, R. Moussa, G. Orange. Microstructural and mechanical behaviour of polyamide fibre-reinforced plaster composites. *Journal of the European Ceramic Society*. Vol. 22. Pages 2269-2275. (2002).
[https://doi.org/10.1016/S0955-2219\(02\)00014-6](https://doi.org/10.1016/S0955-2219(02)00014-6)

S. Gismera, M.M. Alonso, M. Palacios, F. Puertas,. Rheology of alkali-activated mortars: Influence of particle size and nature of aggregates. *Minerals* Vol. 10. (2020).
<https://doi.org/10.3390/min10080726>

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

S. Gutiérrez-González, M.M. Alonso, J. Gadea, A. Rodríguez, V. Calderón. Rheological behaviour of gypsum plaster pastes with polyamide powder wastes. *Construction and Building Materials*. Vol. 38. Pages 407-412. (2013).
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.08.034>

The Conference Board. (2021). Plastic Solid Waste Management.



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

V. Corinaldesi, J. Donnini, A. Nardinocchi. Lightweight plasters containing plastic waste for sustainable and energy-efficient building. *Construction and Building Materials*. Vol. 94. Pages 337-345. (2015). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.069>

X. Wang, W. Ni, J. Li, S. Zhang, M. Hitch, Rodrigo Pascual. Carbonation of steel slag and gypsum for building materials and associated reaction mechanisms. *Cement and Concrete Research*. Vol. 125. (2019). <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105893>

Y. Chang, R.J. Ries a, Y. Wang. Life-cycle energy of residential buildings in China. *Energy Policy*. Vol. 62. Pages 656-664. (2013). <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.07.053>

Y. Lu, X. Liu, K. Lü, Y. Li, K., F. Liu, P. Liu. Properties and Fracture Surface Features of Plaster Mold Reinforced with Short Polypropylene Fibers for Investment Casting. *International Journal of Metalcasting*. Vol. 15. Pages 700–709. (2021). <https://doi.org/10.1007/s40962-020-00505-3>

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

World steel association. Fact sheet, Steel industry co-products.

World steel association. World Steel in Figures 2023.



Índice de tablas, gráficos y figuras



ÍNDICE DE TABLAS, GRÁFICOS Y FIGURAS

Índice de tablas

Tabla 5.1. Caracterización física de las escorias blancas (LFS)...	68
Tabla 5.2. Muestras de escorias analizadas por tamaños.....	72
Tabla 5.3. Valores medios del diámetro de partícula.....	72
Tabla 5.4. Caracterización química de las escorias blancas (LFS).....	73
Tabla 5.5. FRX, composición química de las escorias blancas LFS.....	74
Tabla 5.6. Caracterización del Sikamix 3300.....	76
Tabla 6.1. Dosificación de las muestras objeto del estudio.....	80
Tabla 6.2. Relación agua / conglomerante de las mezclas.....	82
Tabla 6.3. Tiempo de principio de fraguado de las mezclas.....	83
Tabla 6.4. Densidad en fresco de las mezclas.....	84
Tabla 6.5. Dosificaciones y propiedades de las placas prefabricadas de escayola.....	87
Tabla 6.6. Densidad placas de escayola prefabricadas.....	88
Tabla 6.7. Resistencia a flexión placas de escayola prefabricadas.....	89
Tabla 6.8. Absorción de agua en placas de escayola prefabricadas.....	90



Tabla 6.9. Resultados de la dureza superficial de las placas prefabricadas.....	92
Tabla 6.10. Resultados de conductividad térmica (λ) de las placas prefabricadas.....	96
Tabla 6.11. Resultados de resistencia térmica de las placas prefabricadas.....	96
Tabla 6.12. Resultados ensayo de reacción al fuego de las placas prefabricadas.....	99
Tabla 6.13. Comparativa de resultados en el ensayo de colorimetría.....	105
Tabla 7.1. Clases de reacción al fuego de los elementos constructivos.....	110
Tabla 7.2. Máxima transmitancia térmica aceptada en el CTE DB-HE para particiones interiores.....	111
Tabla 7.3. Exigencias mínimas de protección frente al ruido en elementos de separación verticales según CTE DB-HR.....	112
Tabla 7.4. Cálculo de transmitancias del sistema ensayado en el laboratorio.....	116
Tabla 7.5. Cálculo de transmitancias de sistema comercial..	117

Índice de gráficos

Gráfica 2.1. Producción y uso de escorias de acero en Europa 2008 - 2018. Fuente: EUROFER.....	19
--	----



Gráfica 5.1. Granulometría de las escorias blancas.....	68
Gráfica 5.2. Frecuencia relativa en número vs diámetro de partícula (μm).....	71
Gráfica 5.3. Frecuencia relativa en volumen vs diámetro de partícula (μm).....	71
Gráfica 6.1. Comparativa de conductividad térmica (λ).....	97
Gráfica 6.2. Evolución de las temperaturas del horno en Escayola E35 (A1) PLR.....	100
Gráfica 6.3. Evolución de las temperaturas del horno en muestra PL20S.....	100
Gráfica 6.4. Evolución de las temperaturas del horno en muestra PL40S.....	100
Gráfica 6.5. Evolución de las temperaturas del horno en muestra PL60S.....	100
Gráfica 6.6. Ensayo de colorimetría en muestra PL20S.....	102
Gráfica 6.7. Ensayo de colorimetría en muestra PL40S.....	103
Gráfica 6.8. Ensayo de colorimetría en muestra PL60S.....	104

Índice de figuras

Figura 2.1. Utilización de acero en 2022 por sector económico. Fuente: WORLDSTEEL.....	15
Figura 2.2. Utilización de acero en 2022 por sector económico. Fuente: WORLDSTEEL.....	16



Figura 4.1. Analizador elemental LECO.....	47
Figura 4.2. DRX utilizado en la caracterización.....	48
Figura 4.3. FESEM para determinar la microestructura.....	49
Figura 4.4. Termogravimetría (TGA)	50
Figura 4.5. Amasadora y mesa de sacudidas.....	52
Figura 4.6. Cono de Vicat.....	53
Figura 4.7. Dispositivo de carga.....	55
Figura 4.8. Probeta sumergida totalmente en agua.....	56
Figura 4.9. Ensayo de dureza superficial.....	57
Figura 4.10. Ensayo de no combustibilidad.....	58
Figura 4.11. Ensayo de conductividad térmica.....	59
Figura 4.12. Detalle de colorímetro empleado.....	60
Figura 5.1. Escayola utilizada en la experimentación.....	64
Figura 5.2. Aspecto inicial de las escorias blancas.....	66
Figura 5.3. Aspecto final de las escorias después de su acondicionamiento.....	67
Figura 5.4. Distribución por tamaños de las escorias blancas....	69
Figura 5.5. Imágenes SEM de las escorias blancas.....	70



Figura 6.1. Resistencia al impacto en placas de escayola prefabricadas. PL20s.....	91
Figura 6.2. Resistencia al impacto en placas de escayola prefabricadas. PL40s.....	91
Figura 6.3. Resistencia al impacto en placas de escayola prefabricadas. PL60s.....	92
Figura 6.4. Imágenes de la microscopía confocal de la muestra PL40S.....	94
Figura 6.5. Ensayo de conductividad térmica.....	95
Figura 7.1. Esquema de tabique sencillo.....	113
Figura 7.2. Esquema de tabique múltiple.....	113
Figura 7.3. Esquema de tabique doble.....	114
Figura 7.4. Esquema de trasdosado directo.....	114
Figura 7.5. Esquema de trasdosado autoportante.....	115
Figura 7.6. Estructura base sobre soporte de madera.....	118
Figura 7.7. Colocación placa prefabricada PL20S.....	119
Figura 7.8. Rotura placa prefabricada PL40S.....	120
Figura 7.9. Colocación placa prefabricada PL60S.....	121
Figura 7.10. Colocación placa prefabricada PL40S.....	122
Figura 7.11. Rotura placa prefabricada PL60S.....	123



Figura 7.12. Rotura placa prefabricada PL60S.....124

Figura 7.13. Colocación placa prefabricada exterior PL60S....125