



**UNIVERSIDAD DE BURGOS**  
**ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR**

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

TESIS DOCTORAL

---

**PREFABRICADOS ECOLÓGICOS DE MORTERO DE YESO  
DISEÑADOS CON ESCORIAS DE ACERÍA**

---

Burgos, febrero de 2021

*Autor:*

**Álvaro Alonso Díez**

*Directores:*

**Dra. Verónica Calderón Carpintero**

**Dr. Ángel Rodríguez Sáiz**





**Dña. Verónica Calderón Carpintero**, Profesora Catedrática y **D. Ángel Rodríguez Saiz**, Profesor Titular, ambos 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 “**PREFABRICADOS ECOLÓGICOS DE MORTERO DE YESO DISEÑADOS CON ESCORIAS DE ACERÍA**” 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 el Graduado en Arquitectura Técnica D. **Álvaro Alonso Díez** y autorizan su presentación para que sea calificada como TESIS DOCTORAL.

Burgos, 26 de febrero de 2021

Fdo.: Dra. Verónica Calderón Carpintero

Fdo.: D. Ángel Rodríguez Sáiz



Gracias a todas las personas que me han apoyado durante estos años, en especial a Irene y a mis padres Merche y Pablo, porque sin ellos no hubiera sido posible.



## ***Agradecimientos***

---

Después de varios años de ensayos en el laboratorio, tablas, análisis, preguntas, conversaciones, correos, horas de ordenador... compaginadas todas ellas con la vida laboral, tengo el privilegio de escribir estas palabras de agradecimiento a todas aquellas personas que me han ayudado a desarrollar esta Tesis Doctoral.

Tengo que comenzar expresando mi más sincero agradecimiento por su esfuerzo y dedicación a mis directores de Tesis la Dra. Verónica Calderón Carpintero y al Dr. Ángel Rodríguez Saiz. Recuerdo la primera conversación con Verónica, en la que no dudo en animarme y guiarme desde el primer momento en esta faceta investigadora, al igual que Ángel, que al instante de comentárselo ya me estaba dando ideas y consejos.

Gracias a los dos por estar siempre pendientes de mí, por vuestra ayuda y ánimos en todo momento, sin importar la situación y sobre todo por contagiarme la ilusión por la investigación y acompañarme durante todo el camino que sin vosotros no hubiera podido recorrer.

A mis compañeros del Laboratorio de Materiales de Construcción por sus recomendaciones a la hora de realizar los ensayos y en especial a Lourdes Alameda Cuenca Romero, que gracias a ella pudimos realizar un análisis completo con todos los datos necesarios.

Por último, quiero agradecer a las empresas que ha contribuido en el desarrollo de este estudio suministrando las materias primas.

GRACIAS A TODOS



## **Resumen**

---

Las industrias siderúrgica y metalúrgica generan grandes cantidades de residuos en forma de escorias de diversa naturaleza procedentes de la fabricación del acero. Aunque se reaprovechan principalmente en la obtención de cemento y como relleno en la estabilización de suelos, aún hay grandes cantidades que acaban depositados en vertedero, con el consiguiente deterioro medioambiental.

Esta Tesis Doctoral estudia la valorización de escorias para la fabricación de productos en base yeso en masa o como prefabricados, planteando nuevas formas de producción con estos residuos como materia prima.

Se lleva a cabo un estudio comparativo de las propiedades que presentan los yesos con cargas minerales procedentes de los residuos generados en la fabricación del acero, en concreto la escoria negra de Horno Eléctrico de Arco EAF generada en la Metalurgia Primaria, y la escoria blanca de Horno Cuchara LF de los procesos de afino, en comparación con las de los yesos tradicionales. Con el objetivo de mejorar de las propiedades de los productos finales, se analiza el efecto de dos aditivos, un superfluidificante para reducir la absorción de agua (SikaMix®) y una emulsión polimérica para mejorar la adherencia superficial (SikaLatex®).

La microestructura de los morteros diseñados demuestra que es viable el uso de escorias de acería como agregado mineral, en sustitución de parte del yeso. Por su naturaleza, su incorporación a las mezclas produce un incremento de la densidad, permeabilidad al vapor y porosidad. No obstante, también se produce una reducción de la adherencia o de las resistencias mecánicas, pero con registros por encima de los requerimientos mínimos establecidos en la normativa, lo que permite su uso con garantía en el diseño y fabricación de yesos de albañilería para construcción.

Una vez optimizada la fabricación de los productos en masa, se procede a su transformación en prefabricados como placas de yeso ecológicas. Las propiedades indican que, hasta un cierto porcentaje de adición, estos materiales cumplen por encima de los requisitos mínimos establecidos por la normativa de aplicación.

El coeficiente de no combustibilidad, la conductividad térmica y el comportamiento frente al fuego mejoran sustancialmente a medida que se incorporan las escorias a las mezclas, respecto del comportamiento de los yesos de referencia tradicionales. Por tanto, estos yesos reciclados

presentan una ventaja importante como productos para contribuir a la fabricación de pantallas para la protección de áreas con requisitos térmicos agresivos o en entornos industriales.

Por último, se hace un estudio económico que plantea diversas hipótesis en función de los múltiples parámetros que pueden afectar al precio final de los productos diseñados, para analizar su viabilidad comercial como material de construcción.

*Palabras clave:*

*Escorias de acería, morteros de yeso ecológicos, prefabricados, resistencias mecánicas, comportamiento térmico, reacción frente al fuego.*

## ***Abstract***

---

The steel and metallurgical industries generate large amounts of waste as different slags. Even though these slags are mainly recycled in the production of cement and as fillers in the stabilization of soils, there are still large amounts deposited in landfills, with the ensuing environmental impact.

This Doctoral Thesis studies the recovery of slag for the fabrication of products based on plaster matrix and as prefabricated, suggesting new forms of construction with this waste as raw material.

A comparative study is carried out on the properties of gypsum with mineral fillers from the waste generated in the production of steel, in particular the black slag of Electric Arc Furnace "EAF" generated in Primary Metallurgy, and white slag "LF" from refining processes, in comparison with traditional plaster. Seeking to improve the properties of the final materials, the effect of two additives is deeper analyzed, a super-fluidizer to reduce water absorption (SikaMix®), and a polymer emulsion to improve surface adhesion (SikaLatex®).

The internal microstructure of the designed mortars demonstrates the feasibility of using these two types of slag as mineral aggregates to replace part of plaster. Its incorporation into mixtures producing an increase in density, vapor permeability and porosity.

Although other properties such as adherence or mechanical resistance are also reduced, the final values are always beyond the minimum requirements established, which make them suitable for use in construction as masonry plasters. However, there is also a reduction in adhesion or mechanical resistance, but with records above the minimum requirements established in the regulations, allowing its use with warranty in the design and manufacture for use in construction as masonry plasters.

Once the mass materials have been optimized, they are transformed into prefabricated products such as ecological plasterboard. The final properties indicate that, up to a certain percentage of addition, these materials accomplished with the required standards laid down by the implementing legislation.

The thermal conductivity, the non-combustibility coefficient and the behavior against fire improves substantially with the increase of slag waste, relative to the behavior of traditional reference plasters. Consequently, these recycled plasters present an important advantage as products to contribute to the

manufacture of screens for protection of areas with aggressive thermal requirements or in industrial environments.

Finally, an economic study is made that raises various hypotheses based on the multiple parameters that can affect the final price of the products designed, to analyze their commercial viability as a construction material.

*Keywords:*

Steel slag, ecological plaster mortars, prefabricated, mechanical strength, thermal behavior, fire reaction.

## Índice

---

<b>1. INTRODUCCIÓN GENERAL .....</b>	<b>3</b>
1.1. INTRODUCCIÓN .....	3
1.2. JUSTIFICACIÓN DEL TEMA ELEGIDO.....	4
1.3. ESTRUCTURACIÓN DE LA TESIS .....	5
<b>2. ESTADO DEL ARTE.....</b>	<b>11</b>
2.1. ANTECEDENTES .....	11
2.2. VALORIZACIÓN DE LOS RESIDUOS DE ACERÍA .....	16
2.3. GENERALIDADES DEL YESO Y DE SU RECICLADO .....	18
2.3.1. Tipos de morteros de yeso .....	19
2.3.2. Morteros de yeso con residuos. ....	21
2.3.3. Morteros de yeso con residuos siderúrgicos.....	23
<b>3. OBJETIVOS.....</b>	<b>27</b>
3.1. OBJETIVOS GENERALES .....	27
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	27
<b>4. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.....</b>	<b>31</b>
4.1. INTRODUCCIÓN .....	31
4.2. PROPIEDADES MATERIAS PRIMAS.....	31
4.2.1. Análisis elemental CHNS .....	32
4.2.2. Difracción Rayos X DRX .....	32
4.2.3. Fluorescencia de Rayos X FRX .....	32
4.2.4. Microscopía electrónica de barrido SEM .....	33
4.2.5. Análisis Termogravimétrico TGA.....	33
4.2.6. Densidad real.....	33
4.2.7. Densidad aparente .....	34

4.3.	PROPIEDADES DE LAS MEZCLAS .....	34
4.3.1.	Consistencia. Método de la mesa de sacudidas.....	34
4.3.2.	Principio de fraguado. Método del cono de Vicat .....	35
4.3.3.	Densidad aparente .....	36
4.3.4.	Capacidad de retención de agua .....	36
4.3.5.	Dureza Shore C .....	36
4.3.6.	Resistencias a flexión y compresión .....	37
4.3.7.	Adherencia.....	38
4.3.8.	Permeabilidad al vapor de agua.....	39
4.3.9.	Microscopía Electrónica de Barrido SEM.....	40
4.3.10.	Análisis Termogravimétrico TGA.....	40
4.3.11.	Porosimetría de Intrusión de Mercurio MIP.....	40
4.3.12.	Conductividad térmica .....	40
<b>5.</b>	<b>CARACTERIZACIÓN DE MATERIAS PRIMAS.....</b>	<b>45</b>
5.1.	YESO .....	45
5.1.1.	Densidad real.....	46
5.1.2.	Granulometría por difracción de rayos láser .....	46
5.1.3.	Difracción de Rayos X (DRX-M).....	47
5.2.	ESCORIA BLANCA.....	48
5.2.1.	Caracterización física .....	50
5.2.2.	Caracterización química y mineralógica .....	52
5.2.3.	Microscopia Electrónica de Barrido.....	55
5.3.	ESCORIA NEGRA .....	57
5.3.1.	Caracterización física .....	58
5.3.2.	Caracterización química .....	59
5.3.3.	Microscopía electrónica de barrido .....	61
5.4.	ADITIVOS.....	62

5.4.1. SikaMix W-10.....	63
5.4.2. SikaLatex.....	63

## **6. CARACTERIZACIÓN DE MEZCLAS CON ESCORIA BLANCA... 67**

6.1. INTRODUCCIÓN .....	67
6.2. PROCEDIMIENTO OPERATIVO.....	69
6.2.1. Preparación de los materiales.....	69
6.2.2. Preparación de las muestras.....	69
6.2.3. Amasado del mortero de yeso .....	70
6.3. CARACTERIZACIÓN EN ESTADO FRESCO .....	71
6.3.1. Relación agua/conglomerante.....	71
6.3.2. Principio de fraguado.....	73
6.3.3. Densidad en fresco.....	75
6.4. CARACTERIZACIÓN EN ESTADO ENDURECIDO .....	77
6.4.1. Densidad aparente en seco, densidad real y retención de agua.....	78
6.4.2. Dureza superficial .....	82
6.4.3. Resistencias mecánicas a flexión y compresión.....	84
6.4.4. Adherencia.....	88
6.4.5. Permeabilidad al vapor de agua y estructura de poros ...	90
6.4.6. Estudio microscópico.....	97
6.4.7. Termogravimetría .....	99
6.5. CONCLUSIONES .....	101

## **7. CARACTERIZACIÓN DE MEZCLAS CON ESCORIA NEGRA ... 107**

7.1. INTRODUCCIÓN .....	107
7.2. PROCEDIMIENTO OPERATIVO.....	109
7.2.1. Preparación de los materiales.....	109
7.2.2. Preparación de las muestras.....	110

7.2.3.	Amasado del mortero de yeso .....	111
7.3.	CARACTERIZACIÓN EN ESTADO FRESCO .....	112
7.3.1.	Consistencia y relación agua/conglomerante .....	112
7.3.2.	Principio de fraguado.....	114
7.3.3.	Densidad en fresco.....	116
7.4.	CARACTERIZACIÓN EN ESTADO ENDURECIDO .....	117
7.4.1.	Densidad aparente en seco y retención de agua .....	118
7.4.2.	Dureza superficial .....	122
7.4.3.	Resistencia mecánicas a flexión y compresión.....	123
7.4.4.	Adherencia.....	127
7.4.5.	Permeabilidad al vapor de agua.....	129
7.5.	CONCLUSIONES .....	132

## **8. FABRICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE PLACAS DE YESO CON ESCORIA BLANCA .....**

8.1.	INTRODUCCIÓN .....	137
8.2.	CARACTERIZACIÓN.....	138
8.3.	PROCESO EXPERIMENTAL .....	141
8.3.1.	Densidad.....	141
8.3.2.	Absorción de agua.....	142
8.3.3.	Resistencia a flexión.....	142
8.3.4.	Resistencia al impacto.....	142
8.3.5.	Dureza Shore C .....	143
8.3.6.	Microscópico Electrónico de Barrido .....	143
8.3.7.	Termogravimetría .....	143
8.3.8.	Comportamiento térmico .....	143
8.3.9.	Calor bruto de combustión. Valor calorífico .....	146
8.3.10.	Ensayos de no combustibilidad .....	146
8.4.	RESULTADOS PROCESO EXPERIMENTAL .....	148

8.5. COMPORTAMIENTO FRENTE AL FUEGO .....	152
8.6. ENSAYO DE NO COMBUSTIBILIDAD .....	155
8.7. CONCLUSIONES .....	160
<b>9. ESTUDIO ECONÓMICO .....</b>	<b>165</b>
9.1. VALORACIÓN CUANTITATIVA .....	166
9.1.1. Coste de transformación .....	167
9.1.2. Coste de las materias primas.....	168
9.1.3. Coste del transporte .....	169
9.1.4. Coste total.....	171
9.2. VALORACIÓN CUALITATIVA .....	176
9.3. CONCLUSIONES .....	177
<b>10. CONCLUSIONES FINALES .....</b>	<b>181</b>
10.1. MEZCLAS CON ESCORIAS .....	181
10.2. PLACAS DE YESO CON ESCORIA BLANCA.....	183
10.3. ESTUDIO ECONÓMICO .....	184
<b>11. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>189</b>
<b>ANEXO I: BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>193</b>
<b>ANEXO II: ÍNDICE DE TABLAS, FIGURAS Y GRÁFICOS .....</b>	<b>205</b>
<b>ANEXO III: PRODUCCIÓN CIENTÍFICA .....</b>	<b>217</b>





# **CAPÍTULO I**

## **Introducción general**



# 1. INTRODUCCIÓN GENERAL

## 1.1. INTRODUCCIÓN

El término *construcción sostenible* comprende, además de los edificios propiamente dichos, el entorno y la manera de integrarlos para formar las ciudades. El desarrollo urbano sostenible (urbanismo sostenible) tiene el objetivo de crear un entorno urbano respetuoso con el medio ambiente, y proporcionar recursos urbanísticos suficientes, no sólo en cuanto a las formas y la eficiencia energética y del agua, sino también para su funcionalidad, como un lugar que sea mejor para vivir.

La experiencia ha demostrado que no resulta fácil cambiar los métodos de construcción de los edificios y de gestionar su funcionamiento. Para ello, es necesario un cambio de mentalidad y romper con la rutina y los hábitos adquiridos durante muchos años que no han tenido en cuenta el papel finito de los recursos naturales, especialmente de los materiales de construcción que se llegan a necesitar.

Esto significa inevitablemente un cambio en la mentalidad de la industria, unida a las políticas económicas del sector, con la finalidad de priorizar el reciclaje, la reutilización y recuperación de materiales, frente a la tendencia tradicional de la extracción de materias primas de origen natural.

La situación actual de utilización de los recursos naturales y del medio ambiente supone comprometer la disponibilidad de dichos recursos para las generaciones futuras.

El transporte, los materiales destinados a la edificación y el consumo de energía necesario para el funcionamiento posterior de dichos edificios, continúan siendo una causa directa de contaminación. Especialmente, el coste ecológico se centra en la extracción de materiales provenientes de recursos naturales, en la necesidad de grandes cantidades de energía para fabricar los productos de construcción finales (cementos, aceros, yesos...), y el depósito en vertedero de productos de desecho, con el consiguiente impacto ambiental.

Esta Tesis Doctoral se basa en la aplicación de los principios y criterios de la sostenibilidad ambiental por una doble vía: por un lado, en relación con la conservación de los recursos naturales, reduciendo la necesidad de yeso en

materiales de construcción y, por otro parte, maximizando el reaprovechamiento de residuos de escorias de acería.

Las escorias de acería son materiales de origen industrial procedentes de la fabricación de acero mediante diferentes tecnologías, que se forman durante el proceso de fusión, afino o elaboración del acero, y que se separan fácilmente del proceso de fabricación gracias a su poco peso específico en relación con el del acero.

## **1.2. JUSTIFICACIÓN DEL TEMA ELEGIDO**

Muchas de las políticas de gestión orientadas al desarrollo sostenible se han introducido en el marco del Plan Horizonte 2020, con el compromiso de implantar cambios específicos, incluida la reutilización y el reciclado de residuos en grandes cantidades. Esta apuesta se traduce en datos económicos reales y favorables relacionados con el espacio y ahorros en las fases de eliminación de desechos, la menor demanda de recursos naturales y la disponibilidad de tecnologías y formación cualificada que puedan abordar con garantía los desafíos ambientales.

Dentro de los materiales de construcción, el yeso, junto con el cemento, es uno de los más utilizados en la construcción, dado que es abundante, fácilmente disponible y tiene un bajo coste de producción. Asimismo, España es el país de Europa con mayor producción y exportación de yesos, y el segundo a nivel mundial después de Estados Unidos, además de ser tradicionalmente uno de los principales países consumidores para su uso en construcción.

Añadido a esto, las ventajas de aprovechar residuos provenientes de la industria del acero (escorias), disponibles en grandes cantidades en las industrias del sector, son claras: la necesidad de recursos naturales disminuye, con lo que la huella ecológica también se reduce. Económicamente hablando, el coste de la gestión de residuos que se trasladan a vertedero desaparece, y el consumo de materias primas también.

Existen amplios antecedentes en la bibliografía en la aplicación de materiales de este tipo en matrices de morteros de cemento en masa o prefabricados, incluso el empleo de escorias de acería para activación alcalina de cementos, pero prácticamente no existen referencias al empleo de estos residuos en matrices de yeso para su fabricación en masa o en forma de

prefabricados. Ese es, por tanto, el objetivo de estudio de esta Tesis Doctoral.

### **1.3. ESTRUCTURACIÓN DE LA TESIS**

La Tesis Doctoral se encuentra estructurada en una serie de capítulos, en los cuales se describe toda la información, resultados y análisis referentes a nuestro estudio durante el proceso de investigación. Dicho documento está conformado por diez capítulos desarrollados en sus respectivos subcapítulos más dos anexos, siendo estos los que se describen a continuación:

#### **Capítulo I: introducción general.**

En este primer capítulo se realiza una introducción inicial de tema objeto de este estudio, el cual justifica nuestra investigación. Se describe el problema existente que justifica este estudio, así como los rozamientos para desarrollar este tema. También se presenta la estructura de la Tesis.

#### **Capítulo II: Estado del arte.**

En este apartado se realiza un análisis histórico de los yesos de albañilería y de las escorias siderúrgicas, describiendo su generación en los procesos de fabricación del acero, así como sus principales características y disposición. También se describen las investigaciones previas relativas al empleo de escorias en distintos sectores.

Siguiendo la línea de investigación de esta Tesis, se realiza una reseña histórica de los morteros de albañilería, analizando el concepto de mortero y los requisitos que deben tener las materias primas que lo forman.

Ya que uno de los elementos analizados en este documento son las placas de yeso, se realiza un análisis sobre este tipo de materiales de construcción prefabricados y sus campos de utilización.

#### **Capítulo III: Objetivos.**

Se establecen los objetivos generales a los que esta Tesis da respuesta y a los que a través de las investigaciones y estudios se quieren conseguir.

#### **Capítulo IV: Procedimiento experimental.**

En este capítulo se van a describir los ensayos marcados en la normativa que se han realizado, ya sean físicos o químicos, y de los resultados

obtenidos para conocer la estructura interna de las materias primas empleadas, las mezclas y las placas, así como su composición química.

#### **Capítulo V: Caracterización de materias primas.**

En este quinto capítulo se llevará a cabo la descripción y estudio de las características físicas, químicas y mineralógicas de cada una de las materias primas empleados en los estudios realizados.

#### **Capítulo VI: Caracterización de mezclas con escoria blanca.**

En este apartado se estudia y describe el estado previo a la realización de la mezcla entre el yeso y el residuo para, a continuación, llevar a cabo los estudios completos de las mezclas de yeso con escoria blanca de Horno Cuchara LF generada en los procesos de afino en la fabricación del acero, de acuerdo con los objetivos marcados. Los análisis de las mezclas se realizan tanto en estado fresco como en estado endurecido, y a continuación se describen las conclusiones obtenidas.

#### **Capítulo VII: Caracterización de mezclas con escoria negra.**

En este séptimo capítulo se estudia y describe el estado previo a la realización de la mezcla entre el yeso y el residuo. Posteriormente, se realiza un estudio completo de las mezclas de yeso con escoria negra de Horno Eléctrico de Arco EAF generada en la Metalurgia Primara, que se ajustan a los objetivos marcados. Los análisis de las mezclas se realizan tanto en estado fresco como en estado endurecido, describiendo a continuación las conclusiones obtenidas.

#### **Capítulo VIII: Fabricación y caracterización de placas de yeso con escoria blanca.**

Una vez realizada la caracterización de las mezclas, se realiza el proceso de fabricación para obtener placas yeso a partir de la mezcla con residuos, para a continuación llevar a cabo los estudios completos de las placas de yeso con escoria blanca que se ajustan a los objetivos marcados. Por último, se describen las conclusiones obtenidas en los resultados.

#### **Capítulo IX: Estudio económico**

Una vez finalizado el proceso experimental, se realiza un estudio económico de los productos obtenidos, tanto de las mezclas con escoria blanca LF como con escoria negra EAF, teniendo en cuenta las distancias a los centros de

producción de las escorias y analizando si estos son competitivos en comparación con los productos tradicionales. Por último, se describen las conclusiones obtenidas en los resultados.

#### **Capítulo X: Conclusiones finales.**

Por último, se realiza una recopilación de las conclusiones obtenidas en cada capítulo y se realiza un análisis final de los datos obtenidos en este estudio.

#### **Capítulo XI: Futuras líneas de investigación.**

Finalmente, se proponen ciertas líneas de investigación para una futura continuación de los estudios relacionados con este tema que no han podido abordarse en esta Tesis Doctoral o que pueden tener análisis más específicos en ciertos apartados.

#### **Anexo I. Bibliografía.**

Se recopilan todas las referencias bibliográficas que se han utilizado a lo largo de esta tesis y se agrupan en un listado ordenado alfabéticamente, indicando los autores mencionados.

#### **Anexo II. Índices de tablas, figuras y gráficos.**

Se recopilan todas las tablas, figuras y gráficos que aparecen reflejadas en cada capítulo a lo largo de esta tesis y se agrupan según el tipo.

#### **Anexo III. Producción científica.**

Se recopila toda la producción científica relacionada y llevada a cabo durante el proceso de elaboración de esta Tesis Doctoral.



# **CAPÍTULO II**

## **Estado del arte**

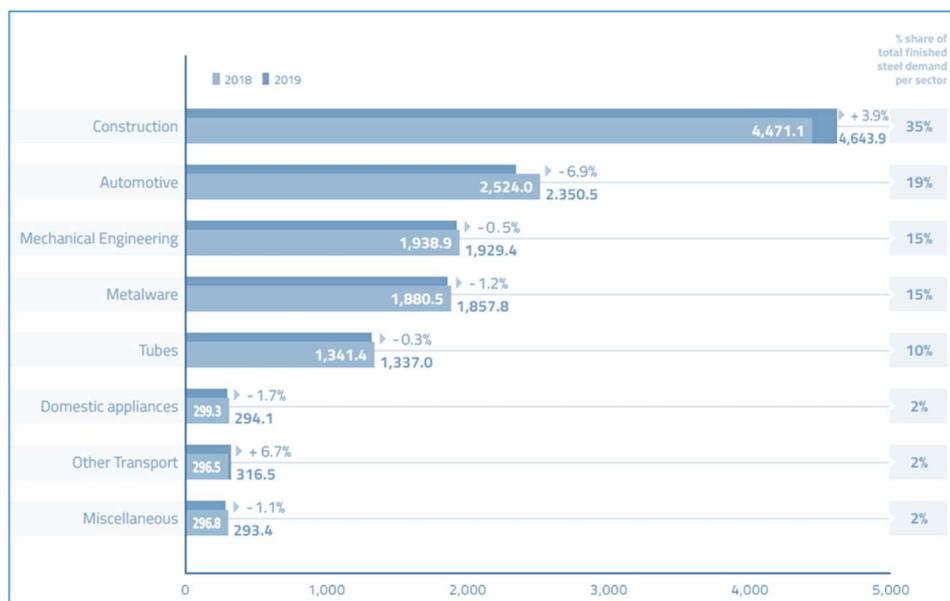




## 2. ESTADO DEL ARTE

### 2.1. ANTECEDENTES

A pesar de la incertidumbre de las referencias y estimaciones disponibles, la industria mundial del acero y sus derivados experimenta un incremento de los índices de producción cada año. La Asociación Europea del Acero (EUROFER) fundada en 1976, con sede en Bruselas, que representa a todos los productores de acero de la Unión Europea con Suiza y Turquía como miembros asociados, estima que se fabrican en Europa unos 160 millones de toneladas de acero al año, con más de 500 plantas de producción repartidas en 22 países de la UE. En el mundo, y según *European Steel in Figures 2020*, esa cifra alcanza los 1870 millones de toneladas.<sup>1</sup>



**Figura 2.1. Consumos del sector del acero por actividad económica, en millones de toneladas. Fuente: EUROFER.**

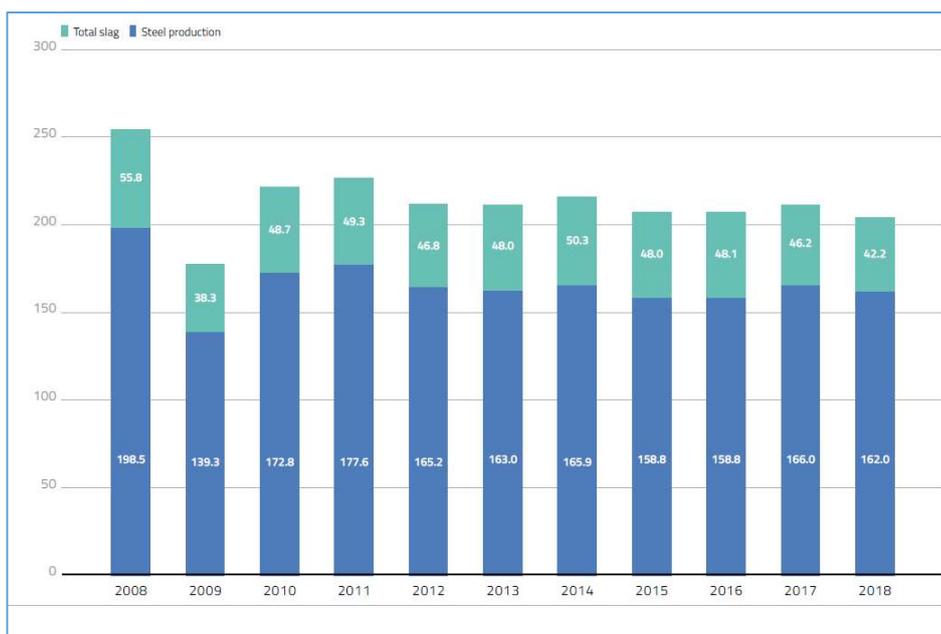
El acero es una aleación de hierro y carbono que contiene menos del 2% de carbono y 1% de manganeso, así como pequeñas cantidades de silicio, fósforo, azufre y oxígeno. El acero es uno de los materiales de ingeniería y construcción más importantes y versátiles con miles de referencias y tipos

<sup>1</sup> European Steel in Figures 2020. Handbook, The European Steel Association (EUROFER).

desarrollados por la industria. Cabe destacar la gran cantidad de acero destinado a la obtención de productos para la construcción.

Si bien el acero es 100% reciclable y, por tanto, su gestión integral puede enmarcarse en el contexto de la economía circular, no ocurre lo mismo con las escorias que se generan como material de desecho durante el proceso de fabricación de acero.

Se puede entender la dimensión y generación de este tipo de residuos analizando la información que proporcionan las empresas del sector. En 2019, de 162 millones de toneladas de acero fabricado, la industria siderúrgica generó unos 422 millones de toneladas de escoria, definida como producto obtenido del enfriamiento y solidificación del material que sobrenada y flota sobre los caldos líquidos de las aleaciones férreas, en cualquier estado intermedio o final de la fabricación.

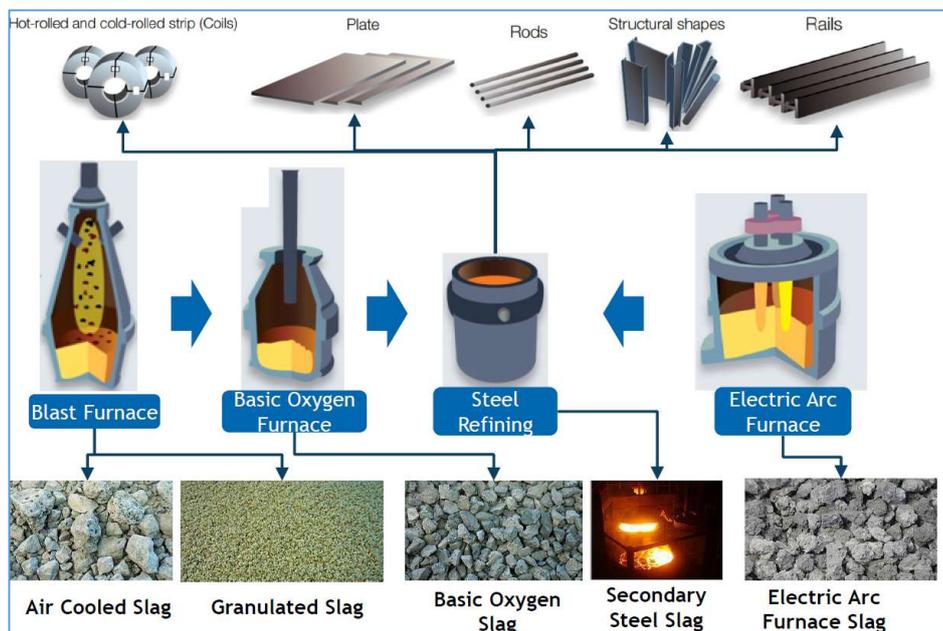


**Figura 2.2.. Producción de acero y de escoria en los 10 últimos años en Europa, en millones de toneladas. Fuente: EUROFER.**

Afortunadamente, cada vez más plantas siderúrgicas han adoptado tecnologías innovadoras de reciclaje de residuos, con el objetivo final de valorizar el 100% de estas escorias. Es evidente que la escoria de acero debe cumplir con las especificaciones y requerimientos adecuados, antes de ser utilizada para uso concreto.

Se pueden agrupar varios grandes grupos de escorias, en función del proceso de obtención de los diferentes tipos de hierros y aceros:

- Escoria de Horno Alto BF.
- Escoria de Convertidor de Oxígeno BOF o escorias de acería LD.
- Escoria de Horno Eléctrico de Arco EAF.
- Escoria de Horno de Cuchara LF.
- Escoria de Convertidor AOD, VOD.
- Escoria de Cubilote.



**Figura 2.3. Esquema de producción de acero y de escoria.**

En esta Tesis Doctoral tiene como objetivo valorizar la escoria negra de Horno Eléctrico de Arco (EAF) generada en la fase de producción conocida como Metalurgia Primaria, y la Escoria Blanca de Horno de Cuchara (LF), subproducto obtenido en los procesos de afino de la Metalurgia Secundaria. El Capítulo V se dedica al análisis y caracterización de estos residuos, valorizados como materia prima en las investigaciones desarrolladas en esta Tesis Doctoral.

En un esfuerzo por reducir la dependencia de las materias primas y reaprovechar los residuos generados en procesos industriales, se trabaja en

numerosas acciones de concienciación, de reutilización y reciclaje en los programas europeos, nacionales y regionales, que tienen como objetivo el desarrollo de nuevas técnicas para el reciclado de residuos. Los residuos valorizados como materia prima pueden ser utilizados para la fabricación de otros materiales, con el fin de cerrar los ciclos de producción hacia un continuo reaprovechamiento.

Por otra parte, la industria del acero es consciente de su propia responsabilidad. El sector emplea a 330.000 personas directamente como mano de obra altamente cualificada, y hasta 2,27 millones de puestos de trabajo indirectos, con un valor de 70 mil millones de euros en valor añadido bruto para la economía de la UE cada año.<sup>2</sup>

Igualmente, el Sector de la Construcción desempeña un papel importante en la economía. Genera casi el 10% del PIB y proporciona 20 millones de empleos en Europa, principalmente en micro y pequeñas empresas. Asimismo, los materiales empleados en edificación y obra civil representan el 42% de nuestro consumo final de energía, aproximadamente el 35% de nuestras emisiones de gases de efecto invernadero y más del 50% de todos los materiales extraídos.

Como Grupo de Investigación, hemos ido desarrollando tecnologías para reciclar residuos derivados del acero durante más de una década, avanzando especialmente en la aplicación final de materiales en base yeso. Pero el problema del reciclaje se ha vuelto más urgente en los últimos tiempos. Las razones para esto incluyen el cierre de vertederos, el aumento de las tarifas de eliminación de desechos y las regulaciones gubernamentales que establecen cupos para este tipo de productos.

Actualmente, no existen experiencias suficientemente amplias sobre el uso de materiales obtenidos en base yeso mediante el uso de estos residuos industriales valorizados, ni tampoco sobre su comportamiento real en situación de prestación en unidades constructivas de edificios.

Las dudas sobre su potencial contribución al confort y habitabilidad de los edificios, su capacidad para atenuar o absorber el ruido ambiental, su contribución al ahorro energético o con una función de apantallamiento frente al fuego, son interrogantes que abren paso a nuevas acciones investigadoras muy prometedoras.

---

<sup>2</sup> J.Geiseler. Use of steelworks slag in Europe. Waste Management, (1996), 16, 59-63.

Partiendo de esta premisa, el objetivo global de la Tesis Doctoral que se propone se concreta en la utilización de los residuos generados en la industria del acero “*valorizados como materia prima con valor añadido*” para su incorporación a la Industria del Prefabricado del Sector de la Construcción, menos tecnificada y consumidora de una ingente cantidad de recursos naturales (áridos, yeso, energía, agua...) y con una gran cantidad de emisiones de CO<sub>2</sub>.

La dilatada experiencia previa del Grupo de Investigación de Ingeniería de Edificación permite afirmar que el uso de estos materiales puede reducir la cantidad de yeso utilizado hasta un 75%, reemplazándolo con escorias de acería negras EAF o blancas LF. El porcentaje de reemplazo depende de las características del producto final requerido en cada caso, pero siempre con propiedades finales en estado endurecido suficientes para poder aplicar estos productos conforme a la legislación aplicable.<sup>3</sup> La ventaja del empleo de escorias de Horno de Cuchara LF y de Horno Eléctrico de Arco EAF que, por su composición y características son potencialmente mucho más resistentes al fuego, puede ser útil para controlar dicho comportamiento y, al mismo tiempo, también la durabilidad.<sup>4</sup>

Con esta investigación se quiere desarrollar una metodología de trabajo que permita reaprovechar un residuo industrial abundante, de gran impacto en el medio ambiente y con un potencial de reutilización, valorizándolo como materia prima en un campo científico multidisciplinar, con el objetivo final de aportar soluciones de innovación sostenible para los morteros de yeso utilizados en construcción.<sup>5</sup>

---

<sup>3</sup> 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*, (2018), 188, 210-220.

<sup>4</sup> 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*, (2015), 66, 199-205.

<sup>5</sup> O. Najm, H. El-Hassan, A. El-Dieb. Ladle slag characteristics and use in mortar and concrete: A comprehensive review. *Journal of Cleaner Production*, (2021), 288, 125584.

## 2.2. VALORIZACIÓN DE LOS RESIDUOS DE ACERÍA

La valorización de escorias incluye todo procedimiento aplicado, bien por el productor de la escoria bien por un tercero, que permita el aprovechamiento de los recursos contenidos en estos residuos y específicamente la obtención, a partir de las mismas, de materiales inorgánicos sustitutivos de los áridos naturales, y todo ello sin poner en peligro la salud humana y sin utilizar procedimientos ni métodos que puedan causar perjuicios al medio ambiente.

La recuperación de los áridos siderúrgicos, puede llevarse a cabo a través de distintas aplicaciones y métodos:

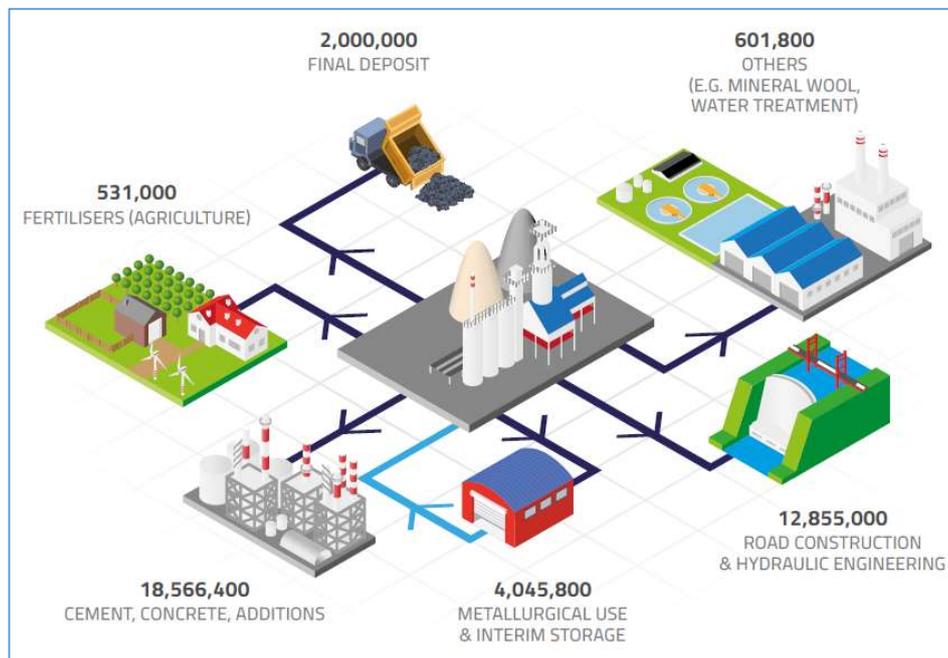
- **Aplicaciones ligadas:** uso de los materiales granulares mezclados con cualquier tipo de conglomerante, que confiere cohesión al conjunto encapsulando los áridos dentro de una matriz inorgánica, donde su exposición al medio y la liberación de componentes se consideran nulas o despreciables.
- **Aplicaciones no ligadas** (o aplicación granular): uso de materiales granulares compactados en capas para la ejecución de diversas unidades de obra civil, sin que se adicione conglomerante alguno.
- **Aplicaciones drenantes:** uso cuya función es la de captar y evacuar las aguas recogidas.

De hecho, y aunque las investigaciones dirigidas al reaprovechamiento de estos subproductos se han llevado a cabo especialmente en la última década, es en estos últimos años cuando comienzan a aprobarse normativas jurídicas aplicables, asociadas a las actividades de valorización de escorias.

Estos áridos siderúrgicos, siempre con las condiciones de uso establecidas previamente, pueden destinarse, entre otros usos, a:

- Hormigón estructural: como prefabricado, cajones de hormigón o para diques portuarios.
- Hormigón no estructural: de limpieza o de relleno.
- Hormigón para carreteras: pavimentos de hormigón en capa inferior de pavimentos bicapa o vibrado.
- Material tratado con cemento: grava cemento (escoria cemento).
- Mezclas bituminosas en caliente o en frío: hormigón bituminoso, capas bituminosas para capa de rodadura, mezclas drenantes y mezclas discontinuas.
- Tratamientos superficiales con gravilla.

- Fabricación de cemento.
- Material de relleno localizado en suelos, en trasdós, en talud de terraplenes, en zanjas o cubrición de tuberías.
- Apantallamientos sónicos para estructuras viarias.
- Zahorras artificiales.
- Bases/sub bases de vías peatonales, ciclistas y pistas deportivas.
- Como fertilizante en suelos agrícolas.



**Figura 2.4. Rutas de valorización de escorias.**

El desarrollo tecnológico actual, y los resultados positivos obtenidos en los procesos de evaluación de riesgos medioambientales en el marco de las operaciones de valorización de escorias, han acreditado la bondad de la utilización de áridos siderúrgicos en el Sector de la Construcción y en el de la fabricación de cemento, reduciendo así los impactos ambientales derivados de la extracción y procesado de materias primas a las que sustituyen, y de su posterior eliminación mediante depósito en vertedero.<sup>6</sup>

<sup>6</sup> I. Lancellotti, F. Piccolo, K. Traven, M. Češnovar, V. Ducman, C. Leonelli. Alkali activation of metallurgical slags: Reactivity, chemical behavior, and environmental assessment. *Materials*, (2021), 14, 639.

Sin embargo, no hay prácticamente experiencias que conduzcan al estudio en profundidad del comportamiento de este tipo de residuos en materiales en base yeso, objetivo de estudio en esta Tesis Doctoral.

Si ambas industrias, con un peso importante en nuestras sociedades, llegarán a un entendimiento de investigación y desarrollo, podrían emplear estos residuos como materias primas en aplicaciones novedosas y aún en fase experimental, resolviendo números problemas generados por el ser humano, como es el agotamiento de los recursos naturales y la contaminación.

### **2.3. GENERALIDADES DEL YESO Y DE SU RECICLADO**

El yeso, como mineral, se denomina piedra de yeso o aljez y es una roca sedimentaria de precipitación química formada por evaporación de las sales disueltas en lagos salados o en agua de mar, que precipitan formando parte de las evaporitas, constituidas por cloruros y sulfatos de calcio, magnesio y potasio, muy abundantes en la naturaleza.

Este mineral está constituido principalmente por sulfato cálcico dihidratado o dihidrato:  $(\text{CaSO}_4 (\text{H}_2\text{O})_2)$  y puede ir acompañado de sulfato cálcico anhidro en cantidades mucho menores ( $\text{CaSO}_4$ ). Se encuentra en la naturaleza en diferentes estados de cristalización: selenita o espejuelo (en monocristales hexagonales), punta de flecha (en maclas), alabastro (en formaciones policristalinas), yeso sedoso (de aspecto fibroso) y otras con más impurezas, como el berrugón (monocristales transparentes con formaciones masivas).

Al someter al aljez a un proceso térmico, se obtiene el yeso como producto industrial, denominado comúnmente yeso de construcción, constituido principalmente por sulfato de calcio semihidratado:  $(\text{CaSO}_4 (\text{H}_2\text{O})_{1/2})$ .

El conglomerante yeso es, por tanto, un conglomerante aéreo cuyo mineral esencial es el sulfato cálcico hemihidratado, que fragua y endurece por hidratación al recuperar el agua que perdió en la cocción por efecto del calor, volviendo a recuperar su estado inicial dihidratado.

Las propiedades físicas más relevantes de los yesos son la porosidad, la permeabilidad, la adherencia, el buen comportamiento térmico y acústico y la reacción frente al fuego. La propiedad mecánica a flexotracción en yesos es la más relevante, ya que, aunque también se determina la resistencia a compresión, los yesos no se emplean como elementos estructurales.

El yeso y la escayola, elementos muy empleados para el revestimiento de paredes, construcción de falsos techos, molduras, muebles o tabiques en forma de placas laminadas, pueden reciclarse con mucha facilidad. Los fabricantes de productos de yeso suelen reciclar los materiales sobrantes en los almacene de materiales o los elementos defectuosos no empleados en obra, especialmente si se corresponden con productos de sus marcas comerciales, reconocidos por el código de barras para su identificación. En el resto de casos, la gran mayoría, este residuo acaba en vertederos de residuos no peligrosos.<sup>7</sup>

Dada su naturaleza química, se trata de un producto que no es inerte, ya que al disolverse produce sulfatos solubles en niveles elevados. Además, reacciona disolviéndose en el agua, por lo que puede contaminar las aguas superficiales o subterráneas, por lo que debe ser tratado en vertederos específicos.

Asimismo, al disolverse, los restos de yeso que entran en las plantas de reciclaje pueden contaminar los áridos reciclados obtenidos de la valorización de residuos de la construcción y demolición, y generar huecos en la capa de firme y un exceso de finos compuestos por sulfatos.

Ahora bien, el yeso y sus derivados, además de poseer un coste de gestión muy elevado (para eliminación, no reciclaje), contaminan el residuo al que van asociados (habitualmente ladrillos, mortero y hormigón), al ser muy difícil (inviabile habitualmente) su separación, incluso de forma previa a la demolición o reforma. Únicamente se pueden separar de forma adecuada cuando son placas de yeso y techos de escayola, y es la razón principal de la obtención de este tipo de prefabricados en esta Tesis Doctoral.

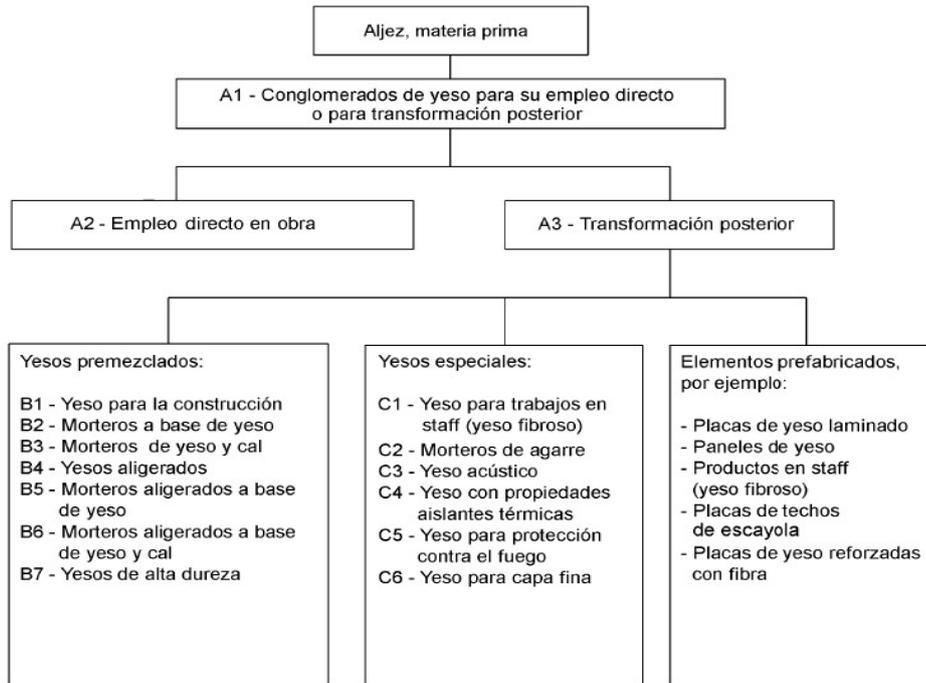
### **2.3.1. Tipos de morteros de yeso**

En la actualidad, los yesos de construcción y los conglomerados a base de yeso para la construcción se clasifican, designan e identifican acorde a lo especificado en la norma UNE EN 13279-1: 2009. *Yesos de construcción y*

---

<sup>7</sup> H. Begliardo, M. Sánchez, C. Panigatti, S. Garrappa. Reuse of recovered construction gypsum plaster: a study based on aptitude requirements of argentine and Chilean standards. *Revista de la Construcción*, (2013), 12, 3.

*conglomerantes a base de yeso para la construcción. Definiciones y especificaciones.*



**Figura 2.5. Esquema clasificación yesos de construcción.**

Por definición, un mortero de yeso es un yeso para la construcción con un contenido inferior al 50% en sulfato cálcico como componente activo principal, y un contenido en cal (hidróxido cálcico) menor del 5%. Puede llevar añadidos áridos y aditivos. Es decir, un mortero de yeso introduce agregados en la matriz inicial de yeso, que son productos naturales, sintéticos o reciclados que se emplean en construcción, en forma de áridos o de cargas minerales.

Como términos y definiciones más relevantes, relativos a la clasificación de los yesos comerciales, se pueden referir las siguientes:

- **Conglomerantes a base de yeso (A):** son conglomerantes a base de yeso que incluyen todos los tipos de yeso. Pueden emplearse para uso directo o para su transformación (productos en polvo, secos), para empleo directo en obra o solo para transformación (generalmente prefabricados de yesos).

- **Yesos para la construcción (premezclados, B1 a B7):** son conglomerantes a base de yeso que incluyen todos los tipos de yeso empleados en construcción, morteros de yeso y morteros de yeso y cal. Son los llamados “*Yesos para la construcción*”. Los yesos para aplicaciones especiales con características mejoradas, no están incluidos en este grupo.
- **Yesos especiales (C1 a C6):** son conglomerantes a base de yeso que tienen alguna característica mejorada y que se emplean para aplicaciones especiales y concretas.
- **Otros productos secos en polvo:** son productos a base de yeso que se suministran para trabajos específicos distintos a los del revestimiento o agarre (No están contemplados por las Normas UNE).

### 2.3.2. Morteros de yeso con residuos.

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

Entrando en detalle en los productos más novedosos y prometedores, se puede indicar la obtención por carga-presión de derivados de yeso (comercial y reciclado) con residuos de cerámica roja y porcelana<sup>8</sup>. Se obtienen ladrillos en masa sólida con un 50% de yeso, 50% de desechos en peso, y una proporción muy pequeña de agua. Los materiales se moldean por presión de carga uniaxial obteniendo resistencias de compresión en el rango de 12,3 y 33,9 MPa, muy superiores al mínimo exigido, debido a la baja relación del agua para su amasado y a la estructura densa que provoca el método de fabricación por presión.

---

<sup>8</sup> R.H. Geraldo, J.D. Souza, S. C. Campos, L.F.R. Fernandes, G. Camarini, G. Pressured recycled gypsum plaster and wastes: Characteristics of eco-friendly building components. *Construction and Building Materials* (2018) 191, 136-144.

Otros trabajos analizan la mezcla de dos tipos de residuos para el desarrollo de nuevos revoques de yeso, como son los restos de yeso sin calentar de la producción industrial de placas de yeso y el policarbonato proveniente de discos compactos de desecho.<sup>9</sup> Los resultados muestran un buen comportamiento térmico y mecánico de los nuevos yesos ligeros y ecoeficientes, completamente reciclados, con un 18,8% más de resistencia a la flexión, un 26,8% de mejora en resistencia a la compresión y una conductividad térmica un 42,8% menor que la de los materiales de referencia.

Continuando con el empleo de residuos poliméricos plásticos en yeso, también hay estudios centrados en la valorización de poliestireno expandido triturado mezclado con la pasta de yeso, con buenas propiedades térmicas dada la estructura cerrada del termoplástico, que contiene aire atrapado en una proporción del 96-98% del volumen.<sup>10</sup>

En la misma línea, los residuos de caucho procedentes de neumáticos fuera de uso mejoran el comportamiento elástico de los revoques de yeso tradicionales.<sup>11</sup>

La fibra de vidrio, la resina epoxi termoendurecible y varios aditivos son los componentes principales de los residuos en polvo de placas de circuito impreso después de la separación de metales, con distintos comportamientos al añadirlos al yeso, en función del tamaño de partícula del residuo.<sup>12</sup>

Hay estudios que trabajan en la reutilización de residuos volcánicos en la producción de yesos aligerados y aislantes, empleando cenizas volcánicas recicladas en combinación con cal hidráulica natural o hidróxido de calcio

---

<sup>9</sup> M.A. Pedreño-Rojas, C. Rodríguez-Liñán, I. Flores-Colen, J. de Brito. Use of polycarbonate waste as aggregate in recycled gypsum plasters. *Materials* (2020), 13, 3042.

<sup>10</sup> F.J. González Madariaga, J.L. Macía. EPS (expanded polystyrene) recycled bends mixed with plaster or stucco, some applications in building industry. *Informes de la Construcción*. (2008), 60, 35-43.

<sup>11</sup> A. Serna, M. del Río, J.G. Palomo, M. González. Improvement of gypsum plaster strain capacity by the addition of rubber particles from recycled tires. *Construction and Building Materials*, (2012), 35, 633-641.

<sup>12</sup> L. Xu, J. Guan, J. H. Yuan, W. Gu, S. Cui, Z. Liu. Mechanical performance of gypsum plaster composite materials reinforced by non-metallic powder recycled from waste printed circuit board. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, (2017), 11, 2439-2446.

mezclado con un cemento Portland comercial, mejorando las propiedades térmicas con un agente de arrastre de aire y una resina respirable.<sup>13</sup>

Finalmente, la experiencia previa del Grupo de Investigación de Ingeniería de Edificación de la Universidad de Burgos cuenta con la incorporación exitosa de residuos de poliuretano<sup>14,15</sup> y poliamida<sup>16,17</sup> para la obtención de yesos aligerados con buenas prestaciones, que cumplen con los requerimientos normativos para su colocación en obra, así como el empleo de poliuretano para la obtención de mezclas bituminosas flexibles.<sup>18</sup>

### 2.3.3. Morteros de yeso con residuos siderúrgicos

Sin tener en cuenta los morteros de cemento, donde la información al respecto del reaprovechamiento de escorias de acería es amplia con efectos conocidos desde hace muchos años, no se han encontrado referencias donde se incorporen este tipo de residuos como áridos para la fabricación de yeso con propiedades mejoradas. No obstante, hay alguna línea donde se incluyen derivados de naturaleza similar.

Por ejemplo, en la obtención de yeso de desulfuración de gases de combustión mezclado con las cenizas volantes procedentes de las centrales

---

<sup>13</sup> L. Contrafatto, S. Gazzo, A. Purrazzo, A. Gagliano. Thermo-mechanical characterization of insulating bio-plasters containing recycled volcanic pyroclasts. *Open Civil Engineering Journal*, (2020), 14, 66-77.

<sup>14</sup> L. Alameda, V. Calderón, C. Junco, J. Gadea, S. Gutiérrez-González. Characterization of gypsum plasterboard with polyurethane foam waste reinforced with polypropylene fibers. *Materiales de Construcción*, (2016), 66. 324.

<sup>15</sup> S. Gutiérrez-González, J. Gadea, A. Rodríguez, M.T. Blanco-Varela, V. Calderón. Compatibility between gypsum and polyamide waste to produce lightweight plaster with enhanced thermal properties. *Construction Building Materials*, (2013), 34, 179–185.

<sup>16</sup> M. Horgnies, S. Gutiérrez-González, A. Rodríguez, V. Calderón. Effects of the use of polyamide powder wastes on the microstructure and macroscopic properties of masonry mortars. *Cement and Concrete Composites*, (2014), 52, 64-72.

<sup>17</sup> S. Gutiérrez-González, M. Alonso, J. Gadea, A. Rodríguez, V. Calderón, V. Rheological behaviour of gypsum plaster with polyamide powder wastes. *Construction and Building Materials*, (2013), 38, 407-412.

<sup>18</sup> M.A. Salas, H. Pérez-Acebo, V. Calderón, H. Gonzalo-Orden. Bitumen modified with recycled polyurethane foam for employment in hot mix asphalt. *Ingeniería e Investigación*, (2018), 38, 60-66.

eléctricas de carbón,<sup>19</sup> utilizándolos como componentes básicos para desarrollar materiales aglutinantes ecológicos, y con efectos positivos en la mejora de la resistencia a la compresión.

En línea con esta investigación, también se han estudiado los efectos sinérgicos con respecto a la resistencia a la compresión en sistemas de bloques de gel hidratado que contienen cenizas volantes, yeso de desulfuración de gases de combustión y escoria de acería, optimizando las materias primas con un estudio de sistema ternario, secundario y primario.<sup>20</sup>

Con el fin de revelar la propiedad autocementante de la escoria de acero, se han investigado las características de hidratación y endurecimiento del polvo de escoria de acero mezclado con yeso al 5% en peso.<sup>21</sup> Los resultados arrojan luz sobre el proceso de hidratación de la escoria-yeso, observando la formación de geles de C-S-H amorfo, etringita y una pequeña cantidad de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . La evolución de propiedades con la edad de curado revela buenas relaciones exponenciales o lineales, que permiten predecir el comportamiento de otras dosificaciones.

---

<sup>19</sup> T. Wang, K. Wu, M. Wu. Development of green binder systems based on flue gas desulfurization gypsum and fly ash incorporating slag or steel slag powders. *Construction and Building Materials*, (2020), 265, 120275.

<sup>20</sup> S. Duan, H. Liao, F. E. Cheng, H. Song, H. Yang. Investigation into the synergistic effects in hydrated gelling systems containing fly ash, desulfurization gypsum and steel slag. *Construction and Building Materials*, (2018), 187, 1113-1120.

<sup>21</sup> J. Zhao, D. Wang, P. Yan, D. Zhang, H. Wang. Self-cementitious property of steel slag powder blended with gypsum. *Construction and Building Materials*, (2016), 113, 835-842.

# **CAPÍTULO III**

## **Objetivos**





### **3. OBJETIVOS**

A continuación, se describen los objetivos planteados para esta Tesis Doctoral.

#### **3.1. OBJETIVOS GENERALES**

El principal objetivo científico del proyecto, en el contexto de aplicaciones basadas en productos en masa y en prefabricados de yeso reforzados con residuos de acería, en forma de escorias blancas LF y negras EAF provenientes los procesos de fabricación del acero, consiste en transferir tecnologías sostenibles dirigidas a reducir las emisiones de CO<sub>2</sub>, en el más amplio sentido, para apoyar el presente y el futuro de las necesidades de la sociedad. El objetivo se orienta a conseguir nuevos materiales reciclados con propiedades mejoradas para la construcción energéticamente eficiente.

#### **3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Esta Tesis Doctoral está específicamente diseñada para:

- Demostrar cuantitativamente las posibilidades de usar escorias negras de Horno Eléctrico de Arco EAF y escorias blancas de Horno Cuchara LF, respectivamente, como materia prima y material de reemplazo del yeso en grandes cantidades.
- Caracterizar química y físicamente estos residuos de acería empleados, con la intención de poder extrapolar los resultados que se obtengan a otros productos de naturaleza similar.
- Obtener yesos ecológicos en masa incorporando las escorias blancas LF y las escorias negras EAF, en mezclas de propiedades adecuadas para su utilización en obra tanto en estado fresco como en estado endurecido.
- Establecer los aditivos óptimos a emplear en los conglomerados, químicamente compatibles con el residuo incorporado, cuantificando las proporciones que mantengan o incluso mejoren las propiedades finales de las mezclas.
- Además de las propiedades de uso, tanto en estado fresco como endurecido, determinar las características de su microestructura, su

porosidad y adherencia, con la intención de correlacionarlo con las resistencias mecánicas resultantes para cada dosificación.

- Seleccionar las mejores mezclas diseñadas para la fabricación y posterior caracterización de materiales de construcción prefabricados, determinando sus propiedades finales de acuerdo con la normativa vigente para su uso en una obra real en divisiones, particiones y trasdosados interiores de los edificios.
- Establecer las propiedades mejoradas de los productos finales, especialmente el comportamiento frente al fuego y al calor, y las resistencias mecánicas finales.
- Validar económicamente las ventajas de estos productos, particularmente en el ámbito de la fabricación aditiva y del comportamiento mecánico y frente al fuego, diseñando nuevas tecnologías al aportar características de alto rendimiento con la posibilidad de su incorporación al mercado.



# **CAPÍTULO IV**

## **Procedimiento experimental**



## **4. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL**

En este apartado se detallarán los distintos equipos utilizados en la caracterización de las materias primas utilizadas, así como las técnicas instrumentales necesarias para determinar las propiedades de las mezclas y de las placas de yeso.

### **4.1. INTRODUCCIÓN**

Los ecomorteros presentan diferentes características y propiedades dependiendo del estado físico en el que se encuentren, distinguiéndose dos fases perfectamente diferenciadas en las que tanto la manipulación como la puesta en obra del material están condicionadas por ello.

La primera fase es cuando el material se encuentra en estado fresco, una vez realizada la mezcla y amasadas las materias primas. La duración de este estado varía en función de las dosificaciones empleadas y, entre otros factores, de la humedad o la temperatura.

La segunda fase se corresponde con el estado endurecido del material, una vez fraguado yeso e iniciado el proceso de endurecimiento y consolidación.

Ambos estados son dos realidades diferentes del mismo material, con propiedades y características que deben ser estudiadas y analizadas de forma diferenciada, para establecer sus condiciones de uso y aplicación. No obstante, es necesario destacar que las propiedades de los ecomorteros en estado fresco van a influir en gran medida en las características que presenta el material una vez fraguado y endurecido.

El proceso experimental de las placas de yeso con adición de escorias se desarrollará en su apartado específico, al llevarse a cabo ensayos propios para este tipo de materiales prefabricados, diferentes a los utilizados en el análisis de las mezclas de yeso con escoria blanca y negra.

### **4.2. PROPIEDADES MATERIAS PRIMAS**

En este apartado se detallan los procedimientos y tecnologías que se pueden emplear para la caracterización de las materias primas empleadas en las diferentes dosificaciones analizadas en este estudio.

#### **4.2.1. Análisis elemental CHNS**

La realización de este análisis elemental se emplea para la determinación rápida de la presencia de carbono (C), hidrógeno (H), nitrógeno (N) y azufre (S) en todo tipo de muestras orgánicas e inorgánicas, sólidas o líquidas, volátiles y no volátiles, con el objetivo de determinar el contenido de óxidos, medido en tanto por ciento respecto al peso. El equipo utilizado es un Analizador LECO CHNS-932 y VTF-900 dotado de un introductor de muestras automático con capacidad para 50 muestras. La técnica de análisis está totalmente automatizada, y se basa en la combustión de las muestras en condiciones óptimas ( $T = 950 - 1.100^{\circ}\text{C}$  en atmósfera de oxígeno puro) para convertir los elementos antes mencionados en gases simples ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  y  $\text{SO}_2$ ) para conseguir una determinación cuantitativa del contenido de C, H, N y S.

#### **4.2.2. Difracción Rayos X DRX**

Para realizar este ensayo se lleva a cabo la Difracción de Rayos X de la muestra en polvo. El equipo empleado será un Difractómetro de Rayos X marca Bruker D8 Advance (Diseño Davinci), para determinar la composición mineralógica del yeso.

#### **4.2.3. Fluorescencia de Rayos X FRX**

La Fluorescencia de Rayos X (FRX) es una técnica espectroscópica que utiliza la emisión secundaria o fluorescente de Radiación X, generada al excitar una muestra con una fuente de Radiación X. La Radiación X incidente o primaria expulsa electrones de capas inferiores del átomo. Los electrones de capas más externas ocupan los lugares vacantes, y el exceso energético resultante de esta transición se disipa en forma de fotones, Radiación X fluorescente o secundaria, con una longitud de onda característica, que depende del gradiente energético entre los orbitales electrónicos implicados, y una intensidad directamente relacionada con la concentración del elemento de muestra. La Fluorescencia de Rayos X tiene como finalidad principal el análisis químico elemental, tanto cualitativo como cuantitativo, de los elementos comprendidos entre el flúor (F) y el uranio (U), de muestras sólidas (filtros, metales, rocas, muestras en polvo, tejidos, etc.) y líquidas, porque

permite hacerlos sin preparación de la muestra. El único requisito es que ésta tenga un tamaño inferior al del porta muestras.

#### **4.2.4. Microscopía electrónica de barrido SEM**

El ensayo mediante el Microscopio Electrónico de Barrido o SEM (Scanning Electron Microscope), es un método de análisis que utiliza un haz de electrones para formar imágenes de alta resolución, siendo capaz de enfocar a la vez una gran parte de la muestra. Se emplea un Microscopio Electrónico de Barrido JEOL JSM-6460LV con sistema INCA de análisis elemental por Rayos X, que permite obtener fotografías de hasta 300.000 aumentos, pudiendo observar la estructura microscópica de los residuos y las mezclas.

#### **4.2.5. Análisis Termogravimétrico TGA**

Mediante este ensayo se mide el cambio producido en la masa de una muestra, mientras esta se va calentando a una velocidad constante. Con ello se puede determinar la temperatura de degradación de los residuos y del yeso. Para ello se utiliza un analizador TGA-DSC-DTA, modelo TA Instruments con doble brazo.

#### **4.2.6. Densidad real**

Se aplicará lo determinado en la norma UNE-EN 1936:2007<sup>22</sup> para realizar el cálculo de la densidad real de los yesos y los residuos, empleando el Método del Picnómetro. Para ello se triturará una muestra de materia prima hasta conseguir una finura de partícula capaz de traspasar un tamiz de 0,063 mm, introduciendo una muestra de 10 g de material en alcohol isopropílico en el picnómetro, procediendo posteriormente a su pesado. El picnómetro se limpiará, se llenará de nuevo con alcohol isopropílico y se volverá a pesar. De esta forma la densidad real ( $\text{Kg/m}^3$ ) se calculará determinando la relación entre la masa de la probeta seca y triturada, y el volumen de líquido desplazado por la masa, utilizando la siguiente ecuación donde  $m_e$  (g) es la masa de la probeta triturada y seca,  $m_1$  (g) es la masa del picnómetro lleno

---

<sup>22</sup> UNE-EN 1936:2007. Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la densidad real y aparente y de la porosidad abierta y total.

de alcohol isopropílico y la muestra triturada,  $m_2$  (g) es la masa del picnómetro lleno de alcohol isopropílico y  $d_{ai}$  ( $\text{kg/m}^3$ ) es la densidad del alcohol isopropílico.

$$\text{Densidad real} = \frac{m_e}{m^2 + m_e - m_1} \times d_{ai}$$

#### **4.2.7. Densidad aparente**

Para conocer la densidad aparente de un material es necesario determinar la relación peso/volumen de sus componentes. Para ello se rellenará un recipiente con un volumen conocido, pudiendo ser un vaso de precipitados tarado en 50 ml, y a continuación se pesará en la balanza, aplicando de esta manera la relación expuesta anteriormente.

### **4.3. PROPIEDADES DE LAS MEZCLAS**

En este apartado se detallan los procedimientos y tecnologías que se pueden emplear para la caracterización de las mezclas yeso-escoria analizadas en este estudio.

#### **4.3.1. Consistencia. Método de la mesa de sacudidas**

Para hallar la relación agua/conglomerante se sigue lo establecido en la norma UNE-EN 13279-2:2014<sup>23</sup> mediante el método ensayo-error. Se mezclará el yeso con el residuo en seco y se añadirá el agua, removiendo manualmente aproximadamente durante 1 minuto para, a continuación, proceder a su mezcla en la amasadora mecánica (marca PROETI) durante 1 minuto a baja velocidad, tal y como se muestra en la Figura 4.1.

---

<sup>23</sup> UNE-EN 13279-2:2014. Yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción. Parte 2: Métodos de ensayo



**Figura 4.1. Amasadora y mesa de sacudidas.**

La muestra amasada se colocará en el interior de un molde cónico en el centro de la mesa de sacudidas. Posteriormente se retirará el molde y se le aplicarán 15 golpes verticales a una velocidad de 1 rev/min, mediante la mesa de sacudidas, realizándose el ensayo hasta la formación de una galleta de un diámetro medio de  $(165\pm 5)$  mm, medido en dos direcciones perpendiculares.

#### **4.3.2. Principio de fraguado. Método del cono de Vicat**

Par conocer el tiempo de principio de fraguado de una muestra se siguen las pautas marcadas en la norma UNE-EN 13279-2:2014, relleno con la mezcla un molde cónico de caucho colocado sobre una placa de vidrio, situándose el conjunto bajo el dispositivo de Vicat marca IBERTEST, según se muestra en la Figura 4.2, que dispone de una barra guía terminada en una aguja, controlada por un mecanismo de disparo, el cual se acciona en intervalos sucesivos, hasta obtener una profundidad de penetración de  $(22\pm 2)$  mm de la aguja sobre el cono.

Se anotará el tiempo transcurrido desde el momento en que la mezcla se vierte sobre el agua para formar la pasta, hasta el momento en el que se obtiene la profundidad deseada. Es el tiempo que determina el principio de fraguado.



**Figura 4.2. Cono de Vicat.**

### **4.3.3. Densidad aparente**

La densidad aparente del material se obtiene, según la norma UNE-EN 1936:2007, a partir de una serie de probetas prismáticas de (160 x 40 x 40) mm<sup>3</sup>, determinando la relación peso/volumen de las muestras, primero en estado húmedo (al desmoldar) y a continuación en estado seco, tanto a los 7 días como a los 28 días, una vez secadas las probetas en estufa a 40±2°C.

### **4.3.4. Capacidad de retención de agua**

La capacidad de retención de agua del material se obtiene a partir de la siguiente ecuación, donde  $d_{ah}$  es la densidad aparente húmeda al desmoldar la probeta y  $d_{as}$  es la densidad aparente seca a los 7 días, una vez secada la probeta en estufa a 40±2°C.

$$Retención\ de\ agua = \frac{d_{ah} - d_{as}}{d_{as}} \times 100$$

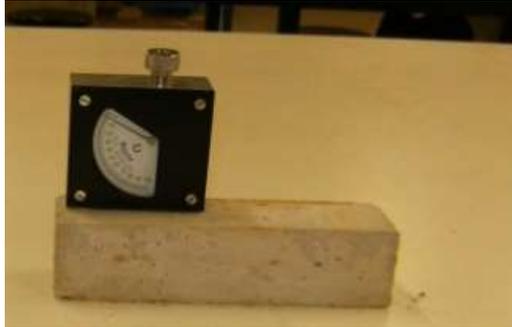
### **4.3.5. Dureza Shore C**

Mediante este ensayo y siguiendo el procedimiento establecido en la norma UNE 102042:2014<sup>24</sup>, se determinará la huella dejada por una barra que termina en una aguja, y que mediante un engranaje permite aplicar una

---

<sup>24</sup> UNE 102042:2014. Yesos y escayolas de construcción. Otros métodos de ensayo.

fuerza sobre las caras de las probetas de forma vertical, tal y como se muestra en la Figura 4.3.



**Figura 4.3. Durómetro Shore C.**

Se llevará a cabo sobre las caras longitudinales de una probeta prismática de  $(160 \times 40 \times 40) \text{ mm}^3$ , realizando la media de las medidas obtenidas. Se realizarán 5 observaciones por cada cara de la probeta, descartando los valores que se desvíen de la media. La dureza se indica en unidades Shore C, siendo esta una escala que va desde el valor 0 hasta el 100 (considerando como 0 el material más blando y el 100 el de mayor dureza).

#### **4.3.6. Resistencias a flexión y compresión**

En este ensayo se busca determinar la resistencia mecánica a flexión que presentan las muestras, determinando la carga máxima (N) necesaria para romper una probeta prismática de  $(160 \times 40 \times 40) \text{ mm}^3$  apoyada sobre rodillos, mediante la aplicación de una carga centrada a una velocidad constante de  $(20 \pm 1) \text{ N/s}$ . La resistencia a compresión se obtiene al aplicar una carga a las mitades resultantes de las probetas del ensayo anterior, sobre una sección de  $(40 \times 40) \text{ mm}^2$ , mediante la aplicación de una carga uniforme a una velocidad de  $(100 \pm 10) \text{ N/s}$ , hasta conseguir la rotura de la probeta. Ambos ensayos se muestran en la Figura 4.4.

Estos ensayos se realizarán siguiendo los pasos indicados en la norma UNE-EN 13279-2:2014, utilizando para ello un dispositivo de carga modelo SUZPECAR-Sistema de ensayos modelo MEM 101/SDC, conectado a un equipo de control digital.



*Figura 4.4. Ensayos de resistencia a flexión y compresión.*

#### **4.3.7. Adherencia**

Los parámetros referentes a la adherencia se determinarán siguiendo el procedimiento de la norma UNE-EN 13279-2:2014, aplicando la mezcla sobre un soporte seleccionado para tal fin de base cerámica. Posteriormente, se marcan fracciones circulares de material con un útil. Una vez fraguado el conglomerado, se pegan sobre los círculos discos metálicos de 50 mm de diámetro para facilitar los esfuerzos de tracción, de forma perpendicular, mediante un dispositivo mecánico. Este aparato permite aplicar una carga constante a tracción a una velocidad constante, comprendida entre 0,003 N/mm<sup>2</sup> y 0,1 N/mm<sup>2</sup> por segundo, recogiendo la lectura de la carga máxima aplicada mediante un manómetro, como se muestra en la Figura 4.5.



*Figura 4.5. Ensayos de adherencia sobre cerámico.*

#### 4.3.8. Permeabilidad al vapor de agua

Para la realización de este ensayo se sigue el procedimiento de análisis establecido en la norma UNE-EN 1015-19/A1:1999<sup>25</sup>, que permite determinar la permeabilidad al vapor de agua de las mezclas. Aunque este ensayo está orientado a los morteros para revoco y enlucido, se considera válido para medir la permeabilidad en las mezclas de yeso objeto de estudio en esta Tesis, ya que el comportamiento de este tipo de materiales puede considerarse equivalente.

Se fabricarán tres probetas cilíndricas de 16 cm de diámetro y 1,5 cm de altura, sobre un soporte de hormigón. Una vez desecadas, se disponen en la cara superior de los recipientes de ensayo, a modo de tapa, sellando el contorno con un material impermeable. Previamente una disolución saturada de nitrato de potasio ( $\text{KNO}_3$ ), dejando una cámara de aire entre la disolución y la superficie inferior de la probeta de 10 mm. Como se ha indicado, la estanqueidad entre la probeta y el molde se consigue mediante el sellado perimetral de la junta con mástico, como se muestra en la Figura 4.6.



**Figura 4.6. Ensayos de permeabilidad al vapor.**

Las probetas deben conservarse en un ambiente con una temperatura de  $20\pm 2^\circ\text{C}$  y una humedad relativa del  $50\pm 5\%$ , realizándose sucesivas pesadas de cada uno de los recipientes en intervalos de tiempo suficientes hasta conseguir una reducción del peso lineal, en un mínimo de 10 días. En estas

---

<sup>25</sup> UNE-EN 1015-19:1999. Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 19: Determinación de la permeabilidad al vapor de agua de los morteros endurecidos de revoco y enlucido.

condiciones, se considera que el sistema se encuentra estabilizado, lo que permite ir registrando de forma secuencial la pérdida de masa en función del tiempo transcurrido. A partir de estos datos se calculará la Permeanza en  $\text{Kg/m}^3 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}$ , que es el flujo de vapor de agua que atraviesa la probeta. Se obtendrá el valor de la Permeabilidad al Vapor de Agua multiplicando el valor de la Permeanza por el espesor de la probeta, obteniendo el valor final de cada serie, como el valor medio de todas ellas.

#### **4.3.9. Microscopía Electrónica de Barrido SEM**

Se realizará el mismo ensayo desarrollado en el Apartado 4.2.4, en este caso para observar la estructura microscópica de las distintas mezclas y la interfaz de la matriz yeso-escoria.

#### **4.3.10. Análisis Termogravimétrico TGA**

Se realizará el mismo ensayo desarrollado en el Apartado 4.2.5, en este caso para observar el cambio producido en la masa de las mezclas mientras esta se va calentando a velocidad constante.

#### **4.3.11. Porosimetría de Intrusión de Mercurio MIP**

Este ensayo se emplea para determinar la medida del porcentaje de tamaño y volumen de los microporos de las mezclas. Se utiliza un equipo Micrometrics Autopore IV 9500, que alcanza presiones de hasta 32.000 Psi, lo que permite determinar tamaños de los poros de hasta  $0,0067 \mu\text{m}$ . Este ensayo consiste en la introducción de mercurio a altas presiones en los poros del material.

#### **4.3.12. Conductividad térmica**

Mediante este ensayo se puede determinar la resistencia térmica que presentan las muestras a partir del método de la placa caliente guardada y el método del medidor del flujo de calor, de acuerdo con el procedimiento de

análisis establecido en la norma UNE-EN 12667:2002<sup>26</sup>, utilizando un equipo Láser Comp FOX 304 que realiza las mediciones de flujo de calor a través del material. Para ello, se fabrican probetas con forma de paralelepípedo de dimensiones de (300 x 300 x 30) mm<sup>3</sup>, todas ellas desecadas en una estufa a 40±2°C hasta alcanzar una masa constante.

---

<sup>26</sup> UNE-EN 12667:2002 Materiales de construcción. Determinación de la resistencia térmica por el método de la placa caliente guardada y el método del medidor de flujo de calor. Productos de alta y media resistencia térmica.





# **CAPÍTULO V**

**Caracterización de materias primas**



## **5. CARACTERIZACIÓN DE MATERIAS PRIMAS**

En el capítulo que desarrollamos a continuación se muestran las principales características de las distintas materias primas utilizadas en el estudio y diseño de los yesos objeto de esta Tesis Doctoral (yeso, escorias blancas LF, escorias negras EAF, agua y aditivos), con el fin de conocer sus propiedades.

Las escorias blancas LF y negras EAF utilizadas en el diseño de las mezclas proceden de subproductos originados en los procesos de fabricación del acero. En principio no han sido tratadas previamente, por lo que es necesario someterlas a procesos de estabilización química de sus componentes y a su secado y clasificación por tamaños, antes de su utilización.

Atendiendo a las propiedades iniciales de las mezclas diseñadas, en la parte final del estudio se incorporarán aditivos para mejorar propiedades como la relación yeso/agua o la trabajabilidad, obteniendo ciertas ventajas en las propiedades finales de las mezclas mejoradas.

### **5.1. YESO**

El tipo de yeso empleado es suministrado por la empresa Yesos Albi S.A. (Grupo Calcinor), procedente de canteras situadas en el término municipal de Villalómez, perteneciente a la provincia de Burgos, clasificado como B1/20/2, según la norma UNE-EN 13279-1 y designado como yeso de construcción (Figura 5.1)

Sus especificaciones exigen un contenido en conglomerante de yeso igual o superior al 50%, con un tiempo de inicio de fraguado superior a los 20 minutos, ya que se trata de un yeso de aplicación manual, con una resistencia a flexión igual o superior a 1 N/mm<sup>2</sup>, e igual o superior a 2 N/mm<sup>2</sup> en el caso de la resistencia a compresión.

Siempre se busca que los productos que intervienen en la fabricación tengan las máximas garantías de calidad, siendo este el caso del yeso utilizado, ya que dispone de marcado CE.



**Figura 5.1. Yeso B1/2/20 utilizado en la experimentación.**

Este es un tipo de yeso grueso, de fraguado lento o controlado (YG/L), con un Índice de Pureza del 87,66%, de acuerdo con la Ficha de Características del fabricante.

La caracterización física del yeso se ha llevado a cabo mediante la determinación de su densidad real y su granulometría a través del equipo de Difracción por Rayos X.

### **5.1.1. Densidad real**

En el estudio de este yeso se ha obtenido una densidad real de 2650 kg/m<sup>3</sup>, a partir del procedimiento recogido en el Capítulo de Metodología.

### **5.1.2. Granulometría por difracción de rayos láser**

La granulometría realizada por Difracción de Rayos Láser. Este procedimiento no admite tamaños de partícula superiores a 1750  $\mu\text{m}$ , por lo que se ha realizado un cribado mecánico suplementario con tamices normalizados para completar la granulometría del yeso.

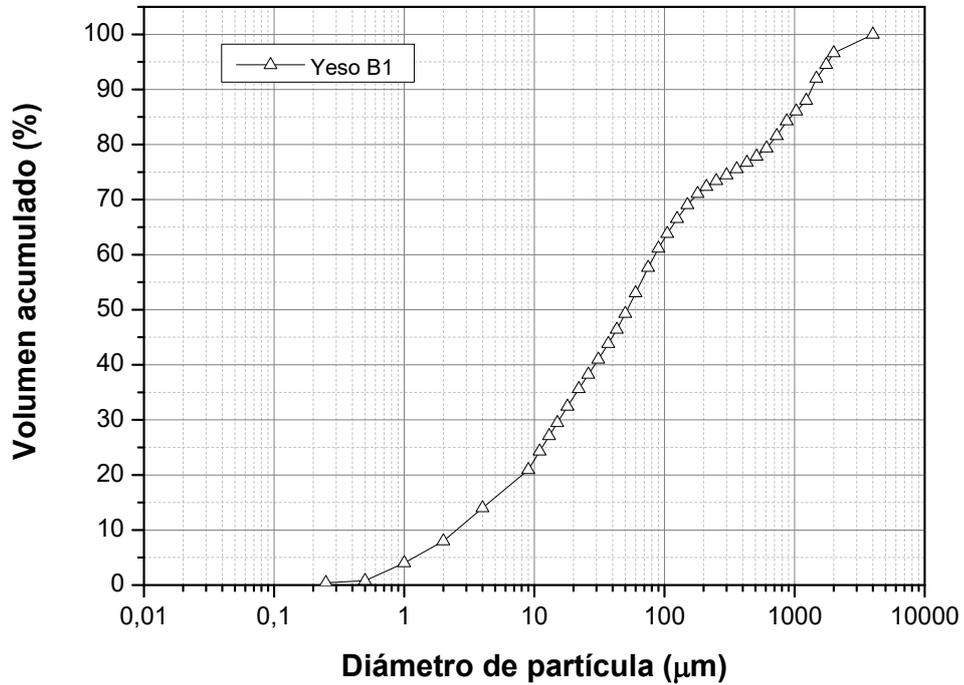


Figura 5.2. Imagen gráfica de volumen acumulado por partículas de yeso.

A partir de los resultados registrados en la Tabla 5.1 se realiza la distribución del material agrupada por tamaños:

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

Tabla 5.1. Distribución del material por volúmenes.

### 5.1.3. Difracción de Rayos X (DRX-M)

Los resultados obtenidos en el ensayo de Difracción de Rayos X muestran una composición simple y bastante pura del yeso analizado, donde el componente mayoritario es el sulfato cálcico hemihidratado, acompañado

por la anhidrita en una concentración media, siendo los demás componentes minoritarios, tal y como se muestra en la Tabla 5.2.

Componente	Fórmula	Concentración
Sulfato Cálcico Hemihidratado	$\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$	Alta
Anhidrita	$\text{CaSO}_4$	Media
Cuarzo	$\text{SiO}_2$	Baja
Dolomita	$\text{MgCa}(\text{CO}_3)_2$	Baja
Moscovita	$\text{KAl}_2\text{Si}_3\text{AlO}_{10}(\text{OH})_2$	Baja

*Tabla 5.2. Composición química del yeso determinada por difracción de rayos x.*

## 5.2. ESCORIA BLANCA

Esta Tesis Doctoral tiene como objetivo incorporar a las mezclas diseñadas escorias blancas de Horno de Cuchara (Ladle Furnace Slag LFS), como uno de los componentes esenciales. Este tipo de escoria, generadas en el proceso de afino del acero, se van depositando en zonas próximas a los centros de producción generalmente al aire libre, lo que ayuda en el proceso previo de expansión (meteorización) de estos residuos antes de ser utilizados como materia prima en la obtención de yesos para la construcción.

Las escorias blancas de Horno Cuchara LF procedentes de la Metalurgia Secundaria, presentan un aspecto pulverulento y fino. Se generan en el proceso de fabricación de acero para la elaboración de tuberías sin soldadura, laminadas en caliente y estiradas en frío, de aceros al carbono y aleados hasta un 13% en porcentaje de cromo, de la acería Tubos Reunidos Industrial S.L.U. en Amurrio, Álava. (Figura 5.3)



**Figura 5.3. Aspecto inicial de las escorias blancas.**

Las escorias blancas de Horno Cuchara LF permanecen en el laboratorio el tiempo necesario para garantizar su meteorización y total estabilización. Este tipo de escoria presenta una densidad real de  $3150 \text{ kg/m}^3$ , y se han acondicionado antes de su utilización mediante los siguientes procesos:

- Se lleva a cabo un proceso de meteorización a la intemperie, mediante un volteo para favorecer su homogenización y la estabilización de los óxidos de cal y de magnesio en hidróxidos. Con ello se evita una potencial expansión de la escoria por la presencia de óxidos de cal y de magnesio sin apagar.
- Se eliminan los terrones de cal y los restos de la colada de acero con un tamiz de 0.5mm de luz de malla. Las características organolépticas son las de un agregado de textura fina, suave al tacto y muy uniforme en su composición, presentando un color blanquecino con tonalidades grisáceas, en el que se distinguen pequeñas inclusiones metálicas.
- Utilizando un captador electromagnético se retira la mayor parte de las micropartículas de acero inferiores a la luz de malla del tamiz.

Tras este proceso de adaptación de las escorias blancas a emplear, se procede a analizar la evolución de sus características físicas y químicas.



*Figura 5.4. Aspecto final después del tratamiento de las escorias blancas.*

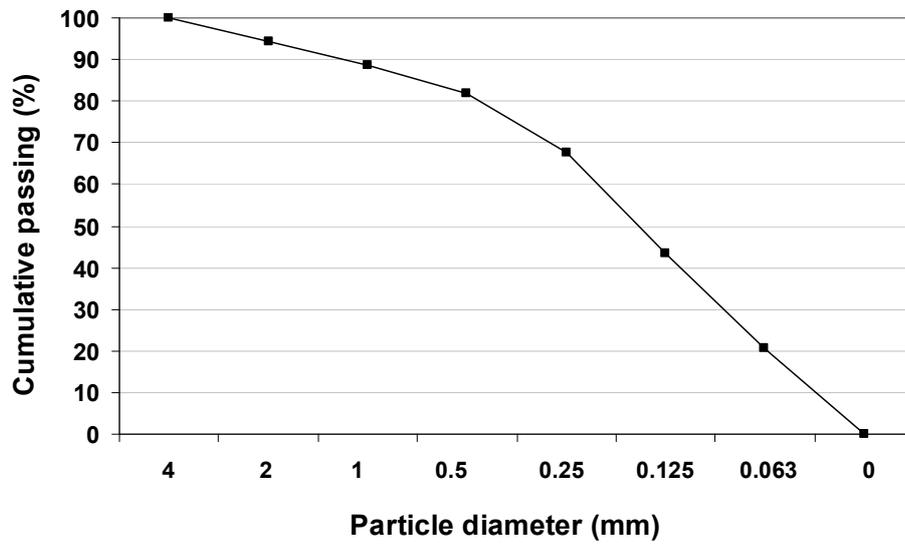
### 5.2.1. Caracterización física

Resulta fundamental conocer las características físicas iniciales de las escorias blancas. En la Tabla 5.3 se muestran los principales resultados obtenidos en la determinación de su densidad real, la densidad aparente, la humedad natural, la Superficie Específica Blaine y el Equivalente de Arena.

Propiedad	Árido siderúrgico
Densidad real partículas	2860 kg/m <sup>3</sup>
Densidad de conjunto como árido (densidad aparente)	1250 kg/m <sup>3</sup>
Humedad natural	0,35%
Superficie específica Blaine	2654-3091 cm <sup>2</sup> /g
Equivalente de arena	50%
Plasticidad	No plástico
Hinchamiento	0,04%

*Tabla 5.3. Caracterización física de las escorias blancas.*

Los resultados obtenidos en el estudio granulométrico de distribución por tamaños de la escoria blanca LF se muestran en la Figura 5.5, considerando un tamaño de partícula igual o inferior a 4 mm. Se ha procurado establecer una curva granulométrica que disponga de una cantidad proporcional y adecuada de todos los tamaños, lo que ayuda a una mejor compactación posterior de los morteros de yeso finales, lo que implica una disminución en la porosidad y, por tanto, una optimización en las resistencias mecánicas.



**Figura 5.5. Granulometría y distribución por tamaños de las escorias blancas.**

### 5.2.2. Caracterización química y mineralógica

En la Tabla 5.4 se muestra la composición química de la escoria blanca LF.

Propiedad	Árido siderúrgico
Contenido en cloruros	< 0,01%
Contenido en compuestos totales de azufre (%S)	0,86%
Contenido de sulfatos solubles en ácido (%SO <sub>3</sub> )	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.*

Para determinar más en profundidad la composición química de las escorias blancas, se realiza un Análisis de Fluorescencia de Rayos X (FRX). Los resultados se muestran en la Tabla 5.5., observando la presencia de cantidades relevantes de cromo y manganeso, siendo oportuno un análisis complementario para determinar con precisión la concentración de estos elementos.

Para ello, se completa el estudio de la caracterización química con el análisis semicuantitativo de las escorias blancas LF mediante un Microanálisis por Energía Dispersa de Rayos X.

Con este estudio, y observando los resultados recogidos en las Tablas 5.6 y 5.7, se comprueba que la escoria blanca de Horno Cuchara LF utilizada está compuesta por silicatos y aluminatos cálcicos en su mayoría, así como concentraciones destacables de óxido de cal y óxido de magnesio. También es de destacar que la concentración de componentes metálicos (níquel, zinc, cadmio, arsénico, mercurio o plomo), que pueden llegar a ser contaminantes, se encuentran en proporciones poco significativas.

<b>Composición química</b>	
<b>FeO</b>	2,21
<b>SiO<sub>2</sub></b>	17,72
<b>CaO</b>	56,75
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	6,75
<b>MgO</b>	9,56
<b>TiO<sub>2</sub></b>	0,34
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	0,07
<b>K<sub>2</sub>O</b>	0,02
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	0,04
<b>MnO</b>	0,29
<b>SO<sub>3</sub></b>	0,86
<b>Cu</b>	0,003
<b>Pb</b>	0,001
<b>Zn</b>	0,004
<b>Cr</b>	0,301
<b>Ni</b>	0,002
<b>C</b>	0,35
<b>S</b>	0,77
<b>As</b>	0,002
<b>Cd</b>	< 10 <sup>-4</sup>
<b>Hg</b>	< 10 <sup>-4</sup>

**Tabla 5.5. Composición química FRX de las escorias blancas.**

Óxidos	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Otros
Valores (%)	56	17	11	10	6

**Tabla 5.6. Composición química DRX de las escorias blancas.**

La combinación de los óxidos ácidos (SiO<sub>2</sub> y Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) y óxidos básicos (CaO y MgO), y la formación de los constituyentes de la escoria tiene lugar por fusión a alta temperatura (unos 1.600°C), y posterior enfriamiento del magma fluido de 1.400°C hasta temperatura ambiente. Estos subproductos industriales están constituidos tanto por fases vítreas como cristalinas. Las escorias con altos contenidos en material vítreo son de naturaleza más ácida. Existen diferentes procesos de granulación cuyo objetivo consiste en conseguir una escoria con una elevada proporción de fase vítrea. Una escoria granulada normal tiene un contenido en materia vítrea entre el 85-95% en peso<sup>27</sup>.

Componente	Fórmula	Concentración
Calcio-olivino	Ca <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>	Media
Trialuminato pentacálcico y Mayenita	A <sub>3</sub> C <sub>5</sub>	Trazas
Calcita	CO <sub>3</sub> Ca	Alta
Portlandita	Ca (OH) <sub>2</sub>	Alta
Periclasa	MgO	Baja

**Tabla 5.7. Composición mineralógica por DRX de las escorias blancas.**

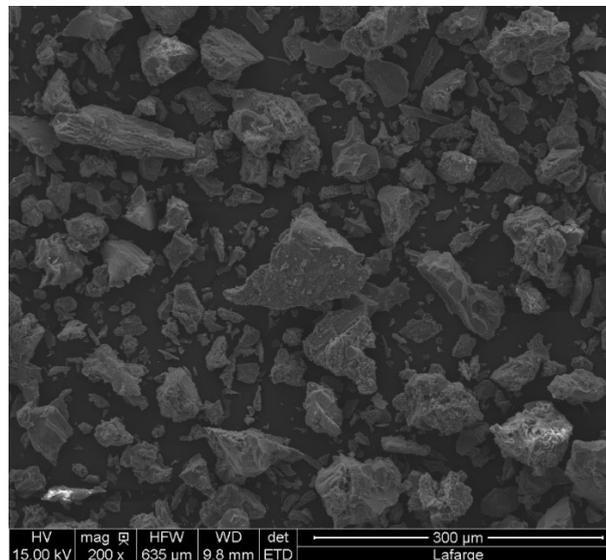
La variación en la composición química de las escorias depende del proceso siderúrgico aplicado y del tipo de acero refundido. Sin embargo, para un mismo acero, las composiciones químicas de las escorias se mantienen siempre similares, por lo que se puede considerar que este tipo de productos dispondrán de una composición mantenida en el tiempo.

<sup>27</sup> F. Puertas. Escorias de alto horno: composición y comportamiento hidráulico. Materiales de Construcción, (2012), 43, 37-48.

Las escorias granuladas tienen capacidad hidráulica latente o potencial; es decir, que finamente molidas y amasadas con agua son capaces de fraguar y endurecer.<sup>28</sup> Esta capacidad hidráulica potencial de las escorias está muy atenuada y se manifiesta con lentitud, precisando de ciertos activadores para acelerar sus reacciones de hidratación. En general, incrementos en el contenido de SiO<sub>2</sub> tiene efectos negativos en cuanto a la hidráulica, mientras que incrementos en el contenido de CaO tienen comportamientos que la favorecen.

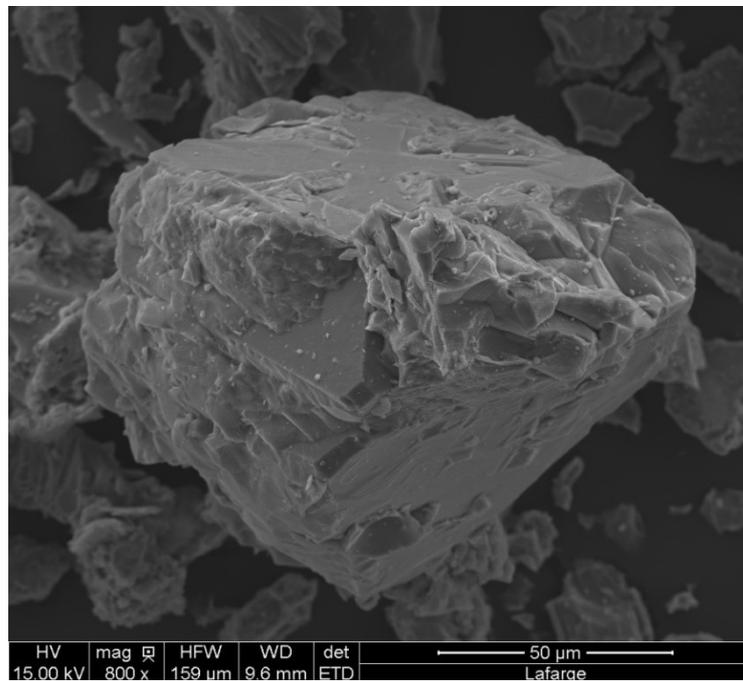
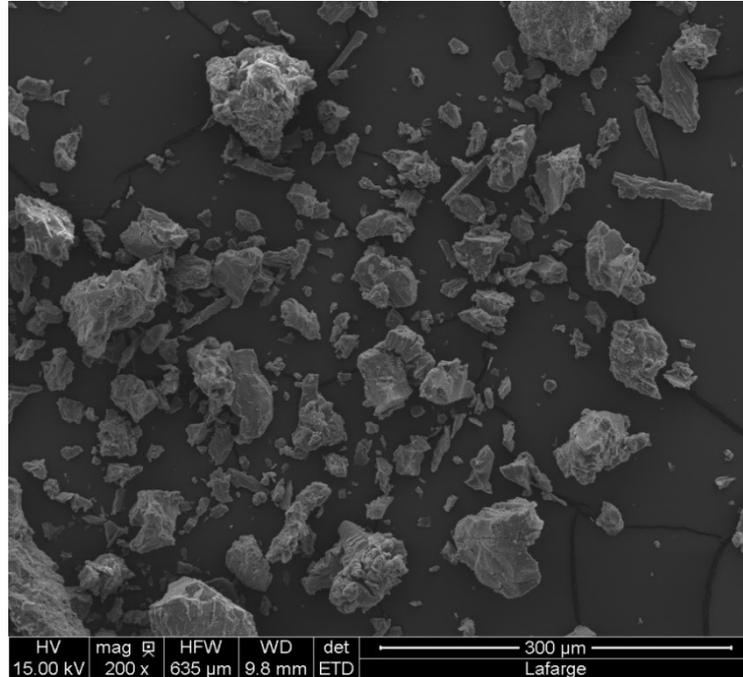
### 5.2.3. Microscopía Electrónica de Barrido

Al igual que en la composición química, se realiza un estudio para conocer la microestructura de las escorias blancas LF utilizadas en este Trabajo. Para ello, se lleva a cabo la obtención de imágenes con el Microscopio Electrónico de Barrido, a distintos aumentos, obteniéndose imágenes que dan idea de las propiedades de esta materia prima, antes de ser mezclada y embebida en productos derivados del yeso. (Figuras 5.6 y 5.7) Las muestras siguen un pretratamiento de recubrimiento con oro para que sean conductoras del chorro de electrones que facilita la captación de las imágenes finales.



**Figura 5.6. Microscopía electrónica de barrido de las escorias blancas.**

<sup>28</sup> S. Gissera, M.M. Alonso, M. Palacios, F. Puertas. Rheology of alkali-activated mortars: Influence of particle size and nature of aggregates. Minerals, (2020), 10, 1-15.



**Figura 5.7. Detalle de la granulometría y superficie de las escoriass blancas.**

### 5.3. ESCORIA NEGRA

Para completar la Tesis Doctoral y analizar el comportamiento de los residuos de acería de manera más amplia, se amplía el estudio con la incorporación de escorias negras de Horno Eléctrico de Arco EAF, de igual forma que con las escorias blancas DE Horno Cuchara LF. Este tipo de subproducto se genera en la Metalurgia Primaria, y aunque los procedimientos industriales y los reactivos utilizados en los Hornos Eléctrico de Arco son distintos a los del Horno Cuchara, por su naturaleza mantienen propiedades químicas, físicas y de composición muy similares.

La escoria negra procede de una planta de áridos reciclados del Grupo Hormigones y Morteros Agote S.L. en la localidad de Zestoa, provincia de Guipúzcoa. La empresa acopia el residuo en la acería Corrugados Azpeitia, que se encuentra ubicada en la misma zona.

Como se puede observar en la Figura 5.8, las escorias negras de Horno Eléctrico de Arco EAF utilizadas en este estudio tienen una apariencia oscura, de color negro, con ciertos componentes de restos metálicos y con un aspecto homogéneo, encontrándose estas en el mismo lugar de acopio y almacenamiento que las escorias blancas de Horno Cuchara LF analizadas en el apartado anterior e igual de estabilizadas.





*Figura 5.8. Aspecto de las escorias negras de alto horno de arco eléctrico.*

Pese a que entre sus propiedades organolépticas se encuentra su coloración negra y un aspecto pulverulento, no afecta al aspecto final de los morteros de yeso en los que se dosifica. Su tonalidad es ligeramente gris, pero cumple con los estándares admitidos al uso, sin cambios de color exagerados. Antes de su utilización directa, las escorias negras han sido sometidas a un acondicionamiento previo mediante los siguientes procesos:

- Se somete a un volteo para favorecer su homogenización y la estabilización de las mismas.
- Se retiran las partículas y restos de la colada de acero con un tamiz de 0.5 mm de luz de malla.
- Se utiliza un captador electromagnético se eliminan la mayor parte de las micropartículas de acero inferiores a la luz de malla del tamiz.
- Finalmente, se realiza un proceso de meteorización a la intemperie.

### **5.3.1. Caracterización física**

Antes de proceder a la utilización de este tipo de escorias es conveniente conocer sus características físicas iniciales. En la Tabla 5.8 se muestran los resultados obtenidos.

Propiedad	Árido siderúrgico
Densidad partículas (kg/m <sup>3</sup> )	3.645
Densidad aparente árido (kg/m <sup>3</sup> )	1.550
Absorción (%)	1,12%
Coefficiente de friabilidad (%)	8%
Desgaste de los ángeles (%)	23,87%
Índice de lajas	2,80%
Expansividad (%)	0,2%
Plasticidad	No plástico
Angulosidad partículas trituradas	100%

*Tabla 5.8. Caracterización física de las escorias negras.*

### 5.3.2. Caracterización química

La Tabla 5.9 muestra los resultados obtenidos en el estudio químico de las escorias negras de Horno Eléctrico de Arco EAF.

Propiedad	Árido siderúrgico
Terrones de arcilla (materia orgánica)	0,04%
Material retenido en tamiz 0,063 y flota en líquido de peso específico 2 g/cm <sup>3</sup>	0,01%
Contenido en compuestos totales de azufre (%S)	0,23%
Contenido de sulfatos solubles en ácido (%SO <sub>3</sub> )	0,12%
Contenido en cloruros	0,012%
Contenido de óxido de magnesio	3,2%
Desintegración por el Silicato Bicálcico	Estable
Reactividad álcali- silicato	No reactivo
Pérdida de peso máxima (5 ciclos de tratamiento MgSO <sub>4</sub> )	1,90%

*Tabla 5.9. Caracterización química de las escorias negras.*

Para conocer más en profundidad la composición química de las escorias negras de Horno Eléctrico de Arco EAF, se realiza un análisis adicional mediante Fluorescencia de Rayos X, obteniendo los datos que se muestran en la Tabla 5.10.

Con el estudio realizado y observando los datos obtenidos, se comprueba que las escorias negras de Horno Eléctrico de Arco EAF contienen una gran cantidad de oxígeno, hierro y calcio, que junto a la presencia de silicio y aluminio permite afirmar que existen cantidades variables de silicatos y aluminatos, además de los óxidos de calcio y magnesio típicos en este tipo de escorias.

Composición química	
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	24,5 %
<b>MnO</b>	4,6 %
<b>TiO<sub>2</sub></b>	0,68 %
<b>CaO</b>	26,7 %
<b>K<sub>2</sub>O</b>	0,01 %
<b>SiO<sub>2</sub></b>	20,9 %
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	12,1 %
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	0,46 %
<b>MgO</b>	3,2 %
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	0,00 %
<b>Pérdida fuego</b>	0,00 %

**Tabla 5.10. Composición química FRX de las escorias negras de alto horno.**

En la composición de las escorias negras de Horno Eléctrico de Arco EAF utilizadas en este estudio se observa una importante presencia de óxidos de hierro, con predominio sobre los silicatos. También aparecen importantes cantidades de calcio, alúmina y magnesia.

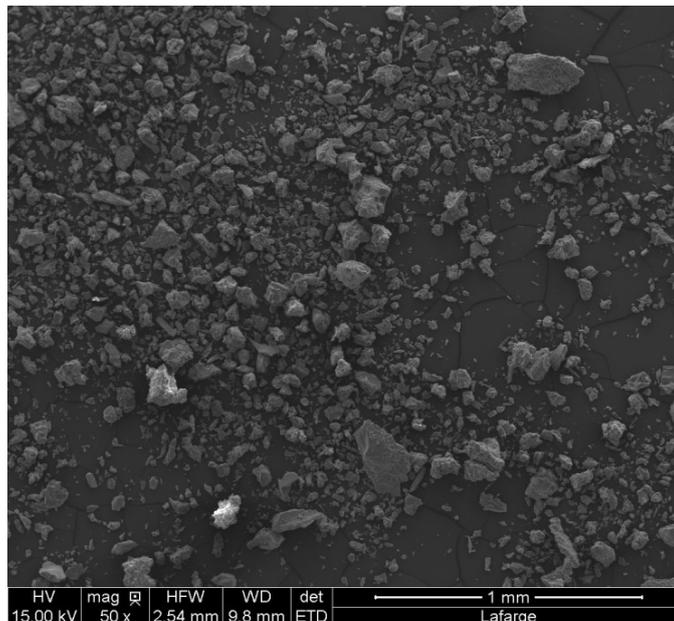
Mediante un estudio semicuantitativo de la caracterización química de las escorias negras de Horno Eléctrico de Arco EAF, utilizando la técnica del Microanálisis por Energía Dispersa de Rayos X (DRX), se completa la composición química. En la Tabla 5.11 aparecen los resultados obtenidos.

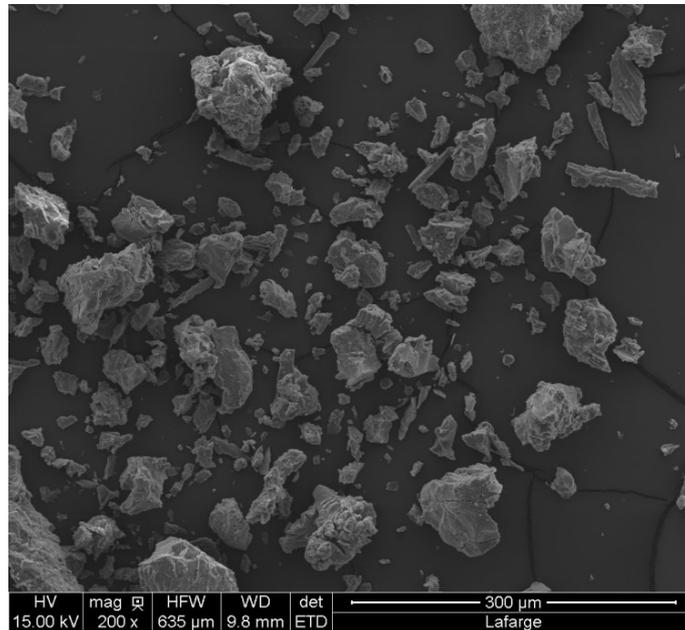
Componente	Fórmula	Concentración
Gelenita	$\text{Ca}_2\text{Al}(\text{AlSiO}_7)$	Alta
Magnetita	$\text{Fe}_3\text{O}_4$	Baja-Media
Westita	$\text{FeO}$	Baja

Tabla 5.11. Composición química FRX de las escorias negras de alto horno.

### 5.3.3. Microscopía electrónica de barrido

Analizando las imágenes del Microscopio Electrónico de Barrido desde diferentes distancias y zonas, se observa que las escorias negras de Horno Eléctrico de Arco EAF están formadas por partículas comprendidas entre 2 y 20  $\mu\text{m}$ . Estas partículas contienen agregados cristalinos discontinuos que se han formado por la hidratación de los silicatos a la intemperie, como se muestra en la Figura 5.9.





**Figura 5.9.** Detalle de la granulometría y superficie de las escorias negras.

## 5.4. ADITIVOS

Para mejorar las características y prestaciones de las mezclas de yeso con escoria, se añaden aditivos idóneos compatibles. La norma *UNE-EN 13279* “Yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción”<sup>29</sup> recoge la posibilidad de añadir aditivos a los yesos, con su definición, conformidad, marcado y limitaciones.

Los aditivos son materiales añadidos en pequeñas cantidades antes, durante o en un amasado complementario para obtener la modificación de ciertas propiedades. Los aditivos utilizados en esta investigación se muestran en la Tabla 5.12.

---

<sup>29</sup>AENOR. "UNE-EN 13279. Yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción.

Tipo de aditivo	Nombre comercial del aditivo
Emulsionante	SikaLatex
Superplastificante	SikaMix W-10

**Tabla 5.12. Aditivos empleados en el estudio.**

Estos aditivos son suministrados por la empresa Sika® en sus respectivos embalajes, etiquetados de acuerdo con la normativa de aplicación. Para su dosificación se siguen las recomendaciones establecidas por la empresa fabricante, en función de los ensayos realizados en cada caso.

#### 5.4.1. SikaMix W-10

Se trata de un aditivo basado en una composición química sulfonada de melamina y formaldehído que se emplea como superplastificante, ya que actúa reduciendo el agua de dosificación, de tal forma que mejora la plasticidad y reduce el riesgo de fisuración en el proceso de fraguado y endurecimiento.

Las características que presenta este tipo de aditivo se muestran en la Tabla 5.13.

Propiedades SikaMix W-10	
Color	Líquido blanco lechoso
Duración	1 año desde su fabricación
Densidad	1,02 kg/l

**Tabla 5.13. Características del aditivo SikaMix W-10.**

#### 5.4.2. SikaLatex

Este aditivo es una emulsión de estireno-butadieno que reduce la tensión superficial entre la escoria y el hemihidrato, de tal forma que evita las rigideces producidas por la escoria al mezclarse esta con el agua. Con ello se favorece la agregación y se mejora la adherencia sobre los soportes.

Las características que presenta este tipo de aditivo se recogen en la Tabla 5.14.

<b>Propiedades SikaLatex</b>	
<b>Color</b>	Líquido blanco lechoso
<b>Duración</b>	1 año desde su fabricación
<b>Densidad</b>	1,02 kg/l

**Tabla 5.14. Características SikaLatex.**



## **CAPÍTULO VI**

**Caracterización de mezclas con escoria  
blanca**



## **6. CARACTERIZACIÓN DE MEZCLAS CON ESCORIA BLANCA**

En este capítulo se estudian las propiedades de los morteros de yeso diseñados al añadirles diversas cantidades de escoria blanca de Horno Cuchara LF. Pese a que estos morteros presentan buenas características, se prevé que, al dosificar en las mezclas la escoria blanca, mejoren sus propiedades como la densidad, permeabilidad o porosidad, entre otras.

Por otra parte, es razonable pensar que, al sustituir parte del conglomerante yeso por la escoria blanca, pueden registrarse resultados inferiores en otras propiedades tales como la adherencia, resistencia mecánica o durabilidad.

Para obtener conclusiones reales, se deberán realizar numerosas dosificaciones y ensayos, con el objetivo de obtener una completa caracterización de estos nuevos morteros, tanto en fresco como en endurecido, de acuerdo con las especificaciones técnicas establecidas en la normativa de aplicación.

### **6.1. INTRODUCCIÓN**

Los informes sobre la industria siderúrgica mundial estiman que la producción anual de acero, a fecha de enero de 2019 está en torno a los 162 millones de toneladas de acero<sup>30</sup>, incrementándose en un 1% con respecto a este mes en años anteriores. Este aumento en la producción de acero supone a su vez un incremento progresivo cada vez mayor en la generación de residuos de escorias, estimándose estas en torno a un 15-25% de la materia prima utilizada.

El objetivo de este estudio buscar un aprovechamiento a este tipo de residuos utilizándolo como materia prima en el diseño y fabricación de nuevos morteros de yeso para construcción, con el objetivo de obtener una mejora de sus propiedades. De esta forma, a la vez que se aprovecha un residuo valorizado como materia prima, se evita su depósito en vertederos cercanos a los centros de producción, con el consiguiente impacto en el medio ambiente que esto supone.

---

<sup>30</sup> Asociación Mundial del Acero (WorldSteel in Figures 2018).

Las escorias blancas de Horno Cuchara LF, generadas en los procesos de afino de la Metalurgia Secundaria, apenas han sido utilizadas en la fabricación de conglomerantes<sup>31</sup>. No obstante, aplicando el nuevo Reglamento Europeo sobre Yesos de Construcción, donde da la posibilidad de fabricar yesos con minerales agregados que contengan cal, merece la pena considerar la posibilidad de realizar morteros de yeso con agregados de escorias blancas, marcándose estos yesos como Tipo B<sup>32</sup>.

La composición química de la escoria blanca presenta cantidades importantes de cal (hidróxido de calcio), y entre sus propiedades destacan su color blanco y aspecto pulverulento, lo que las hace idóneas para ser mezcladas con el sulfato de calcio hemihidratado y obtener así morteros de albañilería con propiedades mejoradas.

Por otra parte, también se considera la utilización de aditivos idóneos para el diseño de las mezclas, ya que de esta forma se consigue una mejora sustancial en sus propiedades físicas, manteniendo su resistencia y contribuyendo a una mejora en su uso y aplicabilidad<sup>33</sup>.

Por todo ello, este estudio se centra en el análisis de un nuevo material de construcción fabricado a partir de una mezcla de yeso y escoria blanca de Horno Cuchara LF como agregado mineral, para comprobar que sus propiedades son comparables a las de los yesos convencionales, de acuerdo con la normativa vigente. Además, teniendo en cuenta que no se conoce bibliografía de referencia sobre la producción de yesos con agregados a base de escorias, esta investigación puede considerarse un avance para obtener nuevos materiales en masa aplicables a la construcción, compuestos por elementos reciclados con propiedades y características adecuadas.

---

<sup>31</sup>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*, (2012), 34, 392-399.

<sup>32</sup>UNE-EN 13279-1:2014 Yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para construcción.

<sup>33</sup> A.J. Lewry, J. Williamson. The setting of gypsum plasters. The effect of additives and impurities. *Journal of Materials Science*, (1994), 29, 6085-6090.

## **6.2. PROCEDIMIENTO OPERATIVO**

Para iniciar el proceso experimental, previamente se seleccionan las materias primas necesarias y se diseñan las mezclas conglomeradas para moldear las probetas necesarias para los ensayos.

### **6.2.1. Preparación de los materiales**

La escoria blanca LF se clasifica por tamaños para obtener un material homogéneo, tanto en su composición como en su granulometría. Para ello, se realiza un análisis granulométrico por tamizado utilizando una serie de tamices normalizada, configurando una Línea Granulométrica continua y lo más cerrada posible, compensando los diferentes tamaños de grano la forman.

Para la preparación de las diferentes amasadas se seleccionará la fracción de material cuyo tamaño de grano sea inferior a 1.0 mm, ya que por su finura se considera óptima para fabricar las mezclas.

### **6.2.2. Preparación de las muestras**

Para la realización de este estudio se han diseñado una serie de dosificaciones, con una relación yeso/escoria determinada para cada tipo de mortero objeto de estudio. Las dosificaciones diseñadas se muestran en la Tabla 6.1.

Tal y como se indica en la norma UNE-EN 13279-2/2014<sup>34</sup>, las muestras analizadas deben contener una cantidad de entre 1,2 dm<sup>3</sup> y 1,5 dm<sup>3</sup> de yeso. Teniendo en cuenta que la densidad del agua es de 1 g/cm<sup>3</sup> y la del yeso 2,33 g/cm<sup>3</sup>, se obtiene una relación agua/yeso final en torno a 0,40. De esta forma se pueden determinar con facilidad las cantidades de partida de cada componente para la fabricación de las muestras.

---

<sup>34</sup>UNE-EN 13279-2:2014 Yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción. Parte 2: Métodos de ensayo.

<b>Dosificaciones de las muestras a estudiar</b>			
	<b>Muestra</b>	<b>Relación% Yeso/LFS</b>	<b>Aditivo%</b>
<b>Referencia</b>	P0	100/0	-
<b>Series S</b>	PS20	80/20	-
	PS40	60/40	-
	PS60	40/60	-
<b>Series S+M</b>	PS20M	80/20	SikaMix 0.8%
	PS40M	60/40	SikaMix 0.8%
	PS60M	40/60	SikaMix 0.8%
<b>Series S+L</b>	PS20L	80/20	SikaLatex 1%
	PS40L	60/40	SikaLatex 1%
	PS60L	40/60	SikaLatex 1%

**Tabla 6.1. Dosificaciones de las muestras a estudiar.**

En función de las dosificaciones diseñadas, para fabricar las muestras se procede a sustituir una parte del yeso por escoria blanca LF y se añaden los aditivos correspondientes. De acuerdo con lo establecido en la norma UNE-EN 13279-2/2014, las mezclas deben tener una consistencia plástica de con un escurrimiento de  $165 \pm 5$  mm en la mesa de sacudidas, ajustando la relación agua/mezcla para que la muestra final de cada dosificación cumpla con las especificaciones de la normativa.

### **6.2.3. Amasado del mortero de yeso**

Las mezclas de los diferentes morteros de yeso con escoria blanca diseñados se preparan en una primera fase de forma manual para conseguir un componente lo más homogéneo posible. Posteriormente, se introduce en la amasadora mecánica y se añade el agua de dosificación para conseguir una mezcla uniforme, el equipo dispone de un programa de amasado normalizado que varía la frecuencia de giro y los tiempos de rotación de la

pala, completando en su conjunto un ciclo de 90 segundos, de acuerdo con las especificaciones de la Norma UNE-EN 13279-1/2009, tal y como se muestra en la Figura 6.1.



*Figura 6.1. Amasadora mecánica programable.*

### **6.3. CARACTERIZACIÓN EN ESTADO FRESCO**

En este apartado se describen los ensayos utilizados para caracterizar y definir las dosificaciones de las mezclas yeso-residuo-aditivo, de acuerdo con la norma UNE-EN 13279-2/2014.

Todos los ensayos que se describen a continuación se realizarán en estado fresco, cuando la muestra aún no haya finalizado su proceso de fraguado.

En primer lugar, se comprobará la relación agua/yeso, punto de partida necesario para establecer las distintas cantidades de las materias primas utilizadas para la dosificación de las muestras. También se estudiará el principio de fraguado, característica fundamental para determinar los posteriores usos a los que se quiere destinar el material, así como la densidad en fresco de cada una de ellas.

#### **6.3.1. Relación agua/conglomerante**

Para determinar la relación yeso/escoria de cada mezcla se comienza el ensayo mezclando las cantidades previstas de en cada caso de ambos componentes secos, considerando esta cantidad total yeso/escoria como conglomerante a los efectos de la dosificación final. Los aditivos añadidos a

cada muestra se han mezclado de acuerdo con las prescripciones del fabricante, tomando como referencia la cantidad de conglomerante.

Posteriormente, se determina la relación agua/conglomerante de las distintas dosificaciones, que han sido divididas en series, condicionando la cantidad de agua añadida para obtener en la mesa de sacudidas un diámetro de escurrimiento de  $165 \pm 5$  mm, de acuerdo con la normativa de aplicación. De esta forma, se consiguen mezclas con una adecuada trabajabilidad en un ámbito de consistencia plástico.

En la Tabla 6.2, se muestran los resultados obtenidos en este ensayo, definiendo las relaciones agua/conglomerante que cumplen con la norma y que van utilizarse para establecer las proporciones de las series de muestras.

<b>Relación agua/conglomerante</b>				
	<b>Muestra</b>	<b>Relación% Yeso/LFS</b>	<b>Aditivo%</b>	<b>a/c</b>
<b>Referencia</b>	P0	100/0	-	<b>0,40</b>
<b>Series S</b>	PS20	80/20	-	<b>0,40</b>
	PS40	60/40	-	<b>0,39</b>
	PS60	40/60	-	<b>0,39</b>
<b>Series S+M</b>	PS20M	80/20	SikaMlx 0.8%	<b>0,35</b>
	PS40M	60/40	SikaMlx 0.8%	<b>0,35</b>
	PS60M	40/60	SikaMlx 0.8%	<b>0,35</b>
<b>Series S+L</b>	PS20L	80/20	SikaLatex 1%	<b>0,40</b>
	PS40L	60/40	SikaLatex 1%	<b>0,39</b>
	PS60L	40/60	SikaLatex 1%	<b>0,39</b>

**Tabla 6.2. Relación agua/conglomerante obtenida en la mesa de sacudidas.**

Como se muestra en la Tabla 6.2., la relación agua/conglomerante no es exactamente la misma en todas las muestras, pero los valores de cada una

de ellas garantizan que todas las series tengan una buena trabajabilidad de carácter plástico.

La relación agua/conglomerante es muy similar en todas las series, siendo su valor en torno a 0,40 para las series de referencia, S y S+L. Para la serie S+M se observa que alcanza una cantidad inferior de 0.35.

Por lo tanto, según los valores obtenidos, estos no presentan diferencias marcadas por la naturaleza o cantidad de las materias primas utilizadas en este estudio, bien sea la escoria o el aditivo, empleados en cada una de las dosificaciones, por lo que se puede reducir la cantidad de yeso empleado en favor de la adición de escorias blancas sin perjuicio en este aspecto.

Por lo que se puede observar, la inclusión del aditivo SikaLatex en las mezclas no altera la cantidad de agua necesaria para conseguir la consistencia plástica, premisa de partida en este estudio. Por el contrario, la inclusión del aditivo SikaMax sí que modifica la cantidad de agua que requiere la mezcla, reduciendo está en un 12.5% respecto a la muestra de referencia para conseguir la consistencia plástica y la hidratación adecuadas de las partículas<sup>35</sup> del ecomortero.

### **6.3.2. Principio de fraguado**

Para conocer el Tiempo de Principio de Fraguado de las mezclas se utiliza el Método del Cono de Vicat, siguiendo el procedimiento que marca la normativa de aplicación.

El denominado Principio de Fraguado es el tiempo que transcurre desde que se procede a realizar la mezcla agua/conglomerante contenida en un cono en forma de pasta, hasta que la aguja de este ensayo penetra a una profundidad de  $22 \pm 2$  mm sobre esta.

Partiendo de la muestra de referencia, se observa que todas las series analizadas en este estudio reducen el tiempo de fraguado en relación a esta, tal y como se muestra en la Tabla 6.3.

---

<sup>35</sup> B. Guan B, Q. Ye J. Zhang W. Lou Z Wu. Interaction between  $\alpha$ -calcium sulfate hemihydrate and superplasticizer from the point of adsorption characteristics, hydration and hardening process. Cement Concrete Research,(2010), 40, 253–259.

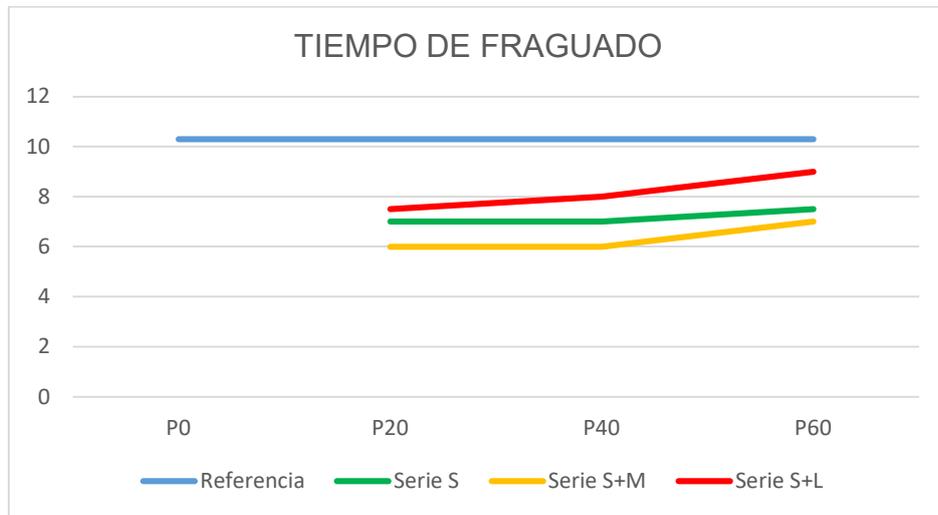
<b>Tiempo principio de fraguado</b>			
	<b>Muestra</b>	<b>Relación% Yeso/LFS</b>	<b>Tiempo de fraguado (min)</b>
<b>Referencia</b>	P0	100/0	<b>10'30"</b>
<b>Series S</b>	PS20	80/20	<b>7'00"</b>
	PS40	60/40	<b>7'00"</b>
	PS60	40/60	<b>7'50"</b>
<b>Series S+M</b>	PS20M	80/20	<b>6'00"</b>
	PS40M	60/40	<b>6'00"</b>
	PS60M	40/60	<b>7'00"</b>
<b>Series S+L</b>	PS20L	80/20	<b>7'50"</b>
	PS40L	60/40	<b>8'00"</b>
	PS60L	40/60	<b>9'00"</b>

**Tabla 6.3. Principio de fraguado de cada muestra obtenido por método cono de Vicat.**

Todos los tiempos de fraguado se reducen al añadir al yeso tanto la escoria, como los aditivos y, más concretamente, todas las series obtienen su menor tiempo de fraguado con la adición del 20% de escoria LFS en el conglomerante.

Según se aumenta la proporción de escoria, el tiempo de fraguado también se incrementa, pero siempre por debajo de los tiempos obtenidos en la muestra de referencia, fabricada con un 100% de yeso como conglomerante.

La comparativa de los resultados y evolución y tendencia de los mismos se pueden observar en la Gráfica 6.1.



**Gráfica 6.1. Comparativa tiempos de fraguado.**

Los tiempos de fraguado que se recogen en la Tabla 6.3. son menores conforme se reduce la relación yeso/escoria, ya que al añadirse menos cantidad de hemidrato, y mantenerse en mayor medida la relación agua/conglomerante, es decir, con cantidades de agua aproximadamente iguales, el yeso se disuelve de forma más rápida, al presentar concentraciones sobresaturadas por el exceso del agua de hidratación.

Al aumentarse la proporción de escoria en la mezcla se observa en todas las series que se incrementan los tiempos de fraguado, pero, en cualquier caso, de forma muy poco significativa.

Como conclusión, se puede afirmar que se produce una reducción de la trabajabilidad por la mayor rigidez del ecomortero. Una de las posibles causas que justifican este comportamiento es la reducción de la cantidad de yeso aportada al conglomerante, determinando una matriz de cohesión entre las partículas de escoria de menor tamaño. Sin embargo, esto provoca que el agua aportada a la mezcla sea absorbida en un primer momento por la escoria, ralentizando el proceso de fraguado, aunque posteriormente, con el paso de los minutos, esta cede parte del agua retenida.

### 6.3.3. Densidad en fresco

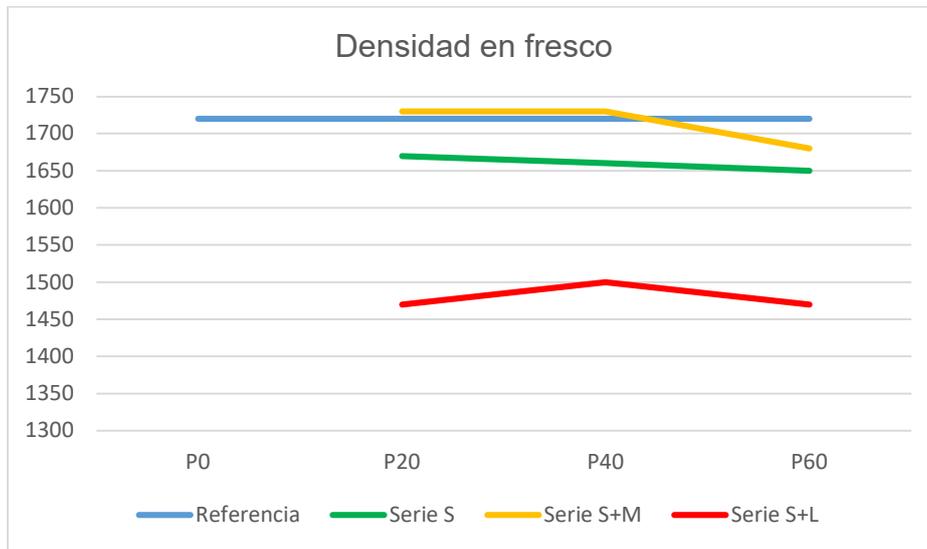
La densidad es una de las características que influyen en la trabajabilidad de nuestros ecomorteros de yeso, ya que está relacionada con las

características de los materiales utilizados, así como del aire ocluido que presenta la muestra. Para calcular la densidad aparente en estado fresco de las mezclas se utiliza la relación peso/volumen, por lo que se deben realizar dos mediciones, partiendo del Ensayo del Cono de Vicat.

Como se puede analizar y comparar en la Tabla 6.4. y en la Gráfica 6.2., la densidad en fresco de las muestras de la Serie S+M se ve reducida ligeramente con respecto al mortero de referencia P0, mientras que en la Serie S+L se produce un descenso significativo, probablemente motivado por la evaporación del agua de amasado, dando lugar a una mayor porosidad, y también por la adición de materiales con menor densidad.

<b>Densidad en fresco</b>			
	<b>Muestra</b>	<b>Relación% Yeso/LFS</b>	<b>Densidad en fresco (kg/m<sup>3</sup>)</b>
<b>Referencia</b>	P0	100/0	<b>1720</b>
<b>Series S</b>	PS20	80/20	<b>1670</b>
	PS40	60/40	<b>1660</b>
	PS60	40/60	<b>1650</b>
<b>Series S+M</b>	PS20M	80/20	<b>1730</b>
	PS40M	60/40	<b>1730</b>
	PS60M	40/60	<b>1680</b>
<b>Series S+L</b>	PS20L	80/20	<b>1470</b>
	PS40L	60/40	<b>1500</b>
	PS60L	40/60	<b>1470</b>

**Tabla 6.4. Densidad en fresco de las muestras.**



**Gráfica 6.2. Comparativa de las densidades en fresco.**

La densidad de las muestras disminuye en todos los casos con la adición de las escorias, tomando como referencia la muestra patrón P0, salvo en la Serie S+M debido a que se reduce el agua aportada para el amasado.

#### 6.4. CARACTERIZACIÓN EN ESTADO ENDURECIDO

En este apartado se realizan los ensayos con los ecomorteros fraguados y endurecidos y se analizan los resultados obtenidos, de acuerdo con las prescripciones y especificaciones técnicas establecidas en la norma UNE-EN 13279-2/2014.

Para ello se moldean probetas de forma y tamaño adecuado al ensayo realiza en cada caso, y con un número suficiente de muestras para obtener valores medios finales con muy poca dispersión.

Una vez fabricadas, las probetas deben mantenerse durante 7 días en la atmosfera del laboratorio a una temperatura de 24°C, con una humedad relativa de 50±1%, secándose a continuación hasta tener una masa constante a una temperatura de 40°C, enfriándose en desecador hasta alcanzar la temperatura ambiente del laboratorio.

### 6.4.1. Densidad aparente en seco, densidad real y retención de agua

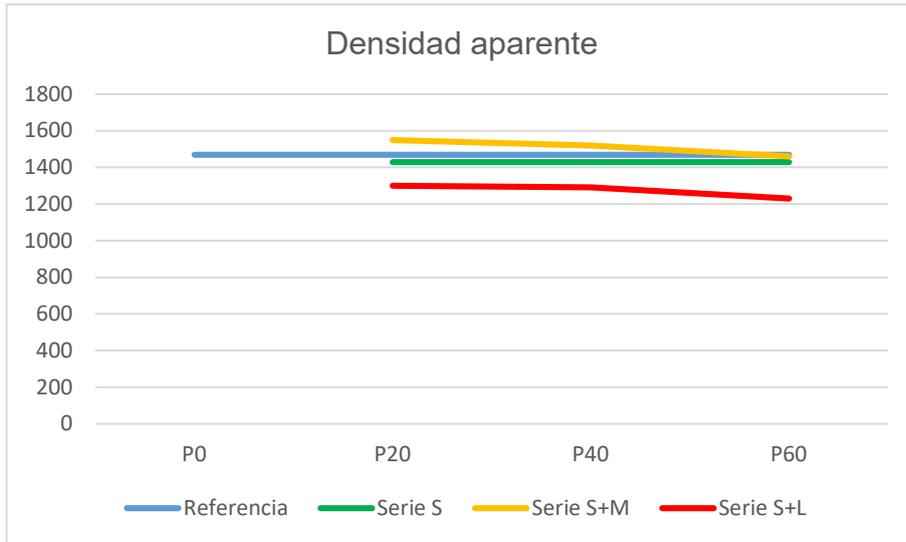
La densidad de los ecomorteros en estado endurecido va a depender en gran medida de la cantidad de agua empleada en la dosificación. El agua que no ha intervenido en el proceso de fraguado del conglomerante se evapora secuencialmente dejando una estela de poros, circunstancia que se ve favorecida por producirse un incremento de la temperatura al ser un proceso exotérmico. Para el cálculo de la densidad real no se tendrá en cuenta el volumen de poros, como se puede comprobar en la Tabla 6.5.

La densidad aparente del material se determinará a partir de una serie de probetas prismáticas de (160 x 40 x 40) mm<sup>3</sup>, hallando la relación entre el peso y el volumen de las mismas, primero en estado húmedo al desmoldar la probeta y a continuación en estado seco, tanto a 7 días como a 28 días, una vez secadas las probetas en una estufa de laboratorio a 40±2°C.

<b>Densidad aparente y densidad real</b>				
	<b>Muestra</b>	<b>Relación% Yeso/LFS</b>	<b>Densidad aparente (kg/m³)</b>	<b>Densidad real (kg/m³)</b>
<b>Referencia</b>	P0	100/0	<b>1470</b>	<b>2320</b>
<b>Series S</b>	PS20	80/20	<b>1430</b>	<b>2720</b>
	PS40	60/40	<b>1430</b>	<b>2750</b>
	PS60	40/60	<b>1430</b>	<b>2980</b>
<b>Series S+M</b>	PS20M	80/20	<b>1550</b>	<b>2720</b>
	PS40M	60/40	<b>1520</b>	<b>2740</b>
	PS60M	40/60	<b>1460</b>	<b>2850</b>
<b>Series S+L</b>	PS20L	80/20	<b>1300</b>	<b>2680</b>
	PS40L	60/40	<b>1290</b>	<b>2710</b>
	PS60L	40/60	<b>1230</b>	<b>2780</b>

**Tabla 6.5. Densidad aparente y densidad real.**

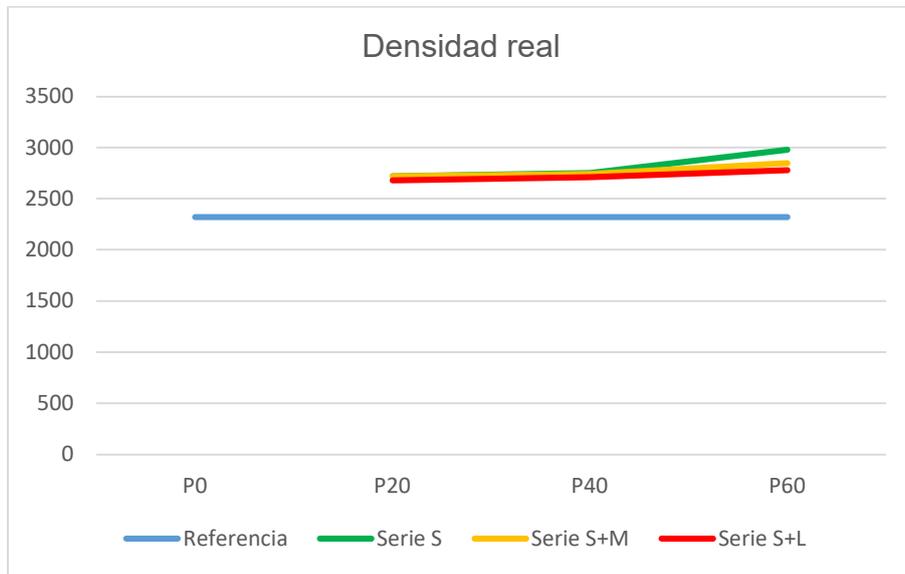
Como comprobar en la Tabla 6.5, y se observa gráficamente en las Gráficas 6.3. y 6.4., la densidad aparente disminuye en las series S y S+L según se aumenta el porcentaje de escoria en las mezclas, con respecto a la serie de referencia P0, mientras que en la serie S+M aumenta ligeramente debido a la disminución de la cantidad de agua de amasado utilizada.



**Gráfica 6.3. Comparativa de las densidades aparentes.**

La inclusión de escoria blanca LF en las mezclas de los ecomorteros infiere un incremento de la densidad real en todas las series. Como se observa en la Gráfica 6.4., este valor crece según va aumentando el porcentaje de escoria dosificado en las muestras.

Teniendo en cuenta las características de los materiales utilizados, los resultados obtenidos se estiman coherentes, ya que la escoria blanca LF tiene una densidad de real de  $3.15 \text{ g/cm}^3$ , frente a la densidad real del yeso que es de  $2.32 \text{ g/cm}^3$ .



**Gráfica 6.4. Comparativa de las densidades reales.**

Una propiedad importante en los materiales es su capacidad de retener líquidos, bien en su interior o en su superficie, depositándose en las paredes externas que delimitan el material. Este fenómeno se conoce como absorción o capacidad de retención de agua. Es importante conocer el comportamiento de los morteros para conocer su comportamiento de cara a su posible utilización en la edificación.

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

$$\frac{d_{ah} - d_{as}}{d_{as}} \times 100$$

⇒

$d_{ah}$ : Densidad aparente húmeda al desmoldear

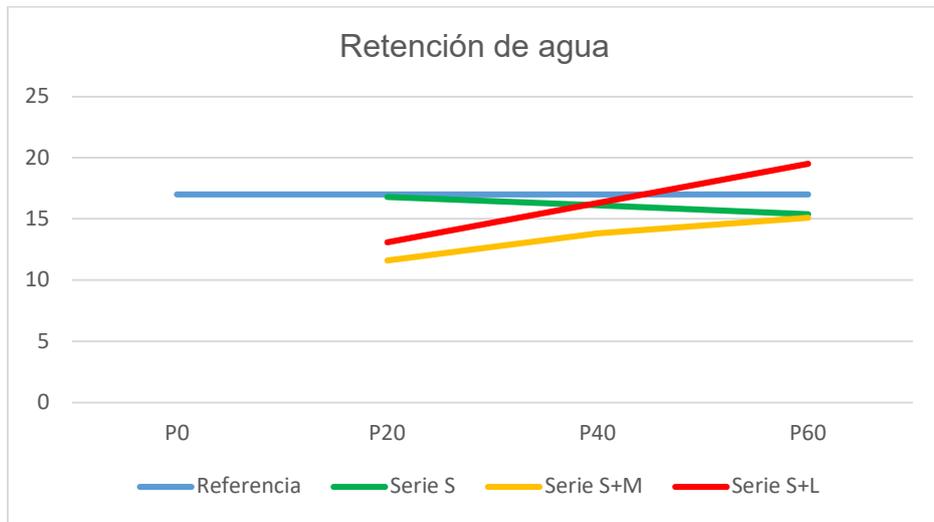
$d_{as}$ : Densidad aparente seca a 7

En la Tabla 6.6 se muestran los resultados obtenidos después de someter a los morteros al ensayo de retención de agua.

<b>Retención de agua</b>			
	<b>Muestra</b>	<b>Relación % Yeso/LFS</b>	<b>Retención de agua %</b>
<b>Referencia</b>	P0	100/0	<b>17,0</b>
<b>Series S</b>	PS20	80/20	<b>16,8</b>
	PS40	60/40	<b>16,1</b>
	PS60	40/60	<b>15,4</b>
<b>Series S+M</b>	PS20M	80/20	<b>11,6</b>
	PS40M	60/40	<b>13,8</b>
	PS60M	40/60	<b>15,1</b>
<b>Series S+L</b>	PS20L	80/20	<b>13,1</b>
	PS40L	60/40	<b>16,3</b>
	PS60L	40/60	<b>19,5</b>

**Tabla 6.6. Capacidad de retención de agua % de las muestras.**

La serie S, en la que solo se incorpora escoria blanca al conglomerante, muestra unos valores de capacidad de retención de agua que disminuyen según va creciendo el porcentaje de escoria LF añadida. Este comportamiento permite afirmar que las escoras utilizadas retienen una cantidad de agua menor que el yeso, posiblemente debido a que las partículas de estas son mayores que las del conglomerante, por lo que disponen de una superficie específica menor que requiere de menos cantidad de agua para conseguir una consistencia plástica. Este comportamiento se ve mejorado con la incorporación del aditivo fluidificante, como se puede observar en la Gráfica 6.5.



**Gráfica 6.5. Comparativa retención de agua %.**

### 6.4.2. Dureza superficial

Es necesario conocer la dureza superficial de los ecomorteros, ya que es un factor determinante para comprobar su comportamiento frente a agresiones externas de tipo mecánico que pueden condicionar su durabilidad en el tiempo.

Para determinar la dureza superficial de los morteros diseñados se realiza el ensayo utilizando un durómetro. Este dispositivo está formado por una aguja que se proyecta sobre la superficie del material accionada mediante un engranaje manual. La proyección debe ser vertical y en varias zonas de la superficie de una probeta prismática de (160 x 40 x 40) mm<sup>3</sup>, hallándose la media de las medidas obtenidas, cinco por cada cara, descartando los valores que se desvíen de la media. La dureza se indica en unidades Shore C. Se trata de una escala que va del 0 al 100, donde se considera el 0 como el material más blando y el 100 como el material con mayor dureza.

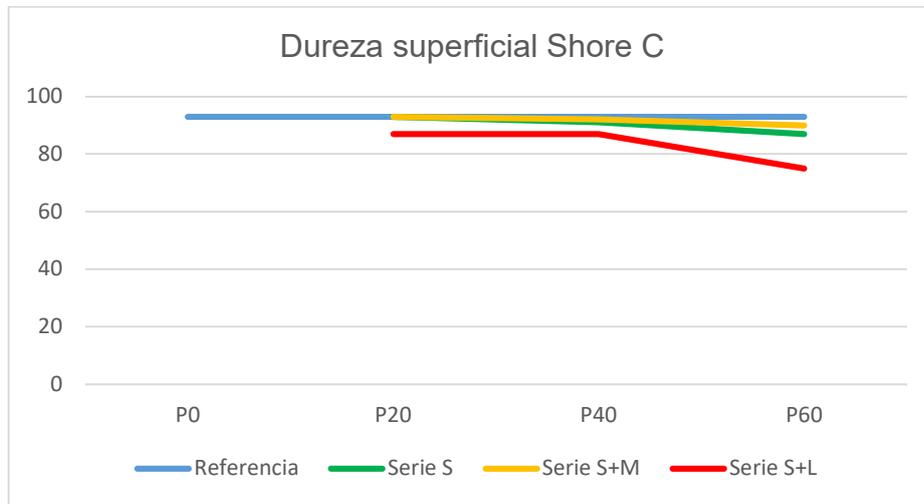
Los resultados obtenidos indican que la muestra de referencia P0 marca el valor más elevado para esta característica, estando el resto de series en torno a este valor, pero sin llegar superarlo, tal y como se muestra en la Tabla 6.7. Pese a ello, los valores obtenidos en el ensayo de Dureza Superficial Shore C muestran que todas las series analizadas muestran un buen comportamiento a esta propiedad.

<b>Dureza superficial</b>			
	<b>Muestra</b>	<b>Relación % Yeso/LFS</b>	<b>Dureza Shore C</b>
<b>Referencia</b>	P0	100/0	<b>93</b>
<b>Series S</b>	PS20	80/20	<b>93</b>
	PS40	60/40	<b>91</b>
	PS60	40/60	<b>87</b>
<b>Series S+M</b>	PS20M	80/20	<b>93</b>
	PS40M	60/40	<b>92</b>
	PS60M	40/60	<b>90</b>
<b>Series S+L</b>	PS20L	80/20	<b>87</b>
	PS40L	60/40	<b>87</b>
	PS60L	40/60	<b>75</b>

**Tabla 6.7. Dureza superficial Shore C de las muestras.**

Las Series S muestran valores muy similares a los de referencia, siempre superiores a las 85 unidades Shore C. Por el contrario, la incorporación de aditivos de carácter plastificante en la Serie S+M incrementa los resultados obtenidos ligeramente por encima de las muestras de la Serie S en las que solo se incorpora escoria, registrando valores por encima de las 90 unidades Shore C.

Sin embargo, la inclusión de aditivos de látex en la Serie S+L produce una reducción de la dureza superficial, debido a que este aditivo dota a la muestra de una mayor flexibilidad, pero siempre alcanzándose valores superiores a las 75 unidades Shore C, como muestra en la comparativa de resultados de la Gráfica 6.6.



**Gráfica 6.6. Comparativa dureza Shore C.**

### 6.4.3. Resistencias mecánicas a flexión y compresión

Para conocer la resistencia a flexión de las series hay que determinar la carga máxima (N) necesaria para romper una probeta prismática de (160 x 40 x 40) mm<sup>3</sup>, apoyada sobre rodillos, mediante la aplicación de una carga centrada proyectada a una velocidad constante de 20±1 N/s.

La resistencia a compresión se obtiene al aplicar una carga a cada una de las mitades obtenidas en el ensayo de flexión, sobre una superficie de (40 x 40) mm<sup>2</sup> mediante la aplicación de una carga uniforme a una velocidad constante de 100±10 N/s, hasta conseguir la rotura de la probeta.

Para la realizar estos ensayos se ha utilizado un dispositivo de carga conectado a un equipo de control digital normalizado, de acuerdo con las especificaciones técnicas de la normativa de aplicación.

En todas las series se produce una disminución en los valores de la resistencia mecánica, tanto a flexión como a compresión, según se incorporan de forma progresiva mayores porcentajes de escoria blanca LF, tal y como se muestra en la Tabla 6.8. en los registros de rotura obtenidos a los 7 días y a los 28 días de edad de las probetas.

Resistencias mecánicas					
	Muestra	Flexión 7 días (MPa)	Flexión 28 días (MPa)	Compresión 7 días (MPa)	Compresión 28 días (MPa)
<b>Referencia</b>	P0	5.9	6.2	15.5	15.6
<b>Series S</b>	PS20	5.2	5.1	13.8	13.6
	PS40	4.4	4.4	8.3	13.4
	PS60	3.6	3.3	5.5	9.0
<b>Series S+M</b>	PS20M	6.8	7.2	22.2	22.9
	PS40M	5.2	5.7	16.7	16.6
	PS60M	3.2	3.7	9.3	9.0
<b>Series S+L</b>	PS20L	3.9	4.0	9.9	9.1
	PS40L	3.1	3.4	7.7	7.8
	PS60L	1.9	1.8	3.9	4.0

**Tabla 6.8. Resistencias mecánicas a flexión y compresión de las muestras.**

Esta reducción de las resistencias se debe a la menor proporción de hemidrato en el conglomerante, lo que reduce la capacidad de agregación de las partículas al ser menos grueso el espesor de la matriz cohesiva<sup>36</sup>.

En la Serie S se alcanza la máxima resistencia a flexión y a compresión a los 28 días, pero como se observa en los resultados, la inclusión de aditivo supone el desarrollo completo de las resistencias mecánicas a los 7 días, con valores que se mantienen a los 28 días.

La utilización del aditivo plastificante en la Serie S+M mejora los resultados obtenidos sobre todo con cantidades menores de escoria, mientras que la

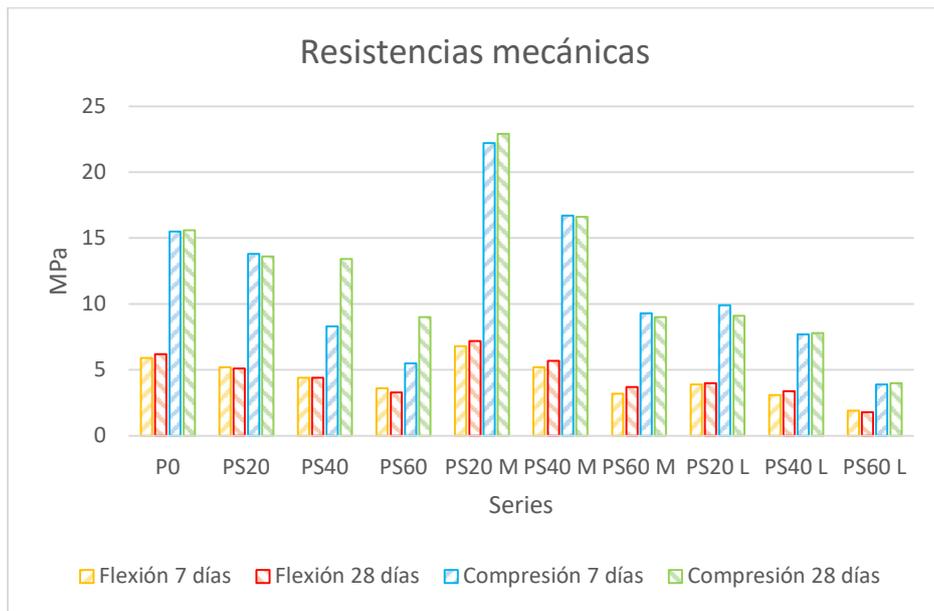
<sup>36</sup> S. Herrero P. Mayor, F. Hernández-Olivares. Influence of proportion and particle size gradation of rubber from end-of-life tires on mechanical, thermal and acoustic properties of plaster-rubber mortars. *Materials & Design*, (2013), 47, 633–642.

incorporación del aditivo latex en la Serie S+L produce una reducción la resistencia mecánica a flexión y a compresión.

Teniendo en cuenta que la escoria utilizada puede considerarse un árido, la optimización de las mezclas podría estudiarse para su aplicación en revestimientos de yeso o para morteros de yeso.

Peso a ello, los datos resultantes indican que las mezclas diseñadas con sus respectivas dosificaciones, con aditivo y sin él, alcanzan valores importantes de resistencia mecánica a flexión y compresión, como se puede comprobar en la Gráfica 6.7.

Todas las muestras cumplen con los requerimientos mínimos estándar establecidos por la norma UNE-EN 13279-2/2014, para su uso en revestimientos continuos sobre paramentos o morteros de mampostería, donde se exige un valor de, al menos, 1.0 o 2.0 MPa para la resistencia a flexión y 2.0 o 7.5 MPa de resistencia a compresión.



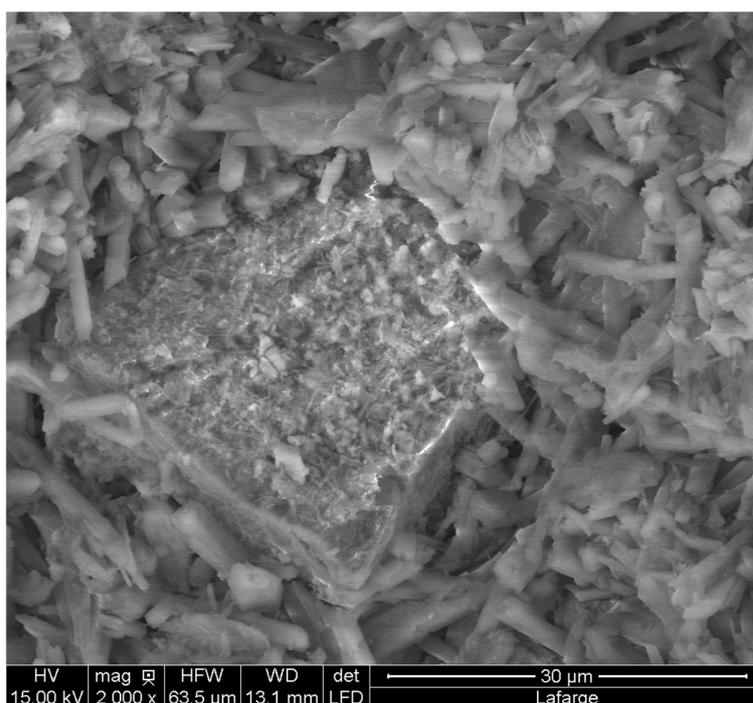
**Gráfica 6.7. Comparativa resistencias mecánicas.**

Cabe destacar que la mayor parte de las mezclas cumplen con los valores de resistencia mecánica exigidos para su uso como materiales de construcción, siendo las Series PS60 y PS60L las que presentan algunos resultados por debajo de los valores mínimos, en gran medida porque son

las muestras con mayor porcentaje de escoria utilizada, aunque la incorporación de los aditivos plastificantes atenúa este comportamiento.

Como conclusión, la cantidad de yeso sustituido por escoria blanca LF dependerá en gran medida del uso final que se quiera dar al material obtenido.

Como se observa en la Figura 6.2., los cristales de yeso rodean las partículas de escoria creando un entramado compacto y sin espacios desagregados en la interfase escoria yeso, siendo la unión adecuada y justificando los resultados obtenidos<sup>37</sup>.



**Figura 6.2. BSE muestra de serie PS40.**

Un primer análisis de los resultados obtenidos permite observar que existe correspondencia entre el comportamiento mecánico y la densidad aparente de las mezclas en estado seco, produciéndose un incremento de la

<sup>37</sup>Gutiérrez-González S, Gadea J, Rodríguez A, Blanco-Varela M.T, Calderón, V. Compatibility between gypsum and polyamide powder waste to produce lightweight plaster with enhanced thermal properties. Constr Build Mater 2012;34:179-85.

resistencia mecánica conforme también aumentan los valores de la densidad.

#### **6.4.4. Adherencia**

La adherencia es una de las propiedades más importantes a considerar para analizar la viabilidad de los materiales diseñados con materias primas obtenidas a partir de la valorización de residuos reciclado. Es muy habitual que este tipo de materiales afecten a la cohesión de la matriz de los morteros y reduzcan su capacidad de adherencia sobre la superficie de los soportes donde van dispuestos, separándose de estos fácilmente cuando están sometidos a esfuerzos de tracción.

Para determinar la adherencia de los morteros diseñados realizan de tracción para valorar la capacidad resistente de la unión mortero-soporte, en este caso de naturaleza cerámica.

Una vez mezclados los componentes del mortero, éste se dispone sobre la superficie de un material cerámico. Utilizando un útil apropiado a tal fin se practican cortes sobre la superficie del material de forma cilíndrica y con una altura igual al espesor de la capa del revestimiento. Una vez fraguado y endurecido el mortero se pegan unos discos metálicos, también cilíndricos, que servirán de útil para favorecer la aplicación de los esfuerzos de tracción. Mediante un equipo de tracción se procede a traccionar el conjunto disco metálico-mortero con una carga perpendicular y constante, con una cadencia de entre 0,003 N/mm<sup>2</sup> y 0,1 N/mm<sup>2</sup> por segundo, registrando la lectura de la carga máxima aplicada mediante un manómetro

El estudio de la adherencia sobre un soporte cerámico ligeramente humectado se ha estudiado a los 7 días y a los 28 días. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 6.9.

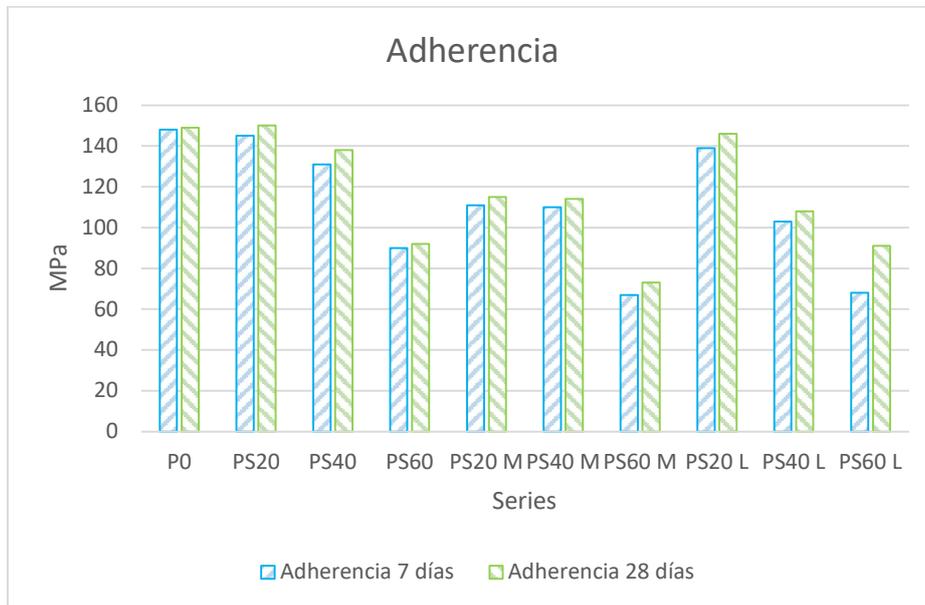
Los resultados indican que se produce un pequeño incremento en la adherencia de 7 días a 28 días, y que el factor que más influye en esta propiedad es la cantidad de escoria blanca añadida.

<b>Adherencia</b>			
	<b>Muestra</b>	<b>Adherencia a los 7 días (Kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Adherencia a los 28 días (Kg/cm<sup>2</sup>)</b>
<b>Referencia</b>	P0	<b>148</b>	<b>149</b>
<b>Series S</b>	PS20	<b>145</b>	<b>150</b>
	PS40	<b>131</b>	<b>138</b>
	PS60	<b>90</b>	<b>92</b>
<b>Series S+M</b>	PS20M	<b>111</b>	<b>115</b>
	PS40M	<b>110</b>	<b>114</b>
	PS60M	<b>67</b>	<b>73</b>
<b>Series S+L</b>	PS20L	<b>139</b>	<b>146</b>
	PS40L	<b>103</b>	<b>108</b>
	PS60L	<b>68</b>	<b>91</b>

**Tabla 6.9. Adherencia de las muestras.**

En efecto, si el porcentaje de LF utilizado crece, la adherencia disminuye, observándose una pérdida de hasta un 54% en este parámetro en las Series PS60M y PS60L, con respecto a las muestras patrón de referencia, tal y como se puede observar en la comparación de la Gráfica 6.8.

A pesar de que la utilización del aditivo latex debería mejorar la plasticidad de la muestra, reduciendo el riesgo de fisuración en el proceso de fraguado y endureciendo, y favorecer la adherencia sobre los soportes, no se observa ninguna mejora en los resultados en la serie que dosifica este aditivo.



**Gráfica 6.8. Comparativa adherencia sobre cerámico.**

#### 6.4.5. Permeabilidad al vapor de agua y estructura de poros

La permeabilidad al vapor de agua es una característica que determina la capacidad del material para eliminar el agua de condensación interna, precipitada por las tensiones de temperatura entre las caras de un revestimiento, permitiendo la transpiración de los paramentos que conforman un cerramiento.

Esta propiedad es muy importante en morteros dispuestos en paramentos, ya que, si el material no es capaz de eliminar el vapor de agua que circula por sus intersticios, podría precipitar en el interior del ecomortero y provocar daños que afectan a sus propiedades.

Para realizar este ensayo se debe seguir el procedimiento de análisis de la norma<sup>38</sup> UNE-EN 1015-19/A1:1999, ya que este ensayo es específico para el estudio de morteros para revoco y enlucido, pudiéndose extrapolar su aplicación a productos tradicionales.

<sup>38</sup>UNE-EN 1015-19:1999/A1. Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 19: Determinación de la permeabilidad al vapor de agua de los morteros endurecidos de revoco y enlucido.

Para llevar a cabo este análisis, se fabrican tres probetas cilíndricas de 16 cm de diámetro y 1,5 cm de altura, sobre un soporte de hormigón. Una vez desecadas las probetas se colocan en los recipientes de ensayo, a modo de tapa, en los que previamente se vierte una disolución saturada de nitrato de potasio ( $\text{KNO}_3$ ), dejando una cámara de aire entre la disolución y la superficie inferior de la probeta de 10 mm. La estanqueidad entre la probeta y el molde se consigue mediante el sellado de la junta con mástico.

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

A partir de los datos obtenidos se calcula la Permeanza en  $\text{Kg/m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}$ , que es el flujo de vapor de agua que atraviesa la probeta. Si se multiplica el valor de la Permeanza por el espesor de la probeta, se obtiene la Permeabilidad al Vapor de Agua del material.

El valor final de cada serie se obtiene como el valor medio de los resultados obtenidos en las probetas de ensayo, tal y como se muestra en la Tabla 6.10.

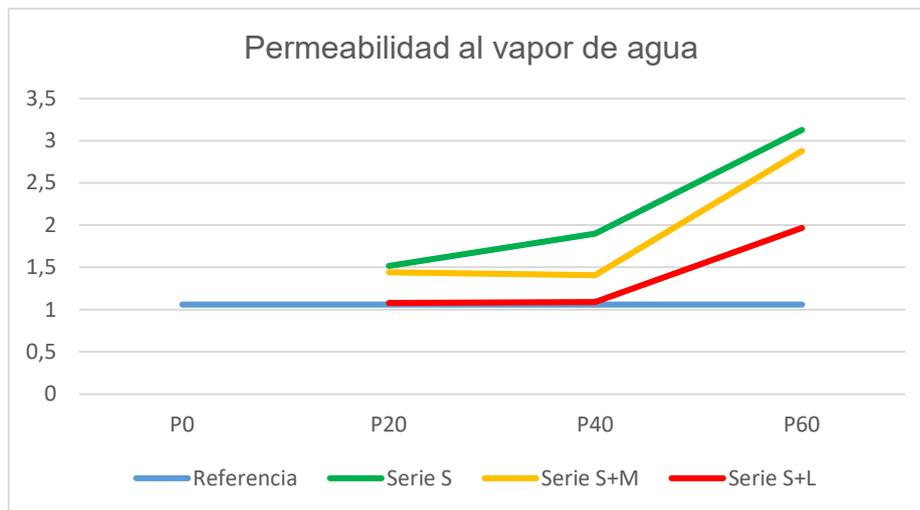
Los resultados obtenidos en la serie de referencia indican que su permeabilidad es baja, ya que, al tratarse solo de yeso, ya que este es un material muy cerrado que no facilita el flujo de vapor de agua a través de su red capilar, mostrando un comportamiento impermeable a la difusión del agua.

La incorporación de escoria blanca LF a las muestras infiere una mejora de esta característica, incrementando la permeabilidad de las probetas de las series conforme se dosifica más cantidad en las mezclas. No obstante, la utilización de aditivos provoca que la mejora producida por las escorias no sea tan relevante, ya que se observa una reducción, de acuerdo con los registros obtenidos, tal y como se muestra en el Gráfico 6.9. El empleo de aditivo plastificante en la Serie S+M da lugar a que la permeabilidad al vapor de agua sea menor, probablemente justificado porque en esta muestra la dosificación de agua para conseguir la consistencia plástica ha sido menor, lo que da lugar a una menor cantidad de poros en su masa.

También se produce este efecto con la utilización del aditivo latex en la Serie S+L, ya que su incorporación aumenta la impermeabilidad.

Permeabilidad al vapor de agua		
	Muestra	Permeabilidad al vapor de agua (Kg/m*s*Pa)*10 <sup>11</sup>
Referencia	P0	1.06
Series S	PS20	1.52
	PS40	1.90
	PS60	3.13
Series S+M	PS20M	1.44
	PS40M	1.41
	PS60M	2.88
Series S+L	PS20L	1.08
	PS40L	1.09
	PS60L	1.97

Tabla 6.10. Permeabilidad al vapor de agua de las muestras.



Gráfica 6.9. Comparativa permeabilidad al vapor de agua.

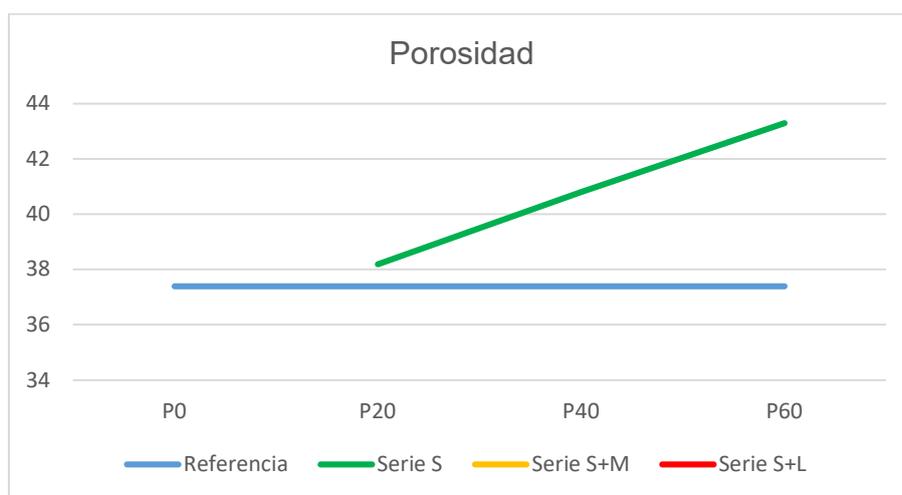
Los resultados obtenidos en las Series S y S+M muestran unos valores muy aceptables en cuanto a la permeabilidad al vapor de agua de dichas muestras, observándose en todas ellas un incremento progresivo de la red capilar, cuanto mayor es el porcentaje de escoria blanca dosificada.

En la Tabla 6.11 se muestran otras propiedades de los morteros ensayados relacionadas directamente con la Permeabilidad al Vapor de Agua, referidas a la Porosidad Total de las muestras y el Diámetro Crítico del Poro, obtenidos mediante Porosimetría Intrusiva de Mercurio.

Porosidad y Diámetro crítico del Poro			
	Muestra	Porosidad Total (%)	Diámetro Crítico del Poro (µm)
<b>Referencia</b>	P0	37.4	1.207
<b>Series S</b>	PS20	38.2	2.258
	PS40	40.8	2.261
	PS60	43.3	2.787

**Tabla 6.11. Porosidad y diámetro crítico de poros de las muestras.**

De igual forma, en las Gráficas 6.10 y 6.11 se analizan por separado los valores de la Porosidad Total y del Diámetro Crítico del Poro, así como su comparación con los resultados obtenidos en la muestra patrón P0.



**Gráfica 6.10. Comparativa porosidad total en%.**

Con los registros obtenidos en el proceso de introducción del mercurio en las mezclas, se obtienen las gráficas correspondientes a los diámetros de los poros contenidos en las mezclas. El diámetro crítico del poro está representado en la pendiente más pronunciada de la curva de volumen intrusivo acumulativo correspondiente, tal y como se muestra en la Figura 6.3.

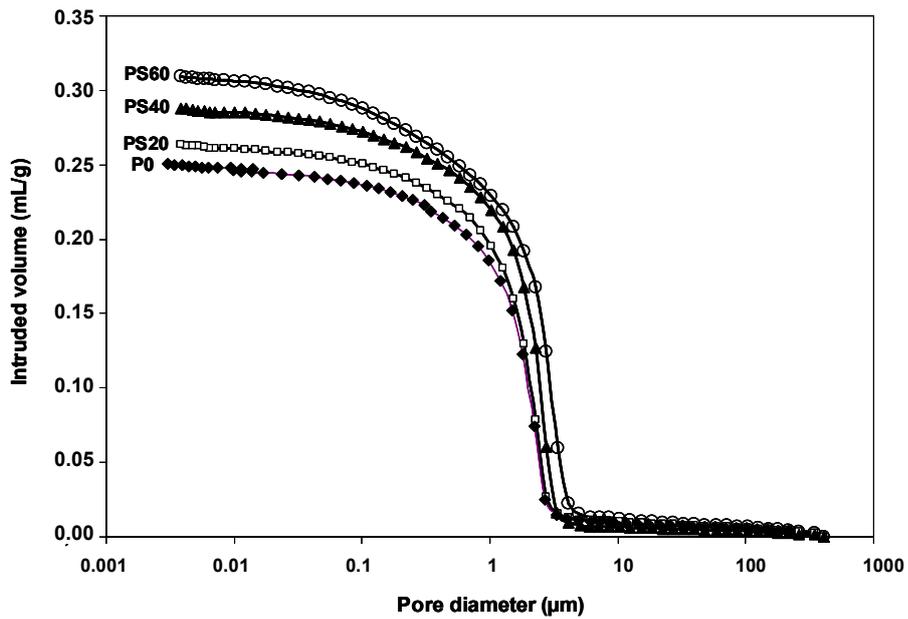
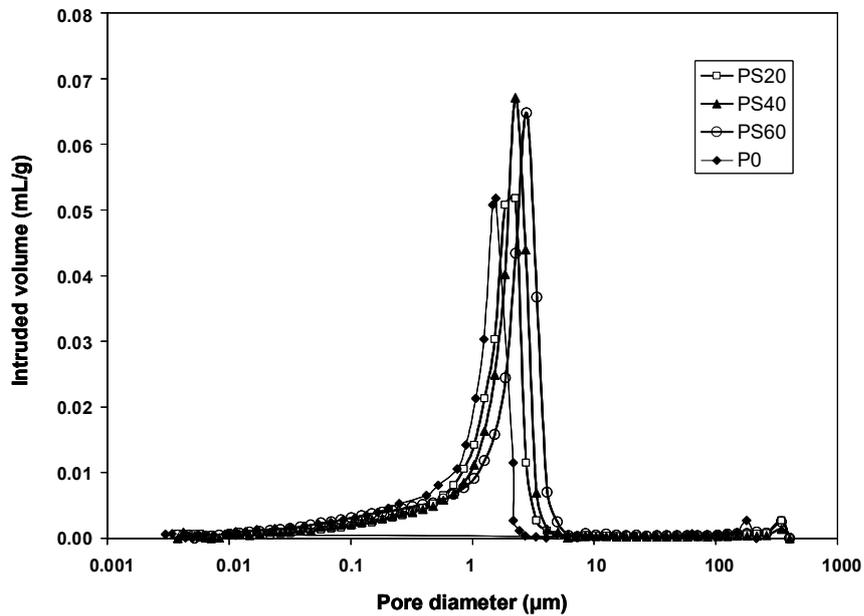


Figura 6.3. Curva de volumen intrusivo acumulativo del diámetro de poros en  $\mu\text{m}$ .

Para determinar con más precisión el diámetro crítico de poros se dibuja la curva de distribución diferencial de la Figura 6.4., donde se pueden observar los picos máximos de distribución.

El concepto de *diámetro crítico del poro* es el valor del diámetro por encima del cual no se podría trazar una ruta de huecos conectada en toda la muestra.

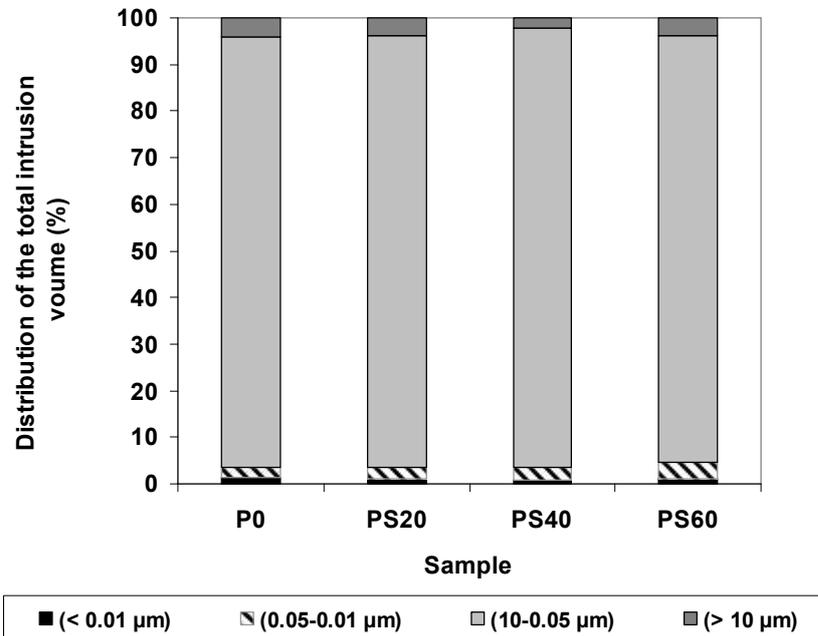


**Figura 6.4.** Curva de distribución diferencial del diámetro de poros en  $\mu\text{m}$ .

En los datos representados en la Tabla 6.11. se muestra que el diámetro crítico del poro para la serie S crece conforme se incrementa el porcentaje de escoria blanca aportado a las mezclas diseñadas. Pasa de  $1.207 \mu\text{m}$  para la muestra Po a  $2.787 \mu\text{m}$  para la muestra PS60, que es la que contiene mayor proporción de LFS en sustitución del yeso. Estos resultados pueden ser consecuencia de la distribución de la escoria, ya que con su incorporación genera una red de capilares conectados y distribuidos por toda la masa del mortero.

Para realizar la clasificación del tamaño de poro de las series, se tienen en cuenta una serie de estudios previos<sup>39</sup> relacionados con esta característica. Los resultados se muestran en la Figura 6.5.

<sup>39</sup>Gutiérrez-González S, Gadea J, Rodríguez A, Blanco-Varela M.T, Calderón, V. Compatibility between gypsum and polyamide powder waste to produce lightweight plaster with enhanced thermal properties. Constr Build Mater 2012;34:179.



**Figura 6.5. Distribución volumen intrusivo total del diámetro de poros en  $\mu\text{m}$ .**

Esta distribución representa el tamaño de poros de cada muestra con respecto al porcentaje de porosidad total. Los tamaños de poro de más de  $10\ \mu\text{m}$  se denominan huecos de aire, mientras que los comprendidos entre  $0.05\ \mu\text{m}$  y  $10\ \mu\text{m}$  se conocen como capilares grandes y los que se encuentran entre  $0.01\ \mu\text{m}$  y  $0.05\ \mu\text{m}$  capilares medianos. Los poros por debajo de  $0.01\ \mu\text{m}$  de denominan capilares pequeños.

A priori, la porosidad capilar tiene un efecto importante en los procesos de transporte del agua a través del material, pero, sin embargo, afecta menos a las tasas de hidratación.

Analizando los datos anteriores, se determina que la adición de escoria blanca ha creado una mayor cantidad de poros denominados como capilares medianos, como consecuencia de la reducción de los capilares grandes.

La aparición de capilares pequeños en las muestras puede provocar modificaciones en la permeabilidad del material, pero en el caso de las muestras analizadas, su presencia es muy pequeña.

Todos los capilares de las mezclas se encuentran conectados entre sí a través de la red capilar del yeso, lo que facilita el paso del vapor de agua a través del material.

El aumento progresivo del tamaño crítico del poro, junto con la reducción en el porcentaje de los capilares grandes y un aumento gradual en el porcentaje de capilares medios, produce un aumento de la permeabilidad en todas las mezclas analizadas y, por tanto, el incremento de la porosidad a medida que aumenta la cantidad de escoria blanca utilizada en sustitución del yeso concuerda con los valores de permeabilidad obtenidos.

#### **6.4.6. Estudio microscópico**

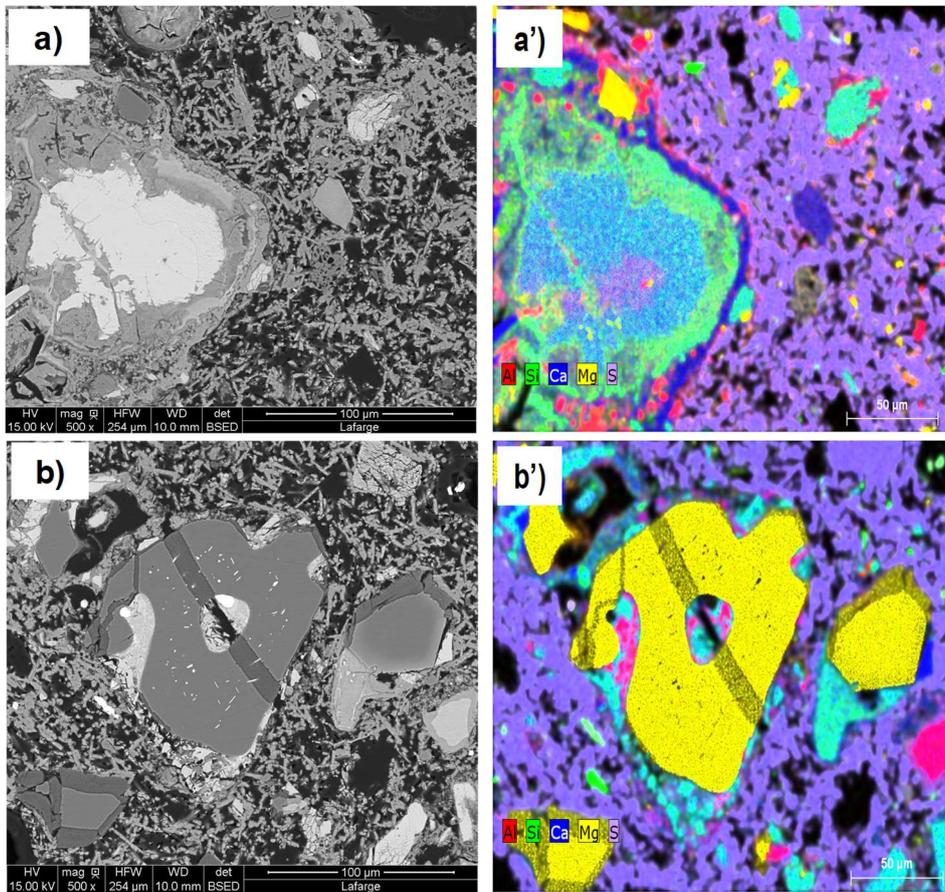
El análisis de estos nuevos ecomorteros se completa con un estudio microscópico del material para comprobar su agregación interna, y la interacción entre el hemidrato y la escoria blanca LF.

Para realizar este estudio se emplea el Microscopio Eléctrico de Barrido SEM, que utiliza un haz de electrones para formar imágenes de alta resolución, siendo capaz de enfocar a la vez una gran parte de la muestra.

El equipo utilizado es un Microscopio Electrónico de Barrido JEOL JSM-6460LV con sistema INCA por Rayos X, permitiendo obtener fotografías de hasta 300.000 aumentos.

De las imágenes obtenidas a través de este ensayo se observan dos áreas distintas de una sección transversal, en este caso de la muestra PS40. Paralelamente a estas imágenes BSE, se representan en la Figura 6.6. dos mapas químicos a través de Microanálisis por Dispersión de Energías de Rayos-X (EDX).

Estos mapas proporcionan la distribución de ciertos elementos que caracterizan la matriz del yeso, compuesta por azufre y calcio, además de los agregados producidos por la incorporación de la escoria blanca como el calcio, magnesio, silicio y aluminio.



**Figura 6.6.** Área de la muestra PS40 con agregación de LFS en la matriz (a y b) y mapa de ambas áreas con EDX (a' y b').

En la primera imagen se aprecia un agregado de escoria blanca de 100µm de largo, compuesto principalmente por silicato de calcio, marcado en color azul y verde, que se adjunta a la matriz porosa del yeso formada por agujas, indicada en color violeta.

También se puede ver que el núcleo de la escoria blanca LF agregada se encuentra en estado anhidro después de 12 meses desde la realización de la mezcla, debido al color blanca que muestra, mientras que la representación del borde parece estar hidratado.

Cabe destacar que la imagen del mapa EDX presenta un anillo azul, lo que puede indicar que el extremo del agregado esté compuesto por portlandita  $\text{CaOH}_2$ . Sin embargo, esta imagen muestra que la hidratación de la superficie de la escoria blanca no afecta a la matriz porosa del yeso.

La segunda imagen muestra otra área de la matriz del yeso que contiene varios agregados de escoria blanca LF, que por el color amarillo que se observa en el mapa EDX, están formado por cantidades variables de MgO o MgOH<sub>2</sub>, rodeadas a su vez de pequeñas áreas compuestas por hidratos de sulfato de calcio representados en color azul verdoso.

Es importante destacar que el estudio de las secciones transversales realizado mediante el ensayo SEM-EDX, demuestra que la hidratación parcial de los agregados de escoria blanca LF no afecta significativamente a la matriz porosa del yeso<sup>40</sup>. Internamente los elementos hidratados hacen más densa la microestructura que rodea los agregados de escorias blancas LF ricos en calcio, pero, sin embargo, la estructura del yeso es lo suficientemente porosa como para ser ocupada por los hidratos de silicato de calcio formados durante la hidratación lenta de las escorias blancas.

Para asegurar y determinar la durabilidad de la microestructura resultante de las mezclas a largo plazo, sería necesario realizar otros análisis adicionales.

#### **6.4.7. Termogravimetría**

Al tratarse de ecomorteros para su uso en construcción, es importante conocer cómo se comportan cuando están expuestos al fuego.

Para determinar el comportamiento de estos derivados del yeso frente a procesos de degradación térmica, se realiza el ensayo de termogravimetría TGA. Esta técnica mide el cambio de masa de una muestra mientras se va calentando a velocidad constante, indicando la degradación de los residuos y del yeso. Para ello se emplea un equipo analizador TGA-DSC-DTA.

Se realiza un análisis con muestras de la Serie S que contienen adición de escorias blancas en sus diferentes proporciones de dosificación, obteniendo los resultados que se muestran en la Figura 6.7.

---

<sup>40</sup>Escalante-García J.I., Magallanes-Rivera R.X., Gorokhovskiy A., Waste gypsum-blast furnace slag cement in mortars with granulated slag and silica sand as aggregates. *Constr Build Mater* 2009;23:2851-5.

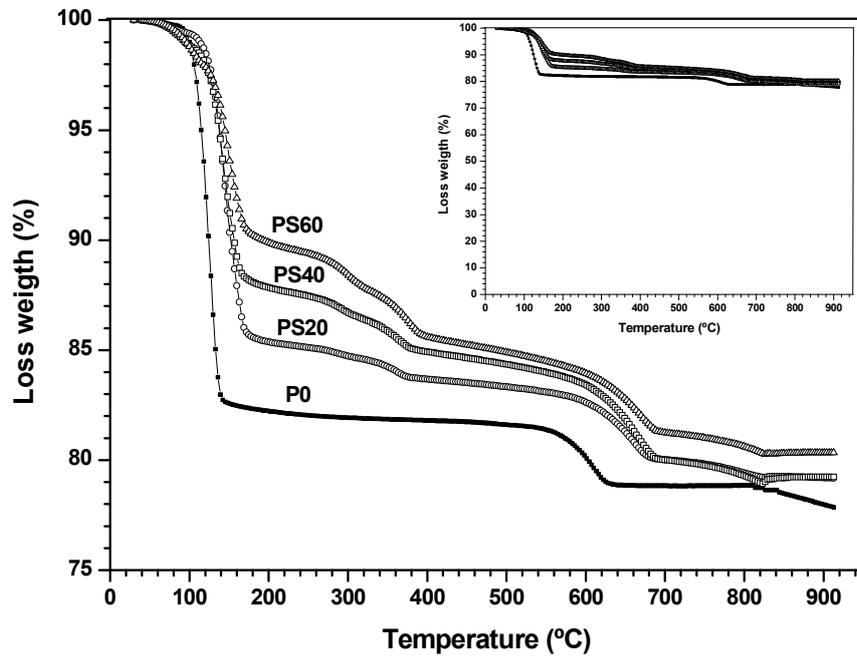


Figura 6.7. TGA de la degradación de las muestras sin aditivos.

Analizando los resultados desde el punto de vista cualitativo, se observa que según se va sustituyendo el yeso por la escoria blanca, la pérdida de masa disminuye, lo que indica que el comportamiento térmico de estos elementos es muy aceptable, mejorando los resultados a medida que aumenta el porcentaje de residuo empleado.

La primera pérdida de masa en la muestra de referencia P0 se produce entre los 90°C y 180°C, debido al agua estructural aportado por la descomposición de  $\text{CaSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$ .

En este intervalo se produce una doble pérdida de agua, pese a que solo se detecta una debido a las condiciones del ensayo. Se observa una pérdida de 1.5 moléculas de agua en primer lugar y una segunda pérdida de 0.5 moléculas de agua pasando de:



Esta primera pérdida de masa se produce en todas las muestras de la Serie S entre los 90°C y los 180°C.

La siguiente pérdida de masa en la muestra de referencia P0 ocurrirá entre los 580°C y los 700°C, debido a una descomposición de la dolomita presente en el yeso comercial<sup>41</sup>.

Sin embargo, en las muestras de la Serie S, con sustitución de escorias blancas, se produce una pérdida de masa en una zona intermedia, observándose una degradación entre los 300°C y los 400°C procedente de la descomposición de los óxidos hidratados presente en la escoria blanca LF<sup>42</sup>.

Cabe destacar que a los 180°C la pérdida de masa en la muestra PS60 se aproxima al 10%, mientras que a esa misma temperatura la pérdida producida en la muestra P0 está en torno al 18%.

A los 800°C se puede realizar una equiparación de la pérdida de masa en todas las muestras, siendo esta del 20%.

Después de analizar los resultados obtenidos se puede afirmar que la escoria tiene una estabilidad frente al fuego superior a la del hemidrato y, como consecuencia de ello, una mayor concentración de residuo en las mezclas implica una pérdida de masa cada vez menor.

## 6.5. CONCLUSIONES

Los diversos resultados obtenidos en la investigación realizada muestran que el uso de escorias blancas de Horno Cuchara LF valorizadas para elaboración de ecomorteros para construcción es técnicamente viable sobre todo y una buena práctica desde el punto de vista ecológico.

Además, de los parámetros obtenidos, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

---

<sup>41</sup>Carvalho MTM, Leles MIG, Tubino RMC. Tg and DSC studies on plaster residues as recycled material. J Therm Anal Calorim 2008;91(2):621–5.

<sup>42</sup>Gruyaert E, Robeyt N, De Belie N. Study of the hydration of Portland cement blended with blast-furnace slag by calorimetry and thermogravimetry. J Therm Anal Calor 2010;102(3):941-51.

- La cantidad de agua de amasado necesaria para la dosificación de las mezclas no depende del porcentaje de escoria blanca utilizada en la muestra y solo disminuye cuando se añaden aditivos plastificantes como en la serie S+M.
- Aunque la incorporación de escoria blanca infiere una reducción de los tiempos de fraguado, la cantidad de residuo utilizado no resulta relevante incluso cuando se dosifica por encima del 60% en las mezclas diseñadas.
- Las escorias blancas presentan cantidades similares de absorción de agua, aunque ligeramente inferiores, con respecto a la que presenta el conglomerante yeso. Se observa una reducción más significativa en las mezclas con inclusión de aditivo SikaMix, lo que conlleva una pérdida menor de agua en el proceso de fraguado, favoreciendo de esta forma un curado más uniforme, lo que evita la aparición de fisuras por ahogamiento.
- Los parámetros de dureza Shore C se mantienen constantes en comparación con la muestra de referencia, con independencia del porcentaje de escoria blanca dosificado en las muestras en las series S y S+M. Sin embargo, con la incorporación de aditivo latex en las series S+L, se produce una reducción en los valores de esta propiedad, debido a que actúa flexibilizando el material.
- Todas las probetas han roto por cohesión en el ensayo de adherencia, pese a que la dosificación de escoria blanca en las muestras da lugar a valores inferiores respecto del mortero de yeso patrón. Esto supone que las series con adición de escoria presentan una buena adherencia, y que el fallo por rotura se produce en la interface yeso-escoria de la muestra y no entre la superficie cerámica del ensayo y el ecomortero. Con los datos resultantes se puede afirmar que la utilización de aditivos no mejora la capacidad adherente de las muestras.
- Todas las dosificaciones registran resultados en los ensayos de resistencia mecánica a flexión y compresión suficientes para considerar que los ecomorteros diseñados pueden utilizarse con garantía en trabajos de albañilería, incluidas las series en las que la proporción de escoria blanca dosificada alcanza es del 60%. En este caso, la reducción es mayor, pero cumplen con los requerimientos establecidos por la norma. Solo la utilización del aditivo plastificante

en las series S+M aumenta las resistencias mecánicas debido a que reducen la relación agua/conglomerante de la muestra.

- Las series que presentan un mayor porcentaje de escoria blanca en sustitución del yeso, presentan un mayor tamaño del diámetro de los poros, una reducción de los capilares largos y un incremento en los capilares medianos. Estas características se pueden asociar a una mayor permeabilidad al vapor de agua, ya que contribuyen a incrementar la transmisión en los paramentos fabricados con estos productos.
- Los ensayos realizados con el Microscopio Electrónico muestran que la hidratación parcial de la escoria blanca no afecta significativamente a la matriz porosa del yeso, y que la agregación interna de la escoria y su interacción con el hemidrato es buena.
- La termogravimetría indica que la resistencia térmica mejora a medida que aumenta el porcentaje de escoria blanca dosificada, ya que una mayor proporción del residuo infiere una pérdida de masa cada vez menor, siguiendo esta tendencia hasta los 600°C.

En definitiva, la utilización de escoria blanca de Horno Cuchara LF utilizada como conglomerante en sustitución del hemidrato en el diseño de morteros de yeso de albañilería, es una opción muy viable, ya que las mezclas obtenidas muestran propiedades equivalentes a las de los morteros de yeso tradicionales, con resultados dentro de los parámetros exigidos por la normativa vigente.





## **CAPÍTULO VII**

**Caracterización de mezclas con escoria  
negra**



## **7. CARACTERIZACIÓN DE MEZCLAS CON ESCORIA NEGRA**

A continuación, se estudian los morteros de yeso en los que se utiliza escoria negra de Horno Eléctrico de Arco EAF en sustitución parcial del conglomerante.

Siguiendo el procedimiento metodológico desarrollado en el Capítulo 6, donde se describe el diseño y elaboración de ecomorteros fabricados con escoria blancas LF, se estudian los morteros de yeso diseñados con la incorporación de escoria negra EAF generada en los procesos de fabricación de acero con Horno Eléctrico de Arco.

Se tendrá especial atención a los resultados obtenidos de estos ecomorteros en lo referente a la resistencia, adherencia y durabilidad, por si la adición de escoria negra, en sustitución de un porcentaje de yeso, provoca algún detrimento en estas propiedades.

Para comprobar la idoneidad de estas mezclas se realizarán las dosificaciones y ensayos determinados por la normativa, tanto en estado fresco como en endurecido, con el fin de alcanzar los resultados que muestren una mejora significativa de sus características.

### **7.1. INTRODUCCIÓN**

La producción del acero mundial en la última década ha mantenido unos valores elevados y estables, llegándose a producir 177,6 millones de toneladas de acero bruto mensual<sup>43</sup>, de los cuales se estima que un 42,8% corresponde al proceso de fabricación en Hornos Eléctricos de Arco (EAF Electric Arc Furnace). En este tipo de hornos el calor para la fusión de las materias primas es suministrado por una descarga eléctrica en forma de arco, generada por electrodos de grafito.

En el proceso de fabricación de acero mediante Horno Eléctrico de Arco se genera aproximadamente un 15% de escoria por cada tonelada de acero producida, de las que un 75% corresponden a escorias negras según diversos estudios<sup>44</sup>.

---

<sup>43</sup>Asociación Mundial del Acero (WorldSteel)

<sup>44</sup> CELSA, Badische Stahl-Engineering GmbH y ADEC GLOBAL

De estos datos se puede extraer que la generación de escorias negras EAF ha alcanzado niveles de producción entre 8,6 y 14,3 millones de toneladas anuales en la última década, siendo particularmente en España de hasta 1,78 millones de toneladas<sup>45</sup>.

En este estudio se analizará la utilización de este tipo de residuos generados en la industria siderúrgica, como adición en morteros de yeso para albañilería, con el objetivo de mejorar sus propiedades, evitando así su vertido sin un uso definido, con el consiguiente impacto sobre el medio ambiente.

Este tipo de escorias negras apenas ha sido utilizado en la fabricación de conglomerantes, pero aplicando el nuevo reglamento europeo sobre yesos de construcción donde da la posibilidad de fabricar yesos con minerales agregados que contienen cal, merece la pena considerar la posibilidad de realizar morteros de yeso con agregados de escorias negras, marcándose estos yesos como tipo B<sup>46</sup>.

La escoria negra EAF utilizada en esta investigación es de tamaño fino, lo que permite su mezcla con el sulfato cálcico hemidratado. Su aspecto es gris-oscuro, lo que afecta a coloración final del yeso que presenta tonalidades más oscuras y menos estéticas para un mortero de yeso para albañilería.

No obstante, esta apariencia es un aspecto menor en comparación con los beneficios que puede aportar su adición en sus propiedades físicas, manteniendo su resistencia y contribuyendo mejorar su uso y aplicabilidad<sup>47</sup>, al mismo tiempo que se aprovecha un residuo y se contribuye al respeto al medio ambiente.

El estudio se centrará en el análisis de un nuevo material de construcción fabricado a partir de una mezcla de yeso y escoria negra EAF como agregado mineral, demostrando que sus propiedades son equivalentes a las de los yesos convencionales, de acuerdo con la normativa vigente.

---

<sup>45</sup> CEDEX Ministerio de Fomento.

<sup>46</sup>UNE-EN 13279-1:2014 Yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para construcción.

<sup>47</sup>Lewry AJ, Williamson J. The setting of gypsum plasters. The effect of additives and impurities.

Esta investigación puede considerarse un avance para obtener nuevos materiales en masa aplicables a la construcción, compuestos por elementos reciclados que disponen de las propiedades adecuadas, ya que no se conocen bibliografías relacionadas con este tema.

## 7.2. PROCEDIMIENTO OPERATIVO

Para preparar las mezclas de mortero a partir de las dosificaciones diseñadas, es preciso disponer materias primas adecuadas a los objetivos de la investigación.

### 7.2.1. Preparación de los materiales

Se realizará un tamizado previo de las escorias negras con el objetivo de obtener un material compuesto lo más continuo y cerrado posible para evitar huecos entre las diferentes partículas.

Para llevar a cabo dicho proceso se realizará un análisis granulométrico por tamizado utilizando una serie de tamices normalizada, creando una línea granulométrica homogénea para las escorias negras, tal y como se muestra en la Figura 7.1.



*Figura 7.1. Escorias negras después de tamizar.*

Para el estudio se utilizará la fracción de material ensayado que pasa por el Tamiz 1.0 mm, ya que este tamaño se considera ideal para fabricar las muestras de las dosificaciones diseñadas.

### 7.2.2. Preparación de las muestras

Para la realización de este estudio se han diseñado una serie de dosificaciones con una relación yeso/escoria determinada para cada tipo de muestra. Este análisis se centrará en el estudio de las características obtenidas en las mezclas con cada porcentaje de escoria añadido, ya que no existen referencias al respecto, por lo que no se incluirán aditivos en este caso. Estas quedan recogidas en la siguiente Tabla 7.1.

Dosificaciones de las muestras a estudiar			
	Muestra	Relación% Yeso/Escoria	Aditivo%
Referencia	P0	100/0	-
Series S	PS20	80/20	-
	PS40	60/40	-
	PS60	40/60	-
	PS80	20/80	-

*Tabla 7.1. Dosificaciones de las muestras a estudiar.*

Tal y como se indica en la norma UNE-EN 13279-2/2014<sup>48</sup>, las muestras analizadas deben contener una cantidad de entre 1,2 dm<sup>3</sup> y 1,5 dm<sup>3</sup> de yeso. Teniendo en cuenta que la densidad del agua es de 1 g/cm<sup>3</sup> y la del yeso 2,65 g/cm<sup>3</sup>, se presenta una relación agua/yeso de en torno a 0,40, con lo que así se obtienen las cantidades de partida de cada componente para comenzar el estudio de las muestras.

<sup>48</sup>UNE-EN 13279-2:2014 Yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción. Parte 2: Métodos de ensayo.

Para la elaboración de las muestras con adiciones de escorias y aditivos, se sustituye la parte proporcional de yeso por estos componentes en función de las dosificaciones indicadas.

Siguiendo lo dispuesto en la norma UNE-EN 13279-2/2014, las mezclas a estudiar deben tener una consistencia plástica de  $165 \pm 5$  mm en la mesa de sacudidas, con lo que se irá ajustando la relación agua/mezcla para que la muestra final de cada dosificación cumpla con la normativa estipulada.

### 7.2.3. Amasado del mortero de yeso

Las mezclas de los diferentes morteros de yeso con escoria blanca diseñados se preparan en una primera fase de forma manual para conseguir un componente lo más homogéneo posible. Posteriormente, se introduce en la amasadora mecánica y se añade el agua de dosificación. Para conseguir una mezcla uniforme, el equipo dispone de un programa de amasado normalizado que varía la frecuencia de giro y los tiempos de rotación de la pala, completando en su conjunto un ciclo de 90 segundos, de acuerdo con las especificaciones de la Norma UNE-EN 13279-1/2009, tal y como se muestra en la Figura 7.2.



**Figura 7.2. Amasadora mecánica programable.**

### **7.3. CARACTERIZACIÓN EN ESTADO FRESCO**

En este apartado se describirán los ensayos utilizados para la caracterización y definición de las dosificaciones correspondientes a cada una de las mezclas yeso-residuo-aditivo, de acuerdo con lo especificado en la norma UNE-EN 13279-2/2014.

Todos los ensayos que se describen a continuación se realizarán en estado fresco, es decir, antes de que la muestra finalice su fraguado y endurecimiento.

En primer lugar, se comprobará la relación agua/yeso, punto de partida para establecer las proporciones correspondientes a la dosificación de cada muestra. También se estudiará el principio de fraguado, característica fundamental para el estudio de sus posibles usos, así como la densidad en fresco de cada una de ellas.

#### **7.3.1. Consistencia y relación agua/conglomerante**

Para comenzar, se establecerá una cantidad total de conglomerante según la cantidad de yeso y escoria negra EAF utilizada.

Se determinará la relación agua/conglomerante de las distintas dosificaciones, condicionando la cantidad de agua añadida para obtener un diámetro de escurrimiento de  $165\pm 5$  mm en la mesa de sacudidas, de acuerdo con el procedimiento de ensayo establecido en la norma. De esta forma, se quieren conseguir mezclas con una adecuada trabajabilidad en un ámbito de consistencia plástico.

En la Tabla 7.2 se muestran los resultados obtenidos en el estudio de la relación agua/conglomerante de las mezclas.

De acuerdo con los resultados obtenidos, un primer análisis permite afirmar que cuanto mayor es la cantidad de escoria negra EAF añadida a las mezclas, menor es la cantidad de agua necesaria añadir para conseguir la consistencia plástica de diseño.

Las muestras PS20 y PS40 muestran valores semejantes a los del mortero patrón de referencia, estando la relación en torno a 0,40. Cuando la proporción de escoria negra EAF se incrementa, los valores experimentan una drástica reducción.

Relación agua/conglomerante				
	Muestra	Relación% Yeso/Escoria	Aditivo%	a/c
Referencia	P0	100/0	-	<b>0,49</b>
Series S	PS20	80/20	-	<b>0,42</b>
	PS40	60/40	-	<b>0,35</b>
	PS60	40/60	-	<b>0,265</b>
	PS80	20/80	-	<b>0,195</b>

**Tabla 7.2. Relación agua/conglomerante obtenida en la mesa de sacudidas.**

A pesar de las diferencias observadas en la relación a/c de las muestras diseñadas, todas ellas presentan unas buenas condiciones de trabajabilidad, como se muestra en la Figura 7.3.



**Figura 7.3. Consistencia y relación a/c muestra PS80.**

### 7.3.2. Principio de fraguado

Para conocer el tiempo de principio de fraguado de las mezclas se utilizará el Método del Cono de Vicat. Este procedimiento de análisis permite medir el tiempo que transcurre desde que se mezcla el agua/conglomerante contenida en un cono en forma de pasta, hasta que la aguja utilizada en el ensayo penetra a una profundidad de  $22\pm 2$  mm en el material, como se observa en la Figura 7.4.



*Figura 7.4. Principio de fraguado cono de Vicat de la muestra PS20.*

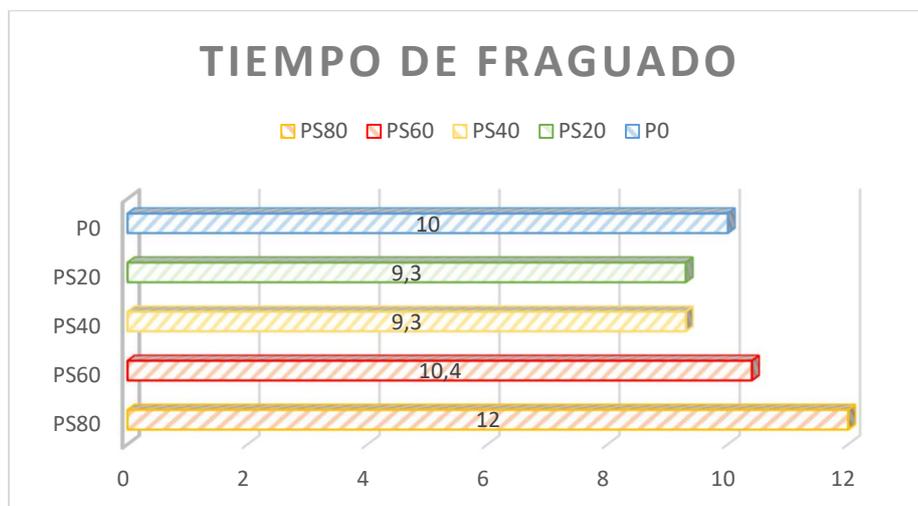
Partiendo de la muestra de referencia, se observa que según se va incrementando el porcentaje de escoria negra EAF añadida, se reduce el tiempo de fraguado. Una vez que la escoria negra supera la proporción de yeso de la muestra, el tiempo de fraguado comienza a incrementarse, tal y como se puede comprobar en la Tabla 7.3.

Los tiempos de fraguado se reducen con respecto a la muestra de referencia P0 en las muestras PS20 y PS40, que solo contienen una 40% de escoria negra en la mezcla. En el resto de casos, en los que esta cantidad de escoria añadida es superior, se observa un incremento del tiempo de fraguado, superando al del tiempo del mortero patrón, dosificado con un 100% de yeso.

Tiempo Principio de Fraguado			
	Muestra	Relación% Yeso/Escoria	Tiempo de fraguado (min)
Referencia	P0	100/0	10´00”
Series S	PS20	80/20	9´30”
	PS40	60/40	9´30”
	PS60	40/60	10´40”
	PS80	20/80	12´00”

**Tabla 7.3. Principio de fraguado de cada muestra obtenido por método cono de Vicat.**

En la Gráfica 7.1 se puede observar una comparativa de los tiempos de fraguado de las mezclas diseñadas en relación con el mortero patrón.



**Gráfica 7.1. Comparativa tiempos de fraguado.**

En la Tabla 7.3 se puede observar que los tiempos de fraguado disminuyen conforme se iguala la relación yeso/escoria. Al reducirse la cantidad de hemidrato y mantenerse la relación agua/conglomerante, es decir, que la cantidad de agua añadida es aproximadamente la misma, el yeso se disuelve

de forma más rápida, al presentar concentraciones sobresaturadas por el exceso del agua de hidratación.

Sin embargo, al aumentar la proporción de escoria negra EAF en las mezclas y superar a la cantidad de yeso dosificada, se observa que en todas ellas se incrementan los tiempos de fraguado, siendo superiores a los de la muestra de referencia.

Por ello, se observa una reducción en las propiedades de trabajabilidad en las muestras PS20 y PS40, al tener mayor rigidez el ecomortero. Una de las posibles causas es la reducción de la cantidad de yeso aportada al conglomerante, determinando una matriz de cohesión entre las partículas de escoria de menor tamaño. Sin embargo, esto provoca que el agua aportada a la mezcla sea absorbida por la escoria, ralentizando en primer lugar el proceso de fraguado, como ocurre en las muestras PS60 y PS80, aunque luego con el paso de los minutos esta cede parte de esa agua retenida, aumentando el tiempo de principio de fraguado.

### **7.3.3. Densidad en fresco**

Una de las características que influyen a la hora de trabajar los materiales es la densidad, ya que está relacionada con los materiales que componen nuestra muestra, así como el aire ocluido de la misma.

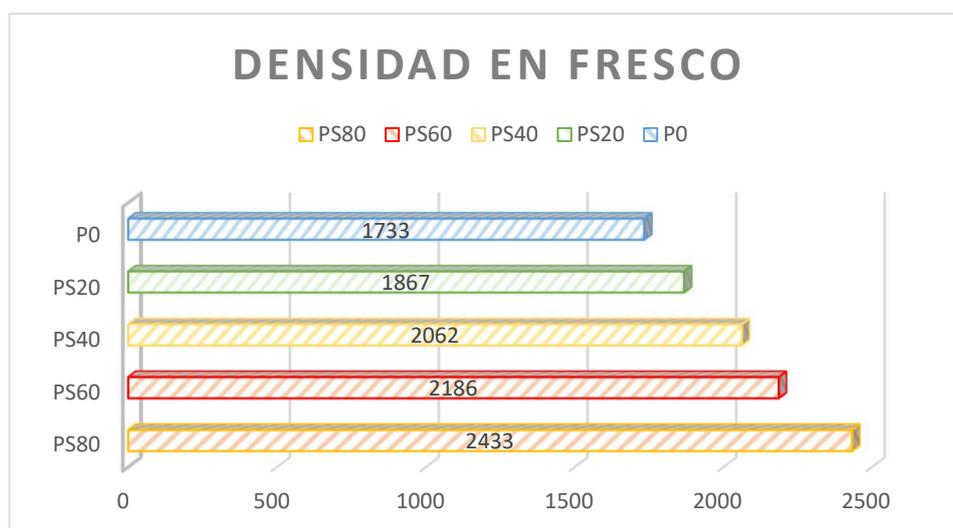
Con la relación peso/volumen de cada una de las muestras se puede obtener la densidad aparente que presentan. Para su determinación se aprovechan los registros de peso y volumen obtenidos en los ensayos realizados con el Cono de Vicat.

La densidad en estado fresco de los morteros diseñados se muestra en la Tabla 7.4. Como se puede observar, la densidad en estado fresco se incrementa progresivamente conforme aumenta el porcentaje de escoria negra EAF añadida, con relación al valor de la muestra de referencia.

Como se puede observar en la Gráfica 7.2, el incremento de la densidad en estado fresco es proporcional a la cantidad de escoria negra EAF añadida en las muestras en sustitución del yeso, debido en su mayor parte a que se ve reducida la cantidad de agua necesaria para conseguir la consistencia plástica de diseño.

Densidad en fresco			
	Muestra	Relación% Yeso/Escoria	Densidad en fresco (kg/m <sup>3</sup> )
Referencia	P0	100/0	1733
Series S	PS20	80/20	1867
	PS40	60/40	2062
	PS60	40/60	2186
	PS80	60/40	2433

Tabla 7.4. Densidad en fresco de las muestras.



Gráfica 7.2 Comparativa de las densidades en fresco.

#### 7.4. CARACTERIZACIÓN EN ESTADO ENDURECIDO

En este apartado se estudian las propiedades de los morteros diseñados con escoria negra de Horno Eléctrico de Arco EAF en estado endurecido. Para ello se moldea un número suficiente de probetas normalizadas, de tamaño y forma adecuados de acuerdo con la norma UNE-EN 13279-2/2014.

Una vez moldeadas, se mantendrán durante 7 días en la atmosfera del laboratorio a una temperatura ambiente de 24°C, con una humedad relativa

de  $50\pm 1\%$ , secándose a continuación hasta tener una masa constante a una temperatura de  $40^{\circ}\text{C}$ . posteriormente, se dejan reposar en un desecador hasta alcanzar la temperatura ambiente de laboratorio.

### 7.4.1. Densidad aparente en seco y retención de agua

El agua utilizada en la dosificación de las mezclas es un factor determinante en el estudio de la densidad aparente en estado seco ya que, en función de la cantidad de agua utilizada, presentaran mayor o menor volumen de poros en la masa debido a su evaporación durante el proceso de fraguado, como se puede ver en la Tabla 7.5.

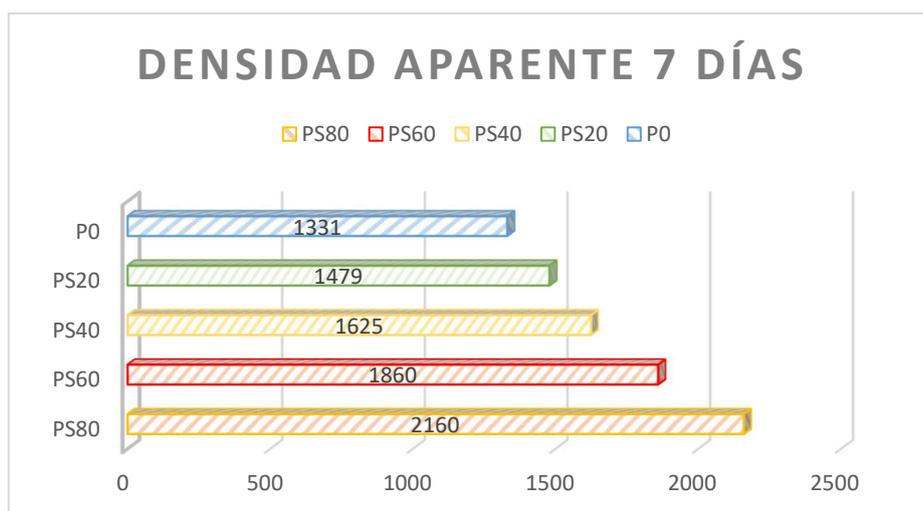
Densidad aparente				
	Muestra	Relación% Yeso/Escoria	Densidad aparente 7 días (kg/m <sup>3</sup> )	Densidad aparente 28 días (kg/m <sup>3</sup> )
Referencia	P0	100/0	1331	1325
Series S	PS20	80/20	1479	1490
	PS40	60/40	1625	1648
	PS60	40/60	1860	1879
	PS80	20/80	2160	2117

**Tabla 7.5. Densidad aparente a los 7 días y a los 28 días.**

La densidad aparente del material se determinará a partir de una serie de probetas prismáticas de  $(160 \times 40 \times 40) \text{ mm}^3$ , hallando la relación entre el peso y el volumen de las mismas a 7 y 28 días, una vez secadas las probetas. En primer lugar, se determina la densidad del material en el momento de su desmoldado, todavía en estado húmedo. Posteriormente, se determina la densidad después de su secado en una estufa a  $40\pm 2^{\circ}\text{C}$ .

En las Gráficas 7.3. y 7.4. se puede observar que la densidad aparente de las muestras diseñadas aumenta su valor con respecto al mortero de referencia, tanto a los 7 días como a los 28 días, proporcionalmente al incremento de escoria negra EAF aportada a las muestras.

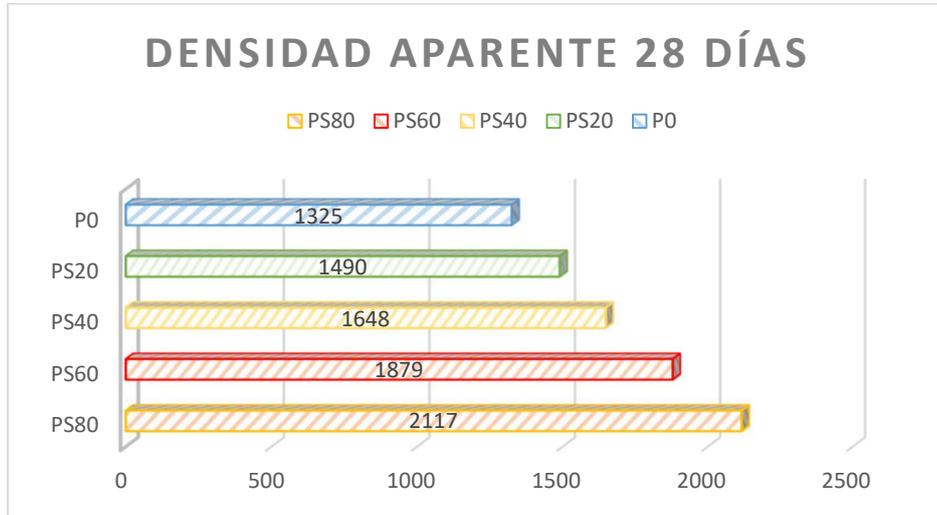
Esta variación en el valor de la densidad aparente está directamente relacionada con la cantidad de agua utilizada en la dosificación, siendo esta cada vez menor según más crece el porcentaje de escoria negra empleada, por lo que se produce una menor evaporación, con la consiguiente reducción del número de poros.



**Gráfica 7.3. Comparativa de las densidades aparentes a los 7 días.**

La incorporación de escoria negra en todas las muestras provoca un incremento en los parámetros de densidad con respecto a la muestra de referencia, tanto a los 7 días como a los 28 días, con valores muy similares en ambos, lo que implica una evaporación del agua de las muestras muy reducida en ese intervalo de tiempo, tal y como se puede comprobar en la Gráfica 7.4.

Teniendo en cuenta las características de los materiales empleados, los resultados obtenidos se consideran coherentes, ya que la escoria negra EAF tiene una densidad de en torno a  $3.64 \text{ g/cm}^3$ , frente a la densidad del yeso utilizado que es de  $2.32 \text{ g/cm}^3$ .



**Gráfica 7.4. Comparativa de las densidades aparentes a los 28 días.**

Una propiedad importante en los materiales es su capacidad de retener líquidos, bien en su interior o en su superficie, depositándose en las paredes externas que delimitan el material. Este fenómeno se conoce como absorción o capacidad de retención de agua. Es importante conocer el comportamiento de los ecomorteros para conocer su comportamiento de cara a su posible utilización en la edificación.

La capacidad de retención de agua del material se determina a partir de la siguiente ecuación y los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 7.6.:

$$\frac{d_{ah} - d_{as}}{d_{as}} \times 100$$

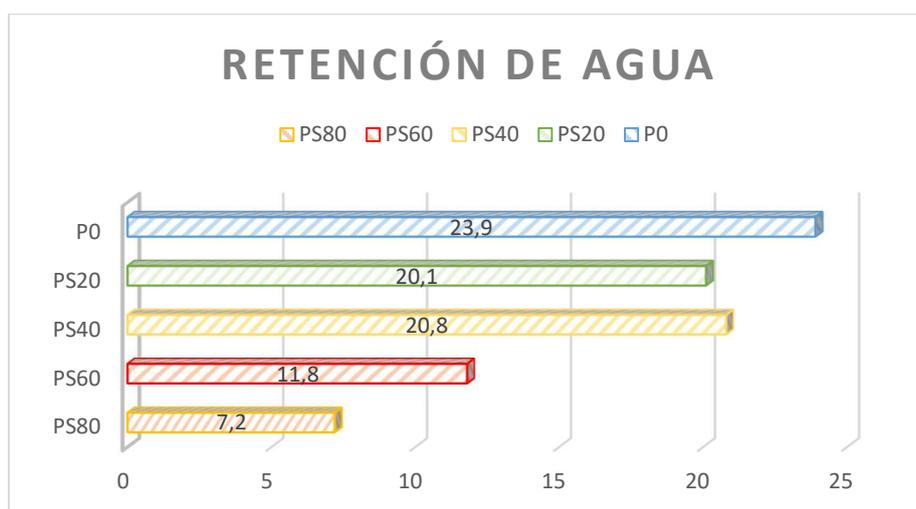
⇒

$d_{ah}$ : Densidad aparente húmeda al desmoldear  
 $d_{as}$ : Densidad aparente seca a 7 días

Retención de agua			
	Muestra	Relación % Yeso/LFS	Retención de agua %
Referencia	P0	100/0	23,9
Series S	PS20	80/20	20,1
	PS40	60/40	20,8
	PS60	40/60	11,8
	PS80	20/80	7,2

**Tabla 7.6. Capacidad de retención de agua % de las muestras.**

La retención de agua de las muestras va disminuyendo según se añade más cantidad de escoria negra EAF al conglomerante, debido en parte a que en las muestras PS60 y PS80 la cantidad de agua utilizada es menor. Esta disminución en los valores obtenidos también puede ser debida a que las partículas de las escorias negras son mayores que las del conglomerante, por lo que disponen de una superficie específica menor que requiere de una cantidad inferior de agua para conseguir un buen comportamiento plástico, como se observa en la Gráfica 7.5.



**Gráfica 7.5. Comparativa retención de agua %.**

### 7.4.2. Dureza superficial

Como se ha indicado en el estudio de los morteros diseñado con escoria blanca LF, es importante conocer la dureza superficial de los ecomorteros, ya que es un factor que permite conocer su comportamiento frente a agresiones externas de tipo mecánico, que pueden condicionar su durabilidad en el tiempo.

Para determinar la dureza superficial de los morteros diseñados se realiza el ensayo utilizando un durómetro. Este dispositivo está formado por una aguja que se proyecta sobre la superficie del material accionada mediante un engranaje manual. La proyección debe ser vertical y en varias zonas de la superficie de una probeta prismática de (160 x 40 x 40) mm<sup>3</sup>, hallándose la media de las medidas obtenidas, cinco por cada cara, descartando los valores que se desvíen de la media. La dureza se indica en unidades Shore C. Se trata de una escala que va del 0 al 100, donde se considera el 0 como el material más blando y el 100 como el material con mayor dureza.

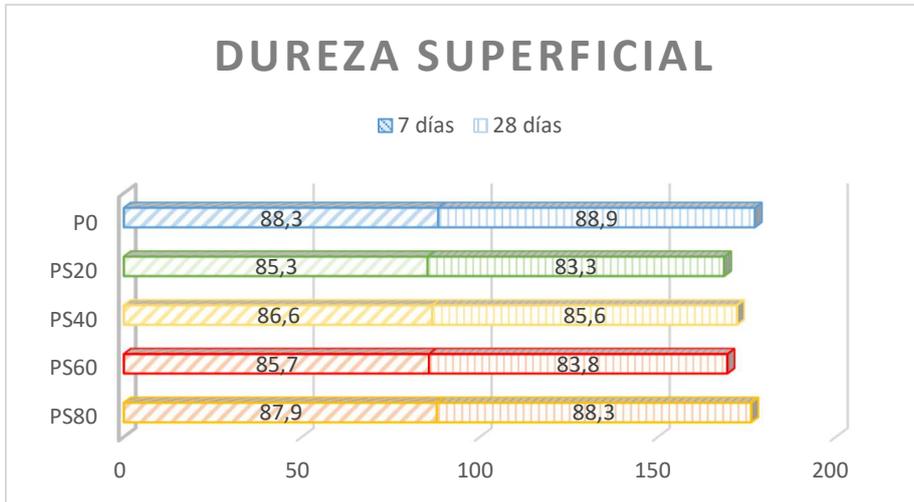
Dureza superficial				
	Muestra	Relación % Yeso/LFS	Dureza Shore C 7 días	Dureza Shore C 28 días
Referencia	P0	100/0	88,3	88,9
Series S	PS20	80/20	85,3	83,3
	PS40	60/40	86,6	85,6
	PS60	40/60	85,7	83,8
	PS80	60/40	87,9	88,3

**Tabla 7.7. Dureza superficial Shore C de las muestras.**

Los resultados obtenidos que se muestran en la Tabla 7.7, muestran unos valores muy similares en todas las series ensayadas, siendo la muestra de referencia la que presenta los registros más elevados de dureza, junto con la serie PS80 cuyos valores se aproximan mucho a estos.

De acuerdo con los resultados obtenidos, se puede afirmar que los morteros diseñados muestran, en todos los casos, un buen comportamiento a la dureza superficial, destacando la PS80 con valores muy similares a la

muestra de referencia, tanto a los 7 días como a los 28 días, como se muestra en la Gráfica 7.6.



Gráfica 7.6. Dureza superficial Shore C.

### 7.4.3. Resistencia mecánicas a flexión y compresión

Para determinar las resistencias mecánicas a flexión y compresión de los morteros diseñadas se moldean probetas prismáticas normalizadas de dimensiones (160 x 40 x 40) mm<sup>3</sup>.



Figura 7.5. Probetas normalizadas para los ensayos de resistencias mecánicas.

La resistencia mecánica a flexión se determinará aplicando una carga máxima (N) en el centro de la probeta apoyada en dos rodillos, con una separación de 10,7 mm, con una velocidad constante de  $20 \pm 1$  N/s.



**Figura 7.6. Probetas ensayo resistencia mecánica a flexión.**

La resistencia a compresión se obtiene al aplicar una carga a cada una de las mitades obtenidas en el ensayo de flexión, sobre una superficie de (40 x 40) mm<sup>2</sup> mediante la aplicación de una carga uniforme a una velocidad constante de  $100 \pm 10$  N/s, hasta conseguir la rotura de la probeta.



**Figura 7.7. Probetas ensayo resistencia mecánica a compresión.**

Para la realización de estos estudios se ha utilizado un dispositivo de carga conectado a un equipo de control digital, todo ello normalizado y realizado según se indica en la normativa de aplicación.

Los valores de las resistencias mecánicas, tanto a los 7 días como a los 28 días, se ven reducidos con respecto a la muestra de referencia según se aumenta el porcentaje de escoria negra EAF dosificada, como se observa en la Tabla 7.8.

Resistencias mecánicas					
	Muestra	Flexión 7 días (MPa)	Flexión 28 días (MPa)	Compresión 7 días (MPa)	Compresión 28 días (MPa)
<b>Ref.</b>	P0	4,7	3,5	12,0	14,3
<b>Series S</b>	PS20	3,6	3,7	9,2	9,0
	PS40	4,3	3,5	9,1	9,7
	PS60	3,2	2,9	7,4	7,2
	PS80	2,3	2,7	7,1	6,6

**Tabla 7.8. Resistencias mecánicas a flexión y compresión de las muestras.**

La disminución en los valores de la resistencia obtenidos se debe a que existe una menor proporción de hemidrato en el conglomerante (yeso + escoria negra EAF), lo que produce una menor agregación de las partículas al ser menos grueso el espesor de la matriz cohesiva<sup>49</sup>.

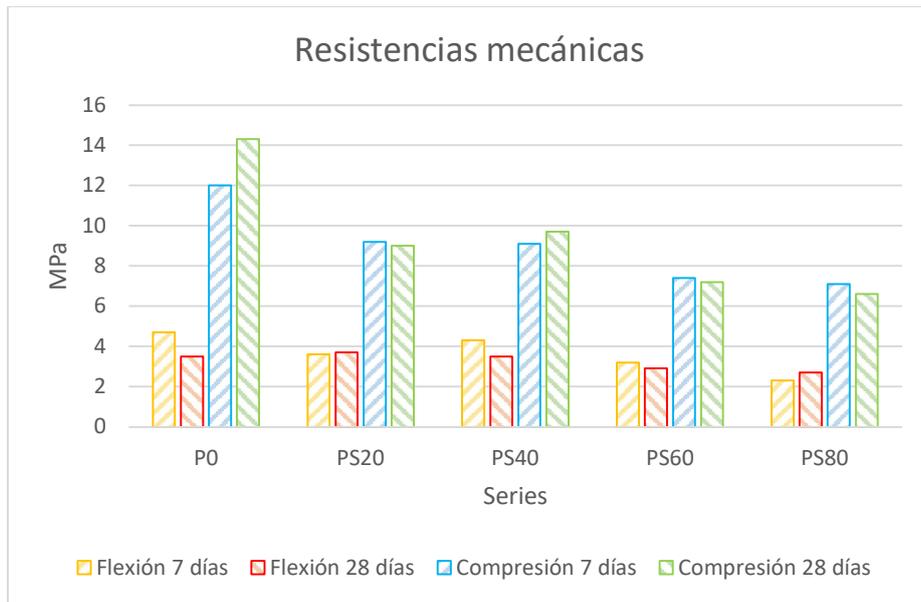
En todas las muestras se alcanza valores similares a flexión y compresión a los 7 días y a los 28 días, reduciéndose de forma progresiva según se incrementa la cantidad de escoria negra EAF aportada a cada serie.

Los valores obtenidos cumplen con los requerimientos mínimos estándar establecidos por la normativa UNE-EN 13279-2/2014, para su uso como recubrimientos en paramentos continuos o como morteros de mampostería, donde se exige un valor de al menos 1.0-2.0 MPa para la resistencia a flexión y 2.0-7.5 MPa de resistencia a compresión.

<sup>49</sup>Herrero S, Mayor P, Hernández-Olivares F. Influence of proportion and particle size gradation of rubber from end-of-life tires on mechanical, thermal and acoustic properties of plaster-rubber mortars. Mater Des 2013;47,633-42.

Teniendo en cuenta que la escoria negra EAF utilizada puede considerarse como un árido, los estudios se podrían orientar a su utilización como revestimientos de yeso o morteros de yeso.

Los resultados obtenidos en cada una de las mezclas indican que todas ellas alcanzan valores importantes de resistencia mecánica a flexión y compresión, como se puede comprobar en la Gráfica 7.7.



**Gráfica 7.7. Comparativa resistencias mecánicas a flexión y compresión.**

Los resultados indican que casi todas las mezclas cumplen los valores de resistencias mecánicas exigidos para materiales de construcción. No obstante, en las Series PS60 y PS80 se obtienen algunos registros por debajo de los exigidos, ya que son las muestras con mayor porcentaje de escoria utilizada.

Las mezclas que más se asemejan a los valores obtenidos en la muestra de referencia son las PS20 y PS40, y en función del uso previsto para el material se deberá estudiar con más detalle la cantidad de yeso que puede ser sustituido por la escoria negra EAF.

De acuerdo con los resultados obtenidos, se puede concluir que existe una correspondencia entre el comportamiento mecánico y la densidad aparente

de las mezclas en estado seco, disminuyendo la resistencia mecánica a medida que aumenta su densidad.

#### 7.4.4. Adherencia

Para conocer cómo afecta la inclusión de la escoria negra EAF en la adherencia de los morteros diseñados, es necesario analizar su comportamiento cuando son sometidos a esfuerzos de tracción.

Para determinar la adherencia de los morteros diseñados realizan de tracción para valorar la capacidad resistente de la unión mortero-soporte, en este caso de naturaleza cerámica.

Una vez mezclados los componentes del mortero, éste se dispone sobre la superficie de un material cerámico. Utilizando un útil apropiado a tal fin se practican cortes sobre la superficie del material de forma cilíndrica y con una altura igual al espesor de la capa del revestimiento. Una vez fraguado y endurecido el mortero se pegan unos discos metálicos, también cilíndricos, que servirán de útil para favorecer la aplicación de los esfuerzos de tracción. Mediante un equipo de tracción se procede a traccionar el conjunto disco metálico-mortero con una carga perpendicular y constante, con una cadencia de entre  $0,003 \text{ N/mm}^2$  y  $0,1 \text{ N/mm}^2$  por segundo, registrando la lectura de la carga máxima aplicada mediante un manómetro.



**Figura 7.8. Fases del ensayo de adherencia en las muestras.**

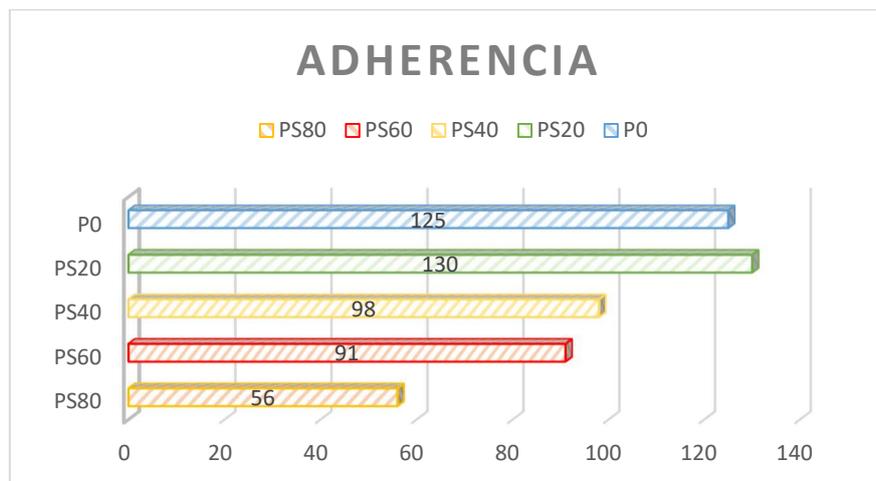
Los resultados del ensayo de adherencia sobre soporte cerámico ligeramente humectado, realizados sobre 7 muestras de cada serie, se muestran en la Tabla 7.9.

Adherencia		
	Muestra	Adherencia a los 7 días (Kg/cm <sup>2</sup> )
Referencia	P0	125
Series S	PS20	130
	PS40	98
	PS60	91
	PS80	56

**Tabla 7.9. Adherencia de las muestras.**

Analizando los resultados obtenidos se puede afirmar que cuanto mayor es la cantidad de escoria negra EAF añadida a las muestras, menor es la capacidad adherente del nuevo material.

Cabe destacar que en la muestra PS80, que lleva la mayor cantidad de escoria negra, se produce una disminución en los parámetros de adherencia de hasta un 55%, dato bastante significativo como se observa en la Gráfica 7.8.



**Gráfica 7.8. Comparativa adherencia sobre cerámico.**

La representación gráfica de los resultados obtenidos muestra que la serie PS20 tiene unos valores de adherencia idénticos a los de la muestra de referencia, siendo esta la proporción más adecuada en esta propiedad, mientras que las mezclas PS40 y PS60 presentan unos valores medios muy semejantes entre ambos.

#### **7.4.5. Permeabilidad al vapor de agua**

Para conocer la Permeabilidad al Vapor de Agua que presenta un material se debe determinar su capacidad para eliminar el agua de condensación interna precipitada, como consecuencia de las tensiones de tensiones de temperatura producidas entre las caras de un revestimiento, permitiendo la transpiración de los paramentos que conforman un cerramiento.

Se trata de una propiedad importante de los materiales, ya que, si estos no son capaces de eliminar el vapor de agua que circula por sus poros, podría precipitar en el interior del ecomortero, afectando a sus propiedades y a su durabilidad.

Para analizar la Permeabilidad al Vapor de Agua de las mezclas diseñadas se sigue el procedimiento de análisis de la norma<sup>50</sup> UNE-EN 1015-19/A1:1999.

Para ello se fabricarán tres probetas cilíndricas de 16cm de diámetro y 1,5cm de altura, sobre un soporte de hormigón, siguiendo el procedimiento indicado en la norma.

Como se puede observar en la Fig. 7.9, una vez desecadas las probetas se disponen en los recipientes de ensayo a modo de tapa, en los que previamente se vierte una disolución saturada de nitrato de potasio ( $KNO_3$ ), dejando una cámara de aire entre la disolución y la superficie inferior de la probeta de 10mm, consiguiendo la estanqueidad entre la probeta y el molde mediante el sellado de la junta con mástico. El conjunto deberá mantenerse en un recinto con una temperatura ambiente de  $20\pm 2^\circ C$  y una humedad relativa del  $50\pm 5\%$ .

---

<sup>50</sup>UNE-EN 1015-19:1999/A1. Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 19: Determinación de la permeabilidad al vapor de agua de los morteros endurecidos de revoco y enlucido.



**Figura 7.9. Probetas cilíndricas para el ensayo de permeabilidad.**

Posteriormente, se realizarán pesadas consecutivas del conjunto a intervalos de tiempo hasta conseguir una reducción de peso lineal, con un mínimo de 10 días, ya que se supone que las condiciones son estables. Se registran las pérdidas de masa y representan en función del tiempo.

Con los valores registrados se calculará la Permeanza en  $\text{Kg/m}^2\cdot\text{s}\cdot\text{Pa}$ , que es el flujo de vapor de agua que atraviesa la probeta. Si se multiplica el valor de la Permeanza por el espesor de la probeta, se obtiene la Permeabilidad al Vapor de Agua del material.

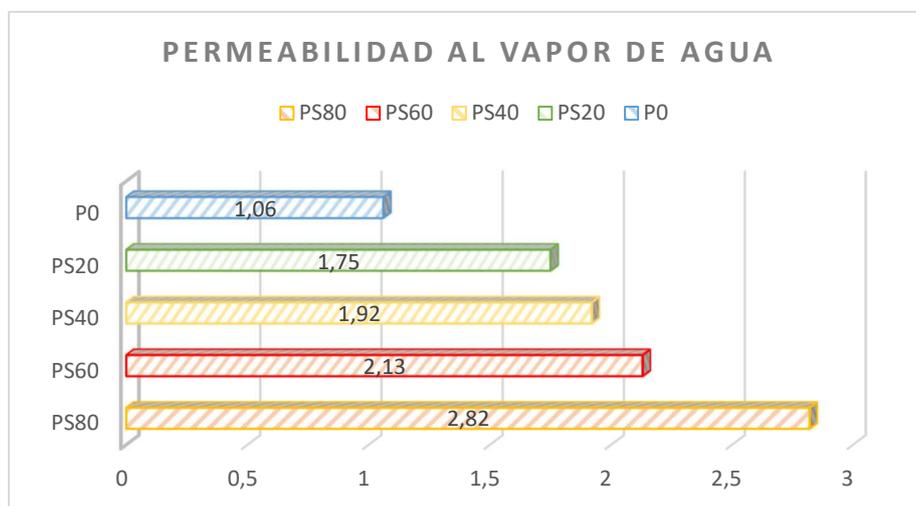
Este valor de la Permeabilidad al Vapor de Agua de cada mezcla se obtiene calculando el valor medio de las probetas ensayadas. En la Tabla 7.10 se muestran los resultados obtenidos.

La serie de referencia P0 presenta unos valores de Permeabilidad al Vapor de Agua bajos, debido a que esta solo contiene yeso, siendo este un material muy cerrado que no facilita el flujo de vapor de agua a través de su red capilar.

Permeabilidad al vapor de agua		
	Muestra	Permeabilidad al vapor de agua (Kg/m*s*Pa)*10 <sup>11</sup>
Referencia	P0	1,06
Series S	PS20	1,75
	PS40	1,92
	PS60	2,13
	PS80	2,82

Tabla 7.10. Permeabilidad al vapor de agua de las muestras.

Según se va incrementando el porcentaje de escoria negra EAF aportada a la dosificación, se produce una mejora de los valores de la Permeabilidad al Vapor de Agua de forma proporcional, debido a la reducción de la cantidad de yeso dosificada, lo que facilita el flujo del vapor de agua, como se puede observar en el Gráfico 7.9.



Gráfica 7.9. Comparativa permeabilidad al vapor de agua.

Todos los valores obtenidos presentan parámetros aceptables con respecto a la Permeabilidad al Vapor de Agua, mejorando todas las muestras los resultados respecto de la muestra de referencia. Cabe destacar que cuanto

mayor es el porcentaje de escoria negra EAF aportada en sustitución del yeso, mejores registros se obtienen, destacando frente al resto el valor de la Permeabilidad al Vapor de Agua de la dosificación PS80. Esto es debido a que cuando se produce una disminución de la cantidad de yeso, que presenta una red capilar cerrada y no favorece el paso del vapor de agua, las escorias negras incrementan de forma progresiva la red capilar, favoreciendo la permeabilidad cuanto mayor es su presencia en las mezclas.

## **7.5. CONCLUSIONES**

De acuerdo con los datos obtenidos en los diversos ensayos realizados en el estudio del empleo de escorias negras EAF en el diseño de morteros de yeso para albañilería, se puede concluir que los resultados son altamente satisfactorios, obteniendo materiales alternativos a los tradicionales viables desde el punto de vista técnico, además de contribuir a la reutilización de residuos, una vez valorizados como materia prima.

De los valores obtenidos en los ensayos se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- La cantidad de agua de amasado necesaria para la dosificación de las mezclas diseñadas es inversamente proporcional a la cantidad de escoria negra EAF añadida, disminuyendo conforme se incrementa el porcentaje de escoria negra EAF utilizada.
- El tiempo de fraguado se ve reducido ligeramente con la incorporación de porcentajes bajos de escoria, ya que cuando dosifica por encima del 40%, el tiempo de fraguado comienza a crecer.
- Las escorias negras presentan una absorción en la cantidad de agua menor que la que se observa en el conglomerante yeso, por lo que se produce una pérdida menor de agua en el proceso de fraguado, favoreciendo de esta forma un curado más uniforme, lo que evita la aparición de fisuras por ahogamiento.
- En términos de Dureza Shore C, en todas las dosificaciones analizadas se obtienen registros muy similares a los de la muestra de referencia, manteniéndose ten todos los casos constantes.
- En los ensayos de adherencia se observa una rotura de las probetas por cohesión, aunque la adición de escorias negras EAF en las

muestras provoca una disminución de esta propiedad proporcionalmente a la cantidad de escoria negra añadida. Esta circunstancia determina que las series que contienen escorias negras EAF muestren una buena adherencia y que el fallo por rotura se produzca en la interfase yeso-escoria del elemento, y no entre la superficie del soporte cerámico y el ecomortero.

- Pese a que se produce una disminución en los valores de las resistencias mecánicas con la adición de escorias negras, todas las dosificaciones muestran un buen comportamiento tanto a flexión como a compresión, suficientes para considerar su utilización en trabajos de albañilería, incluidas las series que contienen porcentajes superiores al 60% de escoria negra incorporada, pese a que ello implique una reducción de los parámetros de las resistencias mecánicas a tener en cuenta.
- Las series con adiciones de escorias negras EAF presentan unas características mejoradas de Permeabilidad al Vapor de Agua con respecto a la muestra de referencia, produciéndose un incremento proporcional de estos valores en función de la cantidad de escoria negra aportada a la muestra. Debido a la mayor presencia de residuo en el conglomerante yeso-escoria, se produce un incremento en el tamaño de los poros de la muestra, pudiéndose todo ello asociar a una mayor Permeabilidad al Vapor de Agua, al permitir el desplazamiento del vapor de agua a su través con mayor facilidad, aspecto a tener en cuenta para las condensaciones.
- Todos los parámetros analizados en cada una de las diferentes dosificaciones muestran que la dosificación de escoria negra EAF a las mezclas y su interacción con el hemidrato es positiva, al igual que su resistencia térmica, ya que al haber una mayor proporción del residuo se produce una pérdida menor de masa.

Analizando todas las conclusiones anteriores, se puede afirmar que la utilización de escoria negra en sustitución del hemidrato, para la elaboración de ecomorteros de yeso de albañilería, es una opción viable, ya que muestran propiedades equivalentes en las de los morteros tradicionales, con registros que cumplen con las exigencias y prescripciones de la normativa de aplicación.





## **CAPÍTULO VIII**

**Fabricación y caracterización de placas de  
yeso con escoria blanca**



## 8. FABRICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE PLACAS DE YESO CON ESCORIA BLANCA

En este apartado se estudian y analizan las propiedades físicas y mecánicas de placas prefabricadas de yeso laminado, fabricadas a partir de mezclas que contienen proporciones de escoria blanca LF en sustitución de parte del conglomerante, para su empleo en la construcción.

Debido a sus posibles usos en edificación, se analizará también el comportamiento térmico y la reacción frente al fuego de las mezclas diseñadas, en función de sus diferentes dosificaciones.

### 8.1. INTRODUCCIÓN

Las placas de yeso laminado son elementos que se emplean normalmente como productos de revestimiento de muros interiores o techos, debido a que presentan buenas propiedades térmicas y mecánicas, pero sobre todo por su buen comportamiento frente al fuego, ya que su composición química y los procesos de deshidratación endotérmica a elevadas temperaturas<sup>51</sup> favorecen su resistencia.

La inclusión de escorias blancas LF en sustitución de parte del conglomerante favorece sus propiedades a largo plazo, una vez que se inactiva su potencial comportamiento expansivo inicial<sup>52</sup>.

El empleo de estos materiales contribuye a reducir los costes ambientales que generan como residuo, a la vez que contribuyen a reducir también el precio final de los productos elaborados<sup>53</sup>.

Por todo ello, se en este apartado de la Tesis Doctoral se analizará su utilización en materiales prefabricados a base de yeso, tanto para su empleo

---

<sup>51</sup>Fire behavior of regular and latent heat storage gypsum boards. D. A. Kontogeorgos, I. D. Mandilaras and M. A. Founti. *Fire Mater.* 2015; 39:507–517. DOI: 10.1002/fam.2246

<sup>52</sup>Rodríguez A, Gutierrez-Gonzalez S, Prieto M.I, Cobo A, Calderón V. Analysis of long-term corrosion behavior in mortars containing recycled ladle furnace slag using computerized tomography and SEM. *Materials Corrosion*. Volume 66, Issue 3, pages 199–205, 2015. doi: 10.1002/maco.201407697

<sup>53</sup>A. Rodríguez, S. Gutiérrez-González, M. Horgnies, V. Calderón. Design and properties of plaster mortars manufactured with ladle furnace slag. *Materials and Design* 52 (2013)

*in situ*, como para uso en divisiones particiones interiores, analizando factores como la conductividad térmica, los cambios de las propiedades físicas y químicas con el aumento de la temperatura y su reacción frente al fuego.

Como la utilización de placas de yeso en situación de prestación una vez colocada en obra pueden verse afectadas por daños mecánicos producidos por golpes fortuitos, además de realizar su caracterización física y mecánica, también se realiza un estudio de su resistencia al impacto y fuerza a flexión, de acuerdo con la normativa de aplicación.

También se llevará a cabo el proceso de descomposición a nivel micro y macroscópico mediante el Análisis Termogravimétrico y de Reacción al Fuego, con el objetivo de conocer cómo influye la escoria añadida en su comportamiento.

## **8.2. CARACTERIZACIÓN**

Tanto la elaboración de las probetas necesarias para realizar los ensayos, como para fabricación de las placas de yeso, se utilizarán las materias primas analizadas en los apartados anteriores.

El hemidrato empleado será un Yeso Tipo B1 considerado yeso de construcción, formado por al menos un 50% de sulfato cálcico como principal activo y no conteniendo más de un 5% de hidróxido de calcio, de acuerdo con lo dispuesto en la norma EN 13279-1<sup>54</sup>.

El análisis de este conglomerante mediante Difracción de Rayos X muestra en su composición un contenido muy elevado de hemidrato (95,3%), una concentración media-baja de anhídrita (2,05%) y una concentración baja de sulfato cálcico dihidratado (0,35%), cuarzo (2,10%), calcio (0,05%) y magnesio (0,15%), con una densidad real de 2650 kg/m<sup>3</sup>.

Como adición se utilizan escorias blancas de Horno Cuchara LFS (Ladle Furnace Slag), con una densidad real de 2860 kg/m<sup>3</sup> y una alta concentración de silicatos, aluminatos y magnesio combinados con óxido de cal, mientras que la concentración de componentes minoritarios no es significativa.

---

<sup>54</sup>EN 13279-1:2009 Yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción. Parte 1: Definiciones y especificaciones.

Los resultados obtenidos mediante el Microscópico Electrónico de Barrido (SEM) muestran que las escorias están disgregadas en partículas con un tamaño comprendido ente 5 y 60  $\mu\text{m}$ , sin formación cristalina y contienen proporciones variables de silicatos y aluminatos cálcicos hidratados con presencia de cal y periclasa, totalmente hidratas en forma de portlandita y brucita.

Para la elaboración de este tipo de muestras se agregará un aditivo plastificante de la marca Sika®, concretamente SikaLatex, que mejora la unión y reduce la tensión superficial entre la escoria blanca LF y el hemihidrato. Este aditivo se considera como un componente más añadido a la masa total de yeso más escoria.

Todas las dosificaciones deberán tener una adecuada trabajabilidad, por lo que las mezclas de yeso y escoria blanca se realizarán con la suficiente cantidad de agua para asegurar este parámetro, teniendo en cuenta que la cantidad de agua empleada será un dato clave que condiciona el comportamiento del material cuando se expone frente al fuego.

Los valores adecuados de trabajabilidad y consistencia plástica de las muestras se consiguen obteniendo en la mesa de sacudidas un diámetro de escurrimiento de  $165\pm 5$  mm.

Los estudios y análisis desarrollados en este apartado se realizarán sobre diferentes dosificaciones yeso/escoria blanca LF, en la cuales se sustituirá parte del yeso por distintos porcentajes de escoria blanca (20%, 40%, 60%, 80% en peso) y a las que se añadirá el aditivo plastificante SikaLatex en un porcentaje del 0,8% con respecto al peso del yeso dosificado.

En la Tabla 8.1 se muestran las cantidades de yeso, escoria, agua de amasado y aditivo de las muestras correspondientes a las distintas dosificaciones diseñadas.

Para su identificación se adopta la siguiente designación: PB (placa de yeso), PBS (placa de yeso con escoria blanca), PBSL (placa de yeso con escoria blanca y aditivo), seguida del porcentaje de sustitución de yeso por escoria.

Para los ensayos de caracterización se fabrican 6 probetas de cada dosificación, con dimensión nominal de  $(300 \times 400 \times 15)$  mm<sup>3</sup>, de acuerdo con lo especificado en la norma EN 520:2005+A1<sup>55</sup>. Las probetas se

---

<sup>55</sup>EN 520:2005+A1 (2010) Placas de yeso laminado. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo.

someten a un proceso de curado con temperatura ambiente de 20°C y a una humedad relativa del 50% durante 7 días. Posteriormente se secan a una temperatura de 40°C hasta adquirir una masa constante y, por último, se estabilizan a temperatura ambiente antes de realizar los ensayos.

Las probetas de ensayo no van a disponer de un revestimiento superficial de papel, tal y como llevan las placas de yeso laminado industrial, debido a su disposición en el laboratorio es dificultosa y complica la investigación, por lo que se decide realizar el estudio solo sobre el núcleo de yeso, sin considerar, como se ha indicado, el revestimiento de papel.

Dosificaciones y propiedades físicas								
	Muestra	Yeso/ Escoria (%)	Yeso (g)	Escoria (g)	Agua (g)	Aditivo (%)	a/c	Densidad seca (kg/m <sup>3</sup> )
<b>Ref.</b>	PB0	100/0	3000	0	1410	-	0,47	1415
<b>PB+ Escoria</b>	PBS20	80/20	2400	600	1200	-	0,40	1504
	PBS40	60/40	1800	1200	1170	-	0,39	1633
	PBS60	40/60	1200	1800	1170	-	0,39	1833
	PBS80	20/80	600	2400	1170	-	0,39	2010
<b>PB+ Escoria + Aditivo</b>	PBS20L	80/20	2400	600	1200	0,8	0,40	1531
	PBS40L	60/40	1800	1200	1140	0,8	0,38	1591
	PBS60L	40/60	1200	1800	1140	0,8	0,38	1662
	PBS80L	20/80	600	2400	1140	0,8	0,38	1780

**Tabla 8.1. Dosificaciones y propiedades físicas de las muestras para las placas de yeso.**

Para la comparación y la elaboración de conclusiones con los resultados obtenidos en los ensayos de caracterización, se realizarán estos mismos análisis en placas de yeso sin adición de escoria blancas, estableciéndose referencias comparativas entre ambas.

Para comprobar cómo reaccionan y que resistencias presentan estos materiales frente al fuego, se realizarán una serie de probetas de acuerdo

con lo especificado en la norma EN ISO 1182<sup>56</sup>, todas ellas de forma cilíndrica, con un volumen de  $76\pm 8$  cm<sup>3</sup>, un diámetro de  $45\pm 2$  mm y una altura de  $50\pm 3$  mm.

Hay que tener en cuenta que todas estas probetas tienen que prepararse y acondicionarse según el procedimiento indicado en la norma EN 13238<sup>57</sup>, que indica que las probetas previamente a ser ensayadas deben mantenerse a una temperatura de  $23\pm 2$ °C y a una humedad relativa del  $50\pm 5\%$ , durante 144 horas, pudiendo circular el aire alrededor de cada probeta de forma individual durante su acondicionamiento.

### **8.3. PROCESO EXPERIMENTAL**

Todos los ensayos que se van a realizar sobre las placas de yeso, se llevarán a cabo cumpliendo todas especificaciones técnicas contenidas en la norma EN 520:2005+A1, salvo los estudios relacionados para determinar su reacción al fuego ya que, como se ha indicado, siguen una normativa específica.

Las dosificaciones serán analizadas validando sus propiedades en, al menos, 6 ensayos en cada una, superando los estándares internacionales que solo requieren 3 ensayos, buscando una reproducibilidad de los resultados de las series de entorno al 90%, validando de esta forma el procedimiento de estudio.

#### **8.3.1. Densidad**

La densidad de las placas de yeso con adición de escorias blancas en estado seco se determina a través de la masa media y las dimensiones de la pieza ensayada. Para ello, las placas se acondicionan previamente en estufa de secado hasta obtener una masa constante a los 40°C, mediante pesadas sucesivas, con una precisión de 0,1 g. Se medirá la anchura de la placa tomando como referencia tres puntos separados de su longitud y, de igual

---

<sup>56</sup>EN ISO 1182:2010 Ensayos de reacción al fuego de productos. Ensayo de no combustibilidad.

<sup>57</sup>EN 13238:2011 Ensayos de reacción al fuego para productos de construcción. Procedimiento de acondicionamiento y reglas generales para la selección de sustratos.

forma, se medirá su longitud considerando tres puntos situados a lo largo de su anchura. La medición del espesor de las placas debe realizarse en seis puntos situados cerca de uno de sus bordes transversales.

### **8.3.2. Absorción de agua**

Para conocer el valor de absorción de agua que presentan las placas de yeso, se obtiene el porcentaje medio de aumento de masa de cada una de las piezas ensayadas sumergidas en un baño de agua a 23°C, cubriéndolas con una lámina de agua de entre 25 mm y 35 mm, durante 2 horas. Cada probeta debe colocarse en posición horizontal sin que apoye en el fondo del recipiente.

### **8.3.3. Resistencia a flexión**

La resistencia a flexión de las placas de yeso se determina mediante la obtención de la carga de rotura a flexión. Para ello se desecará previamente la probeta hasta masa constante a una temperatura de 40°C y se llevará a cabo el ensayo antes de que transcurran 10 min después de extraer la probeta de la estufa.

Las placas/probeta, de dimensiones (400 x 300 x 15) mm<sup>3</sup>, se disponen sobre dos apoyos cilíndricos paralelos con una separación entre ejes de 350±1 mm, aplicando la carga de forma controlada a una velocidad de 250±125 N/min en el centro del vano, de forma paralela a los apoyos, por medio de un rodillo cilíndrico, hasta que se produzca la rotura.

### **8.3.4. Resistencia al impacto**

El valor de la resistencia al impacto se determina de acuerdo con el procedimiento descrito en la norma UNE EN 520, determinando la huella superficial causada por el impacto de una bola de acero de 50 mm de diámetro y 510±10 g peso, que se deja caer desde una distancia vertical de 500±5 mm. A continuación, se mide el diámetro de la huella proyectada sobre la placa de yeso, obteniéndose el resultado final de cada dosificación como media de todos los valores obtenidos en 6 muestras ensayadas.

### **8.3.5. Dureza Shore C**

La dureza Shore C determina la dureza superficial que muestran las placas de yeso con escoria al medirse la huella practicada con un Durómetro Shore C, que aplica una fuerza sobre las caras de las probetas de forma vertical, con unos valores de referencia de 0 (más blanda) a 100 (más dura).

### **8.3.6. Microscópico Electrónico de Barrido**

Para la realización de este ensayo se utilizará el Microscopio Electrónico de Barrido SEM, recubriendo las muestras con fibra de carbono para mejorar la conductividad, completándose el análisis de dispersión de energía de Rayos X empleando una metodología de mapeo de los elementos específicos, como el calcio, silicio, aluminio, magnesio, azufre y oxígeno, que componen la matriz del yeso o las adiciones de escoria blanca LF.

### **8.3.7. Termogravimetría**

Se obtendrán los datos resultantes del Análisis Termogravimétrico TGA en una atmósfera de nitrógeno mediante Mettler-Toledo TGA/SBTA851 analizando 15mg de muestra a una velocidad de barrido de 10°C/min de 100°C a 800°C.

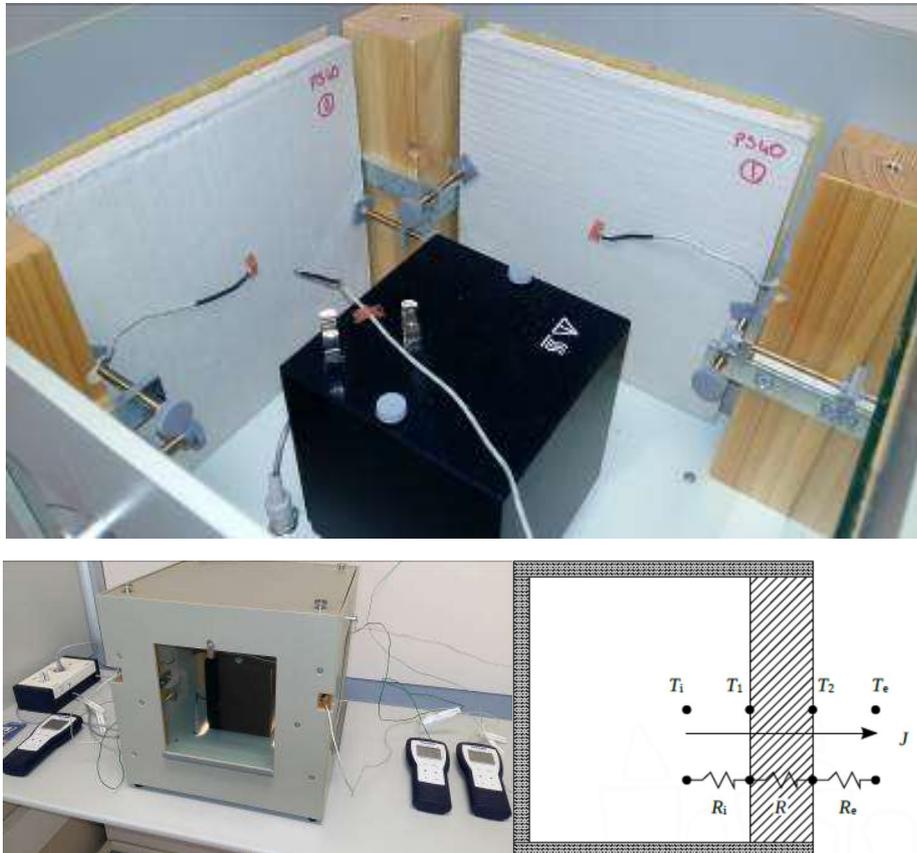
### **8.3.8. Comportamiento térmico**

Para conocer el comportamiento de las placas de yeso con escoria blanca LF diseñadas, se moldean probetas de 15 mm de espesor y 0.04 m<sup>2</sup> de superficie.

Para ello se determina el Coeficiente Total de Transmisión Térmica y el Coeficiente de Convección, mediante el Método del Estado Estacionario, midiendo la caída de temperaturas en función de la resistencia térmica.

Para realizar este ensayo, se conecta una lámpara que calienta el recinto interior del equipo de ensayo hasta que se alcanza el estado estacionario.

En la Figura 8.1 se muestra la disposición de las probetas en el equipo con el que se lleva a cabo el ensayo.



**Figura 8.1. Ensayo comportamiento térmico en dos caras de placa.**

Una vez dispuestos los elementos de medida del equipo para monitorizar el ensayo, se anotan las temperaturas  $T_i$ ,  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_e$  y se realizan los siguientes cálculos:

- Flujo de calor  $J$  según la expresión, donde  $h_i$  es el coeficiente de transferencia de calor por convección aire-pared y  $S$  la superficie del material.

$$J = h_i S (T_i - T_1)$$

- Conductividad térmica del material según la expresión, donde  $k$  es la conductividad térmica del material y  $L$  el espesor del material.

$$J = kS \frac{(T_2 - T_1)}{L}$$

- Coeficiente de convección pared-aire según la expresión, donde  $h_e$  es el Coeficiente de Transferencia de Calor por Convección pared-aire.

$$J = h_e S (T_2 - T_e)$$

- Considerando que en el estado estacionario verifica que todos los flujos son iguales, se calcula la Resistencia Térmica al Flujo de Calor por Convección, por Conducción y la Resistencia Total utilizando las siguientes expresiones:

- Resistencia al flujo de calor aire-pared por convección.

$$R_i = \frac{1}{h_i S}$$

- Resistencia al flujo de calor por conducción.

$$R = \frac{L}{kS}$$

- Resistencia al flujo de calor pared-aire por convección.

$$R_e = \frac{1}{h_e S}$$

- Resistencia total.

$$R_t = R^1 + R + R_e$$

### **8.3.9. Calor bruto de combustión. Valor calorífico**

Para llevar a cabo este ensayo se seguirán las indicaciones de la norma UNE EN ISO 1716<sup>58</sup>, determinando el valor absoluto del calor de combustión utilizando un calorímetro IKA C5000, calibrado previamente para garantizar la precisión de los valores, y calculando los resultados obtenidos según los requisitos establecidos por la norma para productos homogéneos y no homogéneos.

Para realizar este ensayo, se tomará una muestra de masa específica para quemarla por combustión de ácido benzoico, en condiciones estandarizadas, a volumen constante, en una atmósfera de oxígeno y con un calorímetro de bomba calibrado certificado.

El calor de combustión surgido en estas condiciones se calculará sobre la base del aumento de temperatura observado, teniendo en cuenta la pérdida de calor y el calor latente por la vaporización del agua.

Se deberá medir el poder calorífico de la muestra más desfavorable, al menos cinco veces, en una cantidad mínima de muestra molida de 50 g cada vez. Al utilizar un equipo automático, se obtendrá el poder calorífico superior directamente como resultado del ensayo, expresado en MJ/kg.

Si al realizar este ensayo se obtienen valores de calor de combustión de las muestras correspondientes a la Clase A, será necesario realizar ensayos adicionales según la norma UNE EN ISO 1182, con el objetivo de verificar la clasificación del material ensayado.

### **8.3.10. Ensayos de no combustibilidad**

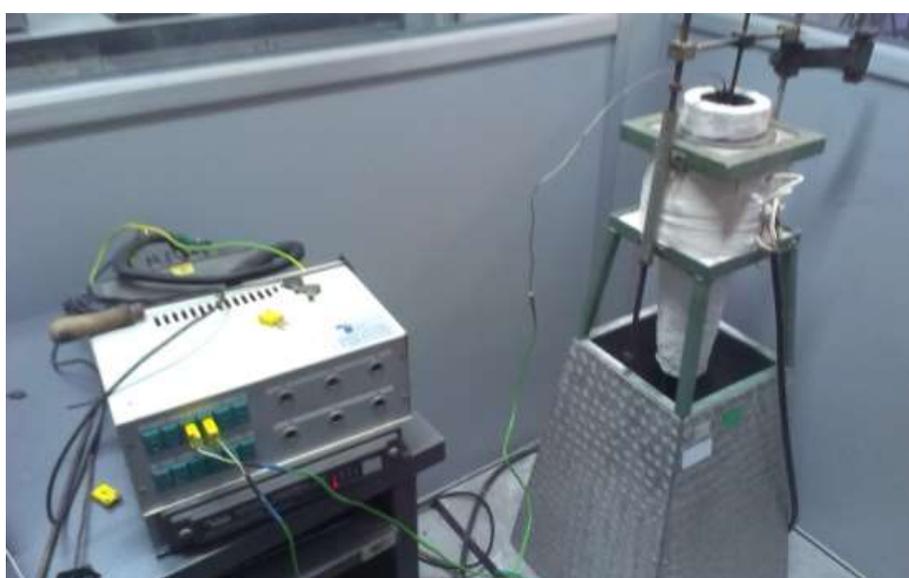
Para realizar este ensayo se ha seguido en el procedimiento de análisis establecido en la norma UNE EN ISO 1182. Por ello se utilizará un equipo

---

<sup>58</sup>EN ISO 1716:2011 Ensayos de reacción al fuego de productos. Determinación del calor bruto de combustión (valor calorífico).

de ensayo formado por un horno vertical, con el objetivo de evaluar el comportamiento de las muestras a altas temperaturas.

El horno vertical empleado tiene un espacio cilíndrico interior de 75 mm de diámetro y 150 mm de altura, en el que se introducen y disponen las muestras a ensayar. Su temperatura interior se medirá mediante un par termoeléctrico colocado a media altura y a 10 mm de la pared, calibrando previamente el horno. En la Figura 8.2 se puede observar la composición de los equipos de ensayo.



**Figura 8.2. Realización del ensayo de no combustibilidad.**

La muestra de ensayo tiene forma cilíndrica, con un diámetro de 45 mm y una altura de 50 mm, tal y como se muestra en la Figura 8.3.



**Figura 8.3. Detalles de las muestras y colocación en el horno.**

Una vez moldeada la muestra, y antes de que esta se enfríe, se introducirá en el horno un par termoeléctrico a través del eje de simetría, de manera que la punta de este se ubique en el centro geométrico de la muestra con forma de cilindro. De igual forma, se deberá colocar otro par termoeléctrico en contacto con la superficie de la muestra y diametralmente opuesto al dispuesto en el horno.

Tanto el horno como los sensores de superficie se deben proteger con campanas de acero inoxidable. Durante el ensayo, la temperatura del horno se elevará desde la temperatura ambiente hasta los 750°C en un tiempo de 2 horas, manteniendo esta temperatura durante otros 60 min.

Se tomarán los valores de la temperatura tanto en la superficie como en el centro de la muestra cada 10 segundos, quedando de esta forma registrados. Los valores de la combustión potencial de las muestras ensayadas se registrarán cuando las temperaturas alcancen valores elevados y/o las llamas se hagan visibles. Una vez finalizado el ensayo, se determinará la pérdida de masa de la muestra ensayada.

#### **8.4. RESULTADOS PROCESO EXPERIMENTAL**

Analizando las propiedades físicas básicas, se observan que los resultados obtenidos corroboran el comportamiento de los conglomerados de yeso con adición de escoria blanca LF, conforme se incrementa la cantidad de escoria añadida.

La densidad de las placas de yeso con escoria blanca LF se incrementa conforme se incorpora más cantidades de este residuo respecto a la muestra de referencia, produciéndose hasta un 40% más de incremento en el peso para la muestra PBS80 (sustitución de yeso por escoria blanca del 80%), observándose una reducción del 25% para la muestra PBS80L, es decir, para la misma muestra, pero con aditivo plastificante.

Aunque la resistencia a flexión de las placas de yeso con escoria blanca se ve reducida a medida que disminuye la cantidad de yeso contenido en la muestra, todos los registros se encuentran por encima de los 100 N<sup>59</sup>, valor

---

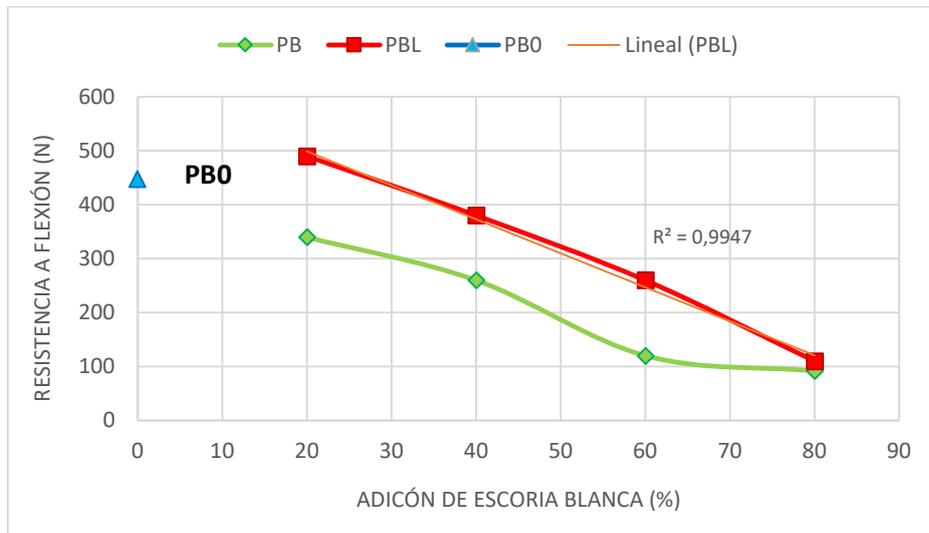
<sup>59</sup>Dalmay P, Smith A, Chotard T, Sahay-Turner P, Gloaguen V, Krausz P (2010) Properties of cellulosic fibre reinforced plaster: influence of hemp or flax fibres on the properties of set gypsum. J Master Sci 45:793-803.

mínimo establecido por la norma, tal y como se puede comprobar en la Tabla 8.2.

Resultados propiedades físicas						
	Muestra	Resistencia a flexión (N)	Absorción de agua (%)	Resistencia a flexión absorción agua (N)	Resistencia al impacto (mm)	Dureza Shore (C)
Ref.	PB0	447	27,4	406	11,0	94
PB+ Escoria	PBS20	340	19,6	303	12,3	92
	PBS40	260	20,1	210	14,4	90
	PBS60	120	22,0	77	20,2	87
	PBS80	92	30,0	67	1,1	35
PB+ Escoria + Aditivo	PBS20L	490	18,5	460	10,5	90
	PBS40L	380	19,4	360	10,2	88
	PBS60L	260	23,9	220	13,8	76
	PBS80L	110	28,4	84	1,6	58

**Tabla 8.2. Resultados de las propiedades físicas de las placas de yeso con escoria blanca.**

Las tendencias lineales de la serie de probetas fabricadas con escoria blanca LF y que incorporan aditivo latex en su dosificación, son especialmente relevantes porque permiten predecir el comportamiento que van a experimentar y elegir que dosificación se puede utilizar con referencia a la resistencia mecánica requerida, más allá de las muestras ensayadas en este estudio, como se puede comprobar en la Gráfica 8.1.

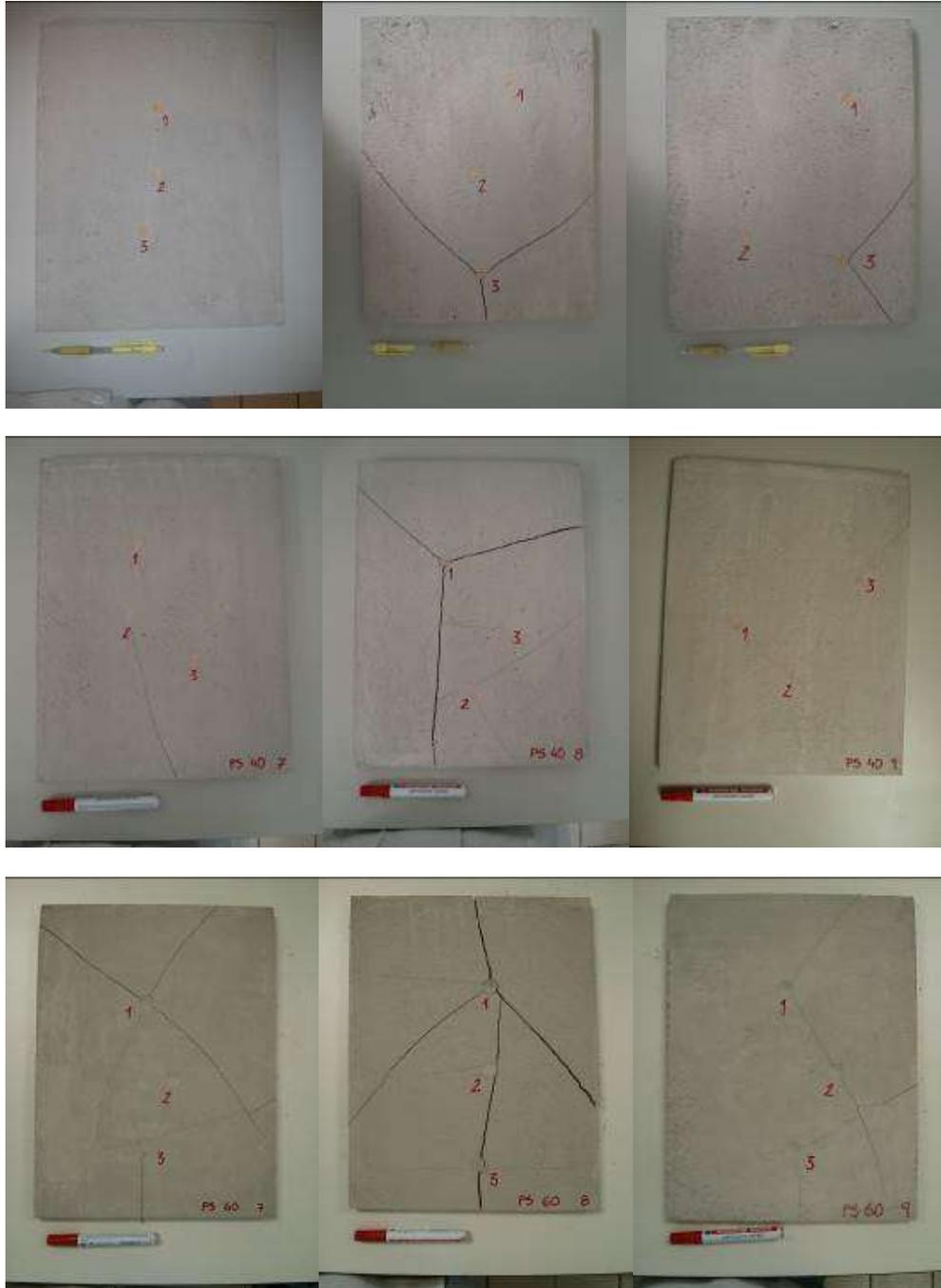


**Gráfica 8.1. Relación entre el % de escoria y la resistencia a flexión.**

Con respecto a los datos de absorción de agua, se observa un incremento de este comportamiento conforme es mayor la cantidad de escoria blanca añadida. Sin embargo, con respecto a la muestra de referencia, la absorción de agua disminuyó en las muestras hasta el 60% de residuo utilizado. Esto podría deberse a que estas dosificaciones necesitan una menor cantidad de agua para conseguir una adecuada relación agua/yeso, ya que cuanto mayor cantidad de escoria menor cantidad de agua se necesita. Esto implica que el % de escoria empelada puede contribuir a cambiar la distribución de los poros y, como consecuencia, modificar la absorción final de agua en estado endurecido de las muestras.

Este comportamiento también puede explicar otros aspectos, tales como que la escoria blanca produce un aumento de la microporosidad, factor que también justifica la reducción de la resistencia a flexión y el Índice de Dureza Superficial Shore C.

En cuanto a los valores obtenidos en el ensayo de resistencia al impacto se produce el efecto contrario, ya que esta aumenta a medida que se incrementa el % de escoria blanca utilizada en las muestras, debido a su naturaleza, más compacta y menos porosa que el yeso, salvo en las que la cantidad de yeso es inferior al 20%. Estos comportamientos se pueden observar en la Figura 8.4.

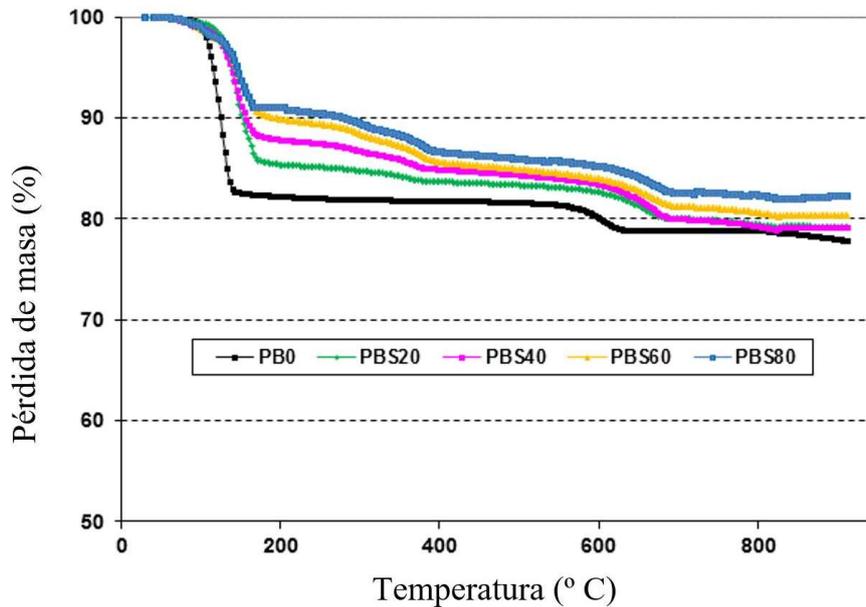


**Figura 8.4. Muestras del ensayo resistencia al impacto de PBS20, PBS40, PBS60.**

### 8.5. COMPORTAMIENTO FRENTE AL FUEGO

Para determinar el comportamiento frente al incremento de la temperatura se utilizan diversos ensayos complementarios tales como el Análisis Termogravimétrico, la determinación de la conductividad térmica y el ensayo de no combustibilidad.

Se puede observar que a medida que aumenta el contenido de escoria blanca LF utilizada en las dosificaciones, la pérdida de masa disminuye al aumentar la temperatura, tal y como se puede observar en la Gráfica 8.2.



**Gráfica 8.2. TGA de las líneas de degradación de todas las muestras.**

Por otro lado, la humedad del yeso es muy importante, ya que mejora el comportamiento ignífugo que presentan las placas, debido a que este contiene aproximadamente un 3% de agua libre en función de la temperatura ambiente y la humedad relativa.

Entre los 90°C y los 180°C, en la deshidratación inicial en el yeso de referencia PB0 se produce una pérdida de masa debido a la evaporación del agua estructural del yeso dihidratado. La segunda pérdida sustancial de masa se produce entre los 580°C y los 700°C por la descomposición de la dolomita, que consume la suficiente energía para evaporar el agua libre y

posibilitar el cambio químico que libera agua en la estructura cristalina. La deshidratación completa no se produce hasta que la temperatura alcanza aproximadamente los 700°C, lo que requiere un aporte de energía adicional<sup>60</sup>.

Para el caso de las mezclas con adición de escoria blanca, se produce un salto de degradación intermedio entre 320°C y 380°C, debido a la descomposición de los óxidos hidratados que forman parte de la escoria.

La estabilidad al fuego de la escoria blanca es mayor que la del hemihidrato, por lo que una mayor concentración de residuo infiere una pérdida de masa cada vez menor.

El conocimiento de la conductividad térmica y de otras propiedades térmicas de transporte en los materiales de construcción que forman parte del proceso de transferencia de calor, es esencial en la predicción del perfil de temperatura y del flujo de calor a través del material.<sup>61</sup>

La conductividad térmica del yeso es un parámetro muy importante para conocer su comportamiento a la transmisión del calor a su través. No obstante, es complicada su determinación, sobre todo cuando se incorporan productos reciclados en el material prefabricado.<sup>62</sup>

La adición de escoria blanca a las placas de yeso provoca un incremento progresivo y muy elevado en la conductividad térmica del material ( $\lambda$ ), en comparación con las muestras de referencia, resultado esperado debido a la naturaleza de las escorias blancas. Esto puede deberse a que la densidad aumenta con el contenido de escoria blanca, lo que provoca una mayor compactación y un menor aislamiento térmico, es decir, existe una

---

<sup>60</sup>Buchaman AH, Abu AK (2017) Structural design for fire safety, 2nd edn. Wiley, University of Canterbury, New Zealand

<sup>61</sup>Yu QL, Brouwers HJH (2012): Thermal properties and microstructure of gypsum board and its dehydration products: a theoretical and experimental investigation.

Bianca L, Serraa V, Fantuccia S, Duttob M, Massolino M (2015): Thermal insulating plaster as a solution for refurbishing historic building envelopes: first experimental results.

<sup>62</sup>Kontogeorgos D, Ghazi Wakili K, Hugi E, Founti M. Heat and moisture transfer through a steel stud gypsum board assembly exposed to fire. Construction and Building Materials 26 (2012)

correlación directa entre la densidad y la conductividad térmica<sup>63</sup>, como se observa en los resultados que se muestran en Tabla 8.3.

<b>Resultados reacción frente al fuego</b>					
<b>Muestra</b>	<b>PB0</b>	<b>PBS20</b>	<b>PBS40</b>	<b>PBS60</b>	<b>PBS80</b>
<b>J=Flujo de calor (W)</b>	1,35	2,75	3,05	3,22	3,43
<b>Λ=Conductividad térmica (W/m°C)</b>	49,2	144,4	175,9	162,8	195,0
<b>Coficiente transferencia de calor por convección pared-aire (W/m<sup>2</sup>°C)</b>	2,76	8,79	9,07	11,24	12,01
<b>R<sub>i</sub>=resistencia pared-aire a los flujos de calor por convección (°C/W)</b>	3,09	3,09	3,09	3,09	3,09
<b>R<sub>s</sub>=resistencia al flujo de calor por conducción (°C/W)</b>	7,62	2,63	2,44	2,17	2,14
<b>R<sub>e</sub>=resistencia al flujo de calor por convección pared-aire (°C/W)</b>	9,7	2,77	2,87	2,61	2,27
<b>R=resistencia total (°C/W)</b>	19,78	8,49	8,10	7,80	7,5
<b>C=conductancia de la pared (W/m<sup>2</sup>°C)</b>	3,28	9,62	10,85	11,73	13,64
<b>U=coeficiente de transmisión térmica o conductancia total de pérdidas (W/m<sup>2</sup>°C)</b>	1,26	2,95	3,10	3,25	3,51

**Tabla 8.3. Resultados ensayos reacción frente al fuego de las dosificaciones.**

Si se compara los coeficientes de transferencia de calor por convección pared-aire de las placas de yeso que incorporan escoria blanca, se obtienen valores entre 8.79 W/m<sup>2</sup>°C para las placas con un 20% de sustitución de yeso por escoria blanca y hasta aproximadamente 12 W/m<sup>2</sup>°C para una sustitución

<sup>63</sup>H. Uysal, R. Demirboğa, R. Şahin, R. Gül The effects of different cement dosages, slumps, and pumice aggregate ratios on the thermal conductivity and density of concrete, Cement and Concrete Research, Volume 34, Issue 5, May 2004

de un 80%, lo que da una idea del efecto que este residuo siderúrgico produce en la matriz del producto prefabricado<sup>64</sup>.

Cabe destacar que el carácter mineralógico de los agregados reciclados podría también influir en la conductividad térmica del material, debido a que la conductividad cambia dependiendo del grado de cristalización del mineral, siendo los productos cristalizados amorfos menos conductores que los cristalinos.

## **8.6. ENSAYO DE NO COMBUSTIBILIDAD**

El ensayo de no combustibilidad se emplea para evaluar el comportamiento de las muestras a altas temperaturas, obteniendo los resultados a partir de dos metodologías estandarizadas, la norma UNE EN ISO 1716 que utiliza para su determinación un calorímetro de bomba de oxígeno y la norma UNE EN ISO 1182 que lo hace mediante un horno cilíndrico.

La aplicación de la metodología descrita en la norma UNE EN ISO 1716 permite establecer los criterios para determinar el calor de combustión de los materiales de construcción o el Potencial Calorífico Superior (PCS) que presentan estos, representando de esta forma la cantidad de energía intrínseca que los materiales pueden liberar en caso de incendio.

Mediante este ensayo se puede clasificar los estos materiales con adición de escoria blanca LF en función de su resistencia al fuego.

Los resultados obtenidos en este ensayo indican que la muestra más desfavorable, la PBS80, registró un valor medio de PCS = -0,538 MJ/kg, siendo un valor correcto, ya que los valores negativos indican que se produjo una reacción endotérmica durante la combustión de la muestra. Normalmente estos casos se dan durante la combustión de materiales inorgánicos, ya que una parte del calor liberado por la combustión del ácido benzoico es absorbida por la muestra de fusión, dando como resultado un valor negativo del Calor Bruto de Combustión (PCS).

De acuerdo con la normativa de aplicación, los materiales con PCS negativos se indicarán con un valor igual a cero, siendo esto clasificados como Clase

---

<sup>64</sup>Thomas G. Thermal properties of gypsum plasterboard at high temperatures. Fire Mater. 2002.

A1. Por lo tanto, como la muestra PBS80 presenta unos valores inferiores a 2 MJ/kg, se clasificará como Clase A1.

Además de realizar esta prueba, se debe completar la clasificación frente al fuego de los materiales aplicando el procedimiento de análisis descrito en la norma UNE EN ISO 1182, que está especialmente desarrollado para su aplicación a los ensayos con materiales de construcción. Aunque esta prueba no es completamente inerte, el ensayo realizado sobre la muestra PSB80, indicó que solamente se produjo una cantidad muy limitada de calor y llamas cuando esta fue expuesta a temperaturas de 750°C.

Pese a que con estos ensayos de no combustibilidad se puede determinar el comportamiento frente al fuego de los materiales con adición de escorias, estos resultados no constituyen el único criterio para la evolución de los riesgos potenciales que pueden presentar frente al fuego. No obstante, permiten extrapolar su comportamiento a una situación real.<sup>65</sup>

Existen estudios previos realizados sobre materiales con diversas adiciones distribuidas de forma homogénea, considerándose estos elementos en su conjunto como un material homogéneo, obteniéndose buenos resultados con esta consideración. Como las placas de yeso con adición de escorias blancas LF objeto de este estudio, presentan una distribución homogénea de la escoria en la matriz del yeso, se puede considerar apropiado realizar el ensayo con dicha consideración.<sup>66</sup>

Con los resultados obtenidos en los ensayos se puede afirmar que a medida que aumenta la cantidad de escoria blanca dosificada en las muestras, estas pierden menos cantidad de masa, debido a que la escoria blanca agregada es más inerte que el propio yeso, tal y como se muestra en la Tabla 8.4.

Todas las muestras analizadas presentan una persistencia a la inflamación menor a 5 segundos, teniendo en cuenta el margen de 20 segundos especificado en la norma, con un aumento de la temperatura en horno de entre 2,2°C y 3,8°C, siendo estas temperaturas muy inferiores a los 50°C indicados en la normativa.

---

<sup>65</sup>Ciudad A, Lacasta A.M, Haurie L, Formosa J, Chimenos J.M. Improvement of passive fire protection in a gypsum panel by adding inorganic fillers: Experiment and theory. Applied Thermal Engineering 31 (2011)

<sup>66</sup>Fangrat J (2017) On non combustibility of comercial building materials. Fire Mater 41:99-110.

Resultados propiedades físicas				
	Muestra	Incremento de temperatura en horno (°C)	Persistencia a la inflamación (s)	Pérdida de masa (%)
Ref.	PB0	4,1	<5	25,1
PB+ Escoria	PBS20	3,8	<5	21,4
	PBS40	3,4	<5	19,2
	PBS60	2,4	<5	17,5
	PBS80	2,2	<5	12,3

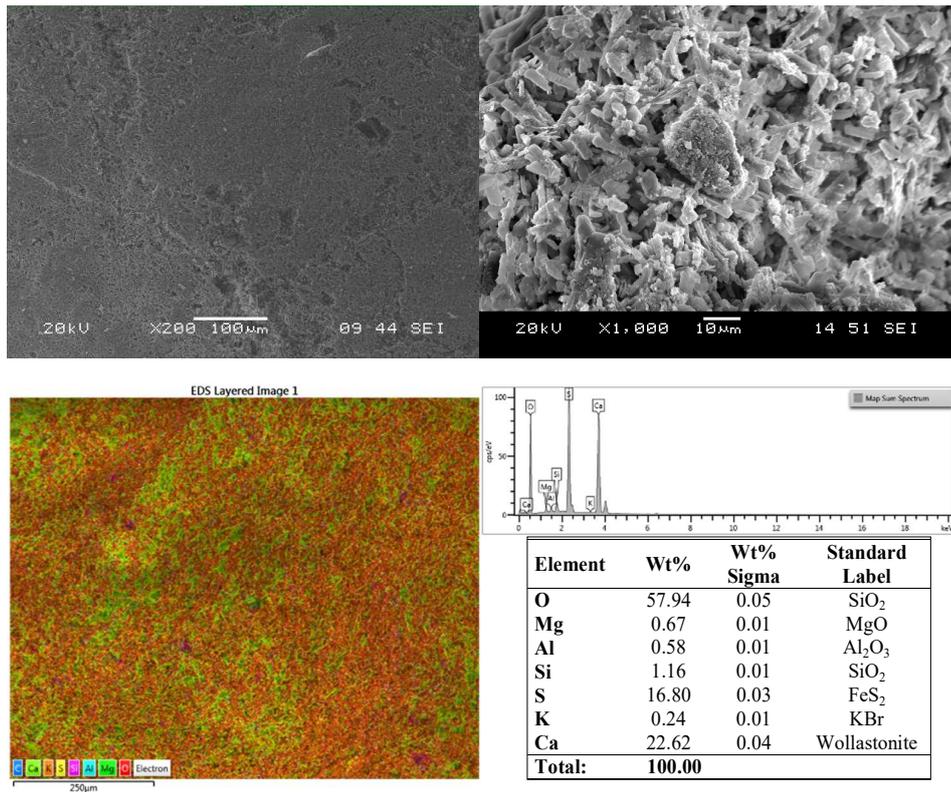
**Tabla 8.4. Resultados después de los ensayos de no combustibilidad.**

Con respecto a los valores de pérdida de masa, estos fueron en todos los casos bajos, con una pérdida máxima de material del 21,4% para las muestras PBS20 y con una pérdida inferior en las muestras PBS80 del 12,3%. Una vez analizadas las muestras, se observa en todas ellas que no existe una degradación significativa, tal y como se pudo observar en la Figura 8.5.



**Figura 8.5. Muestras antes y después del ensayo de no combustibilidad.**

Mediante el análisis microscópico de la matriz se puede verificar la ausencia de degradación en las muestras, donde no se detectan fisuras superficiales o roturas, comprobando que los cristales de yeso de la matriz interna mantuvieron su estructura estable, sin mostrar ningún tipo de degradación ni pérdida de cristalización cualitativa, como se puede observar en la Figura 8.6.



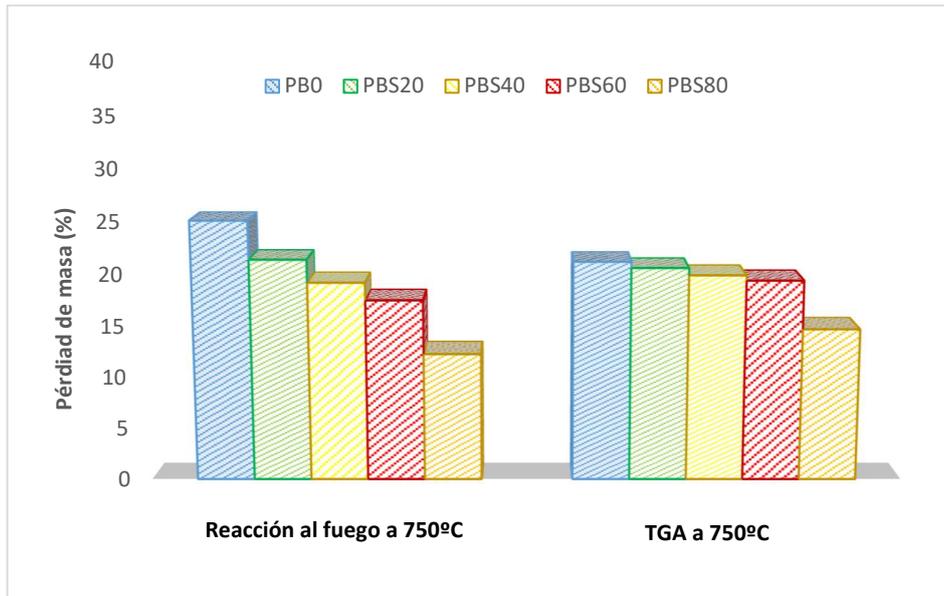
**Figura 8.6. Muestra PBS40:superficie yeso-escoria-microestructura matriz-mapeo y composición.**

Considerando únicamente la contribución del material a la inflamabilidad, estos resultados indican que los materiales diseñados se pueden clasificar como Clase Euroclass A1 frente al fuego, es decir sin contribución al fuego, según lo establecido en la norma UNE EN 13501-1<sup>67</sup>.

<sup>67</sup>EN 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.

Con respecto a la utilización de aditivos en las placas de yeso con adición de escorias, su influencia se puede considerar irrelevante, ya que la concentración de aditivo en la mezcla es del 0,08%, siendo inferior al 1% que establece la norma, como límite para incluir estos productos en los ensayos de reacción al fuego, por lo que se considera esta cantidad lo suficientemente pequeña como para no afectar a la contribución, en caso de incendio de estos materiales.

El comportamiento frente al fuego de todas las muestras analizadas muestra una correlación con los datos obtenidos en el TGA, como se puede observar en la Gráfica 8.3, donde se comparan las pérdidas de masa obtenidas en el ensayo de reacción al fuego a 750°C, con respecto a la pérdida de masa obtenida en el TGA a la misma temperatura.



**Gráfica 8.3. Comparación pérdida masa Horno-TGA a 750°C.**

De estos resultados podemos concluir que el yeso presenta una capacidad para resistir la exposición a temperaturas elevadas sin una pérdida sustancial de masa, debido a la adición de escoria blanca.<sup>68</sup>

<sup>68</sup>Katsoulis C, Kandare E, Kandola BK (2011) The combined effect of epoxy nanocomposites and phosphorus flame retardant additives on thermal and fire reaction properties of fiber-reinforced composites. J Fire Sci 29(4):361-383.

Comparando la pérdida de masa obtenida para la misma muestra en las pruebas de reacción al fuego y en la termogravimetría, se observa que las únicas desviaciones, de carácter menor, se produjeron en la muestra de referencia PB0, con una diferencia en la pérdida de masa del 3,9%, y en la muestra PBS80 con una diferencia de porcentaje del 2,4%. Para el resto de muestras, PBS20, PBS40 y PBS60 las variaciones fueron mínimas, por lo que estos resultados pueden considerarse válidos para determinar los criterios de evaluación frente al fuego de las placas de yeso con adición de escoria blanca LF.

## **8.7. CONCLUSIONES**

Según los registros obtenidos en los diversos ensayos realizados en el estudio, el empleo de escoria blancas de Horno Cuchara LF como adición en el diseño de morteros de yeso, como material base para la fabricación de placas de yeso, muestra ventajas competitivas respecto de los conglomerados de yeso tradicionales, destacando especialmente su comportamiento frente al fuego.

De los resultados obtenidos en los ensayos se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- El uso de los residuos de escoria blanca de Horno Cuchara LF en la fabricación de morteros de yeso, sustituyendo parcialmente al conglomerante es viable, ya que la fabricación se realiza de manera sencilla, obteniendo valores adecuados de densidad, humedad, resistencia a flexión, absorción de agua y dureza superficial, dependiendo de la relación yeso/escoria que se elija como dosificación.
- Aunque la resistencia a flexión de las muestras disminuyó con la incorporación de la escoria blanca, los valores de resistencia obtenidos en las mezclas diseñadas se encontraban por encima del mínimo requerido por la normativa de 100 N, salvo para la dosificación PBS80.
- Las mezclas que contenían en su composición el aditivo tipo latex, no solo mantuvieron, si no que mejoraron los valores de resistencia a flexión, mostrando una tendencia lineal en la Serie PBSL. Mientras que la muestra PBS20L mejoró su resistencia mecánica un 10%

aproximadamente con respecto a la muestra de referencia PB0, la muestra PBS40L solo perdió un 15% con respecto a esta.

- El aditivo tipo latex mejoró las propiedades de las propiedades de las mezclas diseñadas en comparación con las mismas muestras de referencia que no lo incorporaban. Se observó una mejora significativa en la resistencia mecánica y una baja densidad, debido probablemente a una menor absorción de agua. Esto último podría contribuir a lograr una menor rigidez de las placas, ante una respuesta a una fuerza aplicada sobre la matriz yeso-escoria.
- Aunque las placas de yeso con adición de escoria blanca presentan una conductividad térmica mayor a medida que aumenta la cantidad de residuo, su uso está garantizado por su comportamiento frente al fuego, quedando patente en los ensayos de termogravimetría y no combustibilidad.
- El análisis microscópico confirma la estabilidad de la estructura interna de estos materiales, después de ser sometidos a ensayos de exposición frente al fuego.
- Existe una correlación ente los valores obtenidos en el TGA y los conseguidos en la reacción al fuego, lo que indica que se pueden utilizar técnicas complementarias para analizar las propiedades térmicas, y el rendimiento de los materiales de construcción frente a los incendios.
- Los resultados obtenidos en los ensayos estandarizados de las normas UNE EN ISO1716 y UNE EN ISO 1182, indicaron que la composición de este compuesto correspondía con la clasificación Euroclass A1 (incombustible).
- Estos compuestos contribuyen a la reutilización de grandes cantidades de este residuo, para obtener materiales de yeso con propiedades adecuadas, y con un comportamiento al fuego excelente de las mezclas con respecto a las muestras de referencia, siendo este mayor cuanto más cantidad de residuo es empleado, determinado que estos productos pueden emplearse en construcción.



# **CAPÍTULO IX**

## Estudio económico





## 9. ESTUDIO ECONÓMICO

En los apartados anteriores se ha realizado el estudio de viabilidad técnica de ecomorteros de yeso con adición de escorias tanto blancas como negras, además de la fabricación de placas de yeso con escoria blanca.

Llegados a este punto se va a realizar una estimación del coste de los distintos materiales fabricados con adición de escorias, comparándolos con sus muestras de referencia, analizando si la reutilización de estos elementos resulta viable desde un punto de vista económico.

A modo de referencia, el proceso de elaboración de los morteros objeto de estudio se puede dividir en las siguientes fases:

- Recepción y acopio de materiales.
- Dosificación (tamizado si es necesario).
- Mezclado de todos los componentes.
- Elaboración y obtención del producto acabado.

El proceso de elaboración de los materiales de referencia y el de los dosificados con escorias es el mismo en ambos casos. La recepción de los materiales, el acopio de las materias primas, su posterior tamizado, la mezcla de los componentes y obtención del producto final, tienen un coste económico similar.

Por todo ello, se analizará el coste de las materias primas que se emplean y su cantidad utilizada en cada muestra, ya que estas dos referencias van a determinar la diferencia económica que presentan estos nuevos materiales.<sup>69</sup> No se considerará el coste de puesta en obra de los materiales, ya que se supone el mismo valor en todos los casos (con adición de escorias y sin adición de escorias), al utilizarse los mismos procedimientos y técnicas de aplicación.

En definitiva, para analizar su viabilidad económica <sup>70</sup>, solo se tendrán en cuenta el coste de los materiales, el coste de transformación y el coste de transporte

---

<sup>69</sup> S. Barbero, M.Dutto, C. Ferrua, A. Pereno. Analysis on existent thermal insulating plasters towards innovative applications: Evaluation methodology for a real cost-performance comparison. *Energy and Buildings*, (2014), 77, 40-47.

<sup>70</sup> J. Maia. N. M.M.Ramos, P. de Freitas Vasco, A. Sousa. Laboratory Tests and Potential of Thermal Insulation Plasters. *Energy Procedia*, (2015), 78, 2724-2729.

### 9.1. VALORACIÓN CUANTITATIVA

Para llevar a cabo la valoración cuantitativa de estos materiales y, por ende, su viabilidad económica, se realizará el estudio sobre los componentes que intervienen en la elaboración de 1 m<sup>2</sup> de ecomortero y placa de yeso con escoria.

Se establecerá una relación de cada uno de los componentes en peso empleados para la ejecución de 1 m<sup>2</sup> de material con cada una de las diferentes dosificaciones y de la muestra de referencia, como se muestra en la Tabla 9.1.

Cantidad de material por 1 m <sup>2</sup>					
	Muestra	Yeso (kg/m <sup>2</sup> )	Escoria (kg/m <sup>2</sup> )	Aditivo (kg)	Agua (l)
<b>Ref.</b>	P0	26,50	-	-	10,60
<b>Yeso+ Escoria blanca</b>	PS20	21,20	6,30	-	11,00
	PS40	15,90	12,60	-	11,10
	PS60	10,60	18,90	-	11,50
	PS20M	21,20	6,30	0,22	9,70
	PS40M	15,90	12,60	0,23	10,05
	PS60M	10,60	18,90	0,24	10,40
	PS20L	21,20	6,30	0,28	11,11
	PS40L	15,90	12,60	0,29	11,22
	PS60L	10,60	18,90	0,30	11,62
<b>Yeso+ Escoria negra</b>	PS20	26,50	7,20	-	14,15
	PS40	21,20	14,40	-	12,46
	PS60	15,90	21,60	-	10,12
	PS80	10,60	28,80	-	7,88

**Tabla 9.1. Cantidad de material empleado para elaborar 1 m<sup>2</sup> de producto.**

### 9.1.1. Coste de transformación

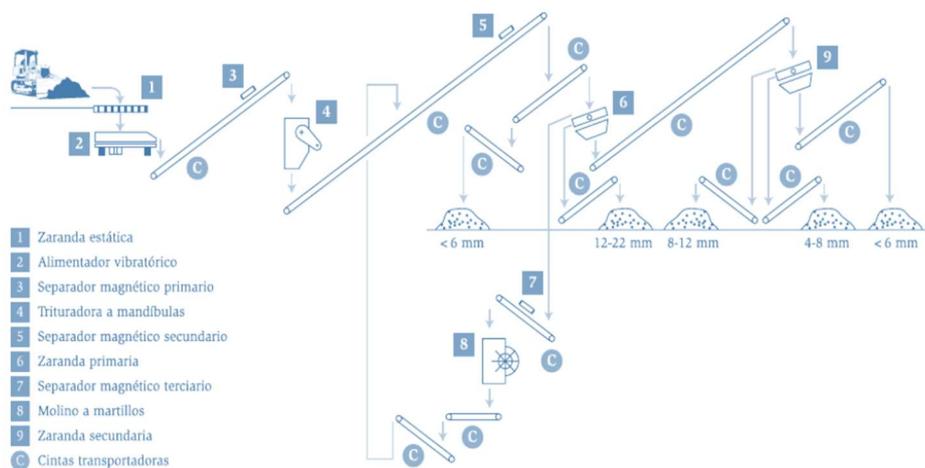
Tanto las escorias blancas LF como las escorias negras EAF se suministran en sacas o en cantidades mayores mediante camiones a granel. La escoria se almacena en acopios para, posteriormente, seguir un proceso de transformación y acondicionamiento previo a su uso.

El primer paso consiste en la estabilización de las escorias, mediante su depósito en bruto a la intemperie durante periodos extensos de tiempo.

No obstante, también se pueden aplicar métodos<sup>71</sup> que aceleren este tiempo de espera, como pueden ser la inyección de vapor o la adición de sílice, entre otros.

A continuación, las escorias pasaran por un primer molido y separación magnética de los fragmentos metálicos, obteniéndose una serie de fracciones de diferente tamaño a través de su cribado y clasificación final.

Un ejemplo de este proceso de transformación es el que se sigue en la Planta Siderúrgica ABS de Udine<sup>72</sup>, cuyo esquema se muestra en la Figura 9.1.



**Figura 9.1. Esquema de la instalación para el proceso de transformación de la escoria.**

<sup>71</sup>Madias, J. (2009) "Reciclado de polvos de horno eléctrico". Acero latinoamericano 23(513):38.

<sup>72</sup>Zimolo, D. and Tomadin, L. (2013) EAF slag recovery turns a waste disposal problema into a business opportunity. 44th ABM Steelmaking Seminar.

Teniendo en cuenta que la planta de transformación se encuentra en el lugar donde se genera el residuo, y que este material no tiene un coste directo pues resulta del proceso de fabricación de otro, el valor que se le atribuye es el coste de su transformación para posibilitar su uso.

Para conocer dicho valor, se estimarán una serie de costes lo más cercanos posibles a la realidad, para así obtener unos datos realistas, pero sin llegar a realizar un estudio pormenorizado al uso, ya que no es el objetivo de nuestro análisis.

Se deberá tener en cuenta el coste anual<sup>73</sup> actualizado de las instalaciones (coste, amortización, instalación), el coste salarial de los empleados y el coste del consumo energético necesario para el funcionamiento de la instalación.

Considerando la producción media anual de una planta de transformación de escoria y su coste anual estimado, se determina un valor medio para este coste, tal y como se muestra en la Tabla 9.2.

Coste de transformación €/kg	
Escoria	0,05

*Tabla 9.2. Coste transformación escorias.*

### 9.1.2. Coste de las materias primas

Para el cálculo del coste de las materias primas necesarias para la elaboración del producto, se tendrá en cuenta que en el coste del yeso está incluido su transporte a obra.

Aunque la utilización de aditivos tipo Sika® se realiza en cantidades muy pequeñas, el precio de estos, SikaLatex (1%) y SikaMix (0,8%) se tendrá en cuenta en el coste final y se aplicará a todos los tipos de muestras en los que se ha empleado.

Los precios de estos componentes se han obtenido de empresas suministradoras localizadas en el entorno de las zonas de producción de las

<sup>73</sup>García, J. (2017) Elaboración de morteros de cal y bastardos para albañilería fabricados con áridos siderúrgicos.

escorias y próximas a los laboratorios ensayo. En la Tabla 9.3 se muestran los costes de dichos materiales.

<b>Coste de materias primas</b>	
<b>Yeso €/kg</b>	0,10
<b>Escoria €/kg</b>	0
<b>Agua €/m<sup>3</sup></b>	1,15
<b>SikaLatex €/kg</b>	6,26
<b>SikaMix €/kg</b>	9,85

*Tabla 9.3. Coste de las materias primas.*

### **9.1.3. Coste del transporte**

El precio del transporte quizás sea uno de los factores más determinantes a la hora de estudiar la viabilidad del material, ya que afecta a la gran mayoría de las materias primas que lo componen y que, en algunas ocasiones, puede suponer un valor adicional casi similar al del propio coste del producto transportado.

Como se ha indicado con anterioridad, la industria generadora de las escorias se encuentra localizada en España en determinadas zonas geográficas, situándose gran parte de ella en el País Vasco.

Esta localización provoca una distribución poco homogénea de este tipo de residuos, por lo que el valor del transporte adquiere mayor importancia.

El cálculo de este coste incluye el trayecto desde el lugar de generación del residuo hasta el lugar de fabricación del producto, con todos los gastos incluidos, tanto los costes directos (amortización, financiación, personal, seguros, costes fiscales, combustible, neumáticos, mantenimiento, reparaciones, dietas, peajes...), como los indirectos.

Para obtener el valor del precio de transporte se considera que el transporte de la escoria se realiza a granel en un camión articulado tipo volquete, con una capacidad máxima de carga de hasta 25 m<sup>3</sup>, con un coste estimado de

1,36 €/km o 90,54 €/h<sup>74</sup>, incluyendo en este precio los gastos directos e indirectos anuales.

Tanto las escorias blancas como las escorias negras presentan diferentes densidades, por lo que tanto la masa como el volumen a transportar puede variar de unas a otras.

Con respecto a lo anteriormente expuesto, la normativa establece prohíbe transportes superiores a 40 Tn<sup>75</sup> de masa máxima autorizada para camiones articulados de al menos 5 ejes, limitándose de este modo la carga útil del camión empleado a 24 Tn.

Aplicando las limitaciones que presenta la normativa, quedan fijadas las cantidades máximas de ambas escorias que se pueden transportar. Con todo ello y considerando que en cada viaje el camión transporta la carga máxima permitida, se determina el coste del transporte en cada caso, tal y como se muestra en la Tabla 9.4.

<b>Coste del transporte según residuos</b>				
	<b>Densidad (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Carga máx. (Tn)</b>	<b>Coste (€/Tn*km)</b>	<b>Coste (€/Tn*h)</b>
<b>Escoria blanca</b>	2860	24	0,0566	3,77
<b>Escoria negra</b>	3645	24	0,0566	3,77

**Tabla 9.4. Coste del transporte de las escorias blancas y negras.**

La distancia de transporte afectará de forma significativa en el coste final del producto, por lo que también se en cuenta la localización geográfica de la planta de suministro y su distancia a las diferentes zonas de posible utilización.

Para considerar la mayor cantidad de lugares a los que se pueda suministrar las escorias dentro de la Península Ibérica, se estudiarán tres distancias medias de 100 km, 500 km y 1000 km, tal y como se muestra en la Tabla 9.5.

<sup>74</sup>Observatorio de costes del transporte de mercancías (2020).

<sup>75</sup>Ministerio de transporte, movilidad y agenda urbana. Transporte terrestre. Marco de referencia del sector. Inspección y seguridad en el transporte. Peso y dimensiones

<b>Coste del transporte según residuos y distancias</b>			
	<b>Coste a 100 km (€/Tn)</b>	<b>Coste a 500 km (€/Tn)</b>	<b>Coste a 1000 km (€/Tn)</b>
<b>Escoria blanca</b>	5,66	28,30	56,60
<b>Escoria negra</b>	5,66	28,30	56,60

*Tabla 9.5. Coste del transporte de las ecorias blancas y negras en tramos.*

#### **9.1.4. Coste total**

Una vez obtenidos los costes de las materias primas, los costes de transformación y el coste del transporte en función de la distancia final en cada uno de los casos, se puede valorar el coste de las dosificaciones analizadas como sumatorio del coste de todos los parámetros que influyen en cada una de ellas.

En función de las cantidades de materias primas empleadas en cada una de las muestras, se determinará el coste final por 1 m<sup>2</sup> de pared para el producto en masa y para el producto en forma de placas, tal y como se muestra en la Tabla 9.6. y en la Gráfica 9.1.

Hay que tener en cuenta que el coste final analizado del producto en masa y del producto en forma de placa va a coincidir en este caso, debido a que, en el presente estudio, se valora el coste de la elaboración del nuevo mortero de yeso ecológico con adición de escorias procedentes de acería y no el proceso de elaboración de una placa de yeso con este material, ya que coincidiría exactamente con el de una placa de yeso tipo ya que no hay ninguna variación entre ambos casos y por lo tanto el coste en este aspecto no influye para el análisis realizado.

Como en el coste final influye de manera sustancial el valor del transporte en función de la distancia al lugar de destino de las materias primas, se hará este cálculo considerando tres tramos de desplazamiento que engloban la mayoría de los posibles lugares de destino dentro de la Península Ibérica.

Tal y como se muestra en la Tabla 9.7., Tabla 9.8 y Tabla 9.9, y en sus gráficas de representación, se analiza el coste final por un 1 m<sup>2</sup> de pared a una distancia de 100 km, 500 km y 1000 km respectivamente.

Coste total por 1 m <sup>2</sup>						
	Muestra	Yeso (€)	Escoria (€)	Aditivo (€)	Agua (€)	Total (€)
Ref.	P0	2,65	-	-	0,016	<b>2,67</b>
Yeso+ Escoria LF	PS20	2,12	0,315	-	0,017	<b>2,45</b>
	PS40	1,59	0,631	-	0,017	<b>2,24</b>
	PS60	1,06	0,946	-	0,017	<b>2,02</b>
	PS20M	2,12	0,315	2,16	0,015	<b>4,61</b>
	PS40M	1,59	0,631	2,26	0,015	<b>4,50</b>
	PS60M	1,06	0,946	2,36	0,016	<b>4,38</b>
	PS20L	2,12	0,315	1,75	0,017	<b>4,20</b>
	PS40L	1,59	0,631	1,81	0,017	<b>4,05</b>
	PS60L	1,06	0,946	1,87	0,017	<b>3,89</b>
Yeso+ Escoria EAF	PS20	2,65	0,360	-	0,021	<b>3,03</b>
	PS40	2,12	0,721	-	0,019	<b>2,86</b>
	PS60	1,59	1,081	-	0,015	<b>2,69</b>
	PS80	1,06	1,442	-	0,012	<b>2,51</b>

Tabla 9.6. Coste total de la fabricación de 1 m<sup>2</sup> de pared del producto.



Gráfica 9.1. Comparativa coste total de la fabricación de 1 m<sup>2</sup> de pared.

Coste total por 1 m <sup>2</sup> a 100 km						
	Muestra	Yeso (€)	Escoria (€)	Aditivo (€)	Agua (€)	Total (€)
Ref.	P0	2,65	-	-	0,016	<b>2,67</b>
Yeso+ Escoria LF	PS20	2,12	0,351	-	0,017	<b>2,49</b>
	PS40	1,59	0,701	-	0,017	<b>2,31</b>
	PS60	1,06	1,052	-	0,017	<b>2,13</b>
	PS20M	2,12	0,351	2,16	0,015	<b>4,65</b>
	PS40M	1,59	0,701	2,26	0,015	<b>4,57</b>
	PS60M	1,06	1,052	2,36	0,016	<b>4,49</b>
	PS20L	2,12	0,351	1,75	0,017	<b>4,24</b>
	PS40L	1,59	0,701	1,81	0,017	<b>4,12</b>
	PS60L	1,06	1,052	1,87	0,017	<b>4,00</b>
Yeso+ Escoria EAF	PS20	2,65	0,401	-	0,021	<b>3,07</b>
	PS40	2,12	0,802	-	0,019	<b>2,94</b>
	PS60	1,59	1,202	-	0,015	<b>2,81</b>
	PS80	1,06	1,603	-	0,012	<b>2,68</b>

Tabla 9.7. Coste total de la fabricación de 1 m<sup>2</sup> de pared del producto a 100 km.



Gráfica 9.2. Comparativa coste total de la fabricación de 1 m<sup>2</sup> de pared a 100 km.

Coste total por 1 m <sup>2</sup> a 500 km						
	Muestra	Yeso (€)	Escoria (€)	Aditivo (€)	Agua (€)	Total (€)
Ref.	P0	2,65	-	-	0,016	<b>2,67</b>
Yeso+ Escoria LF	PS20	2,12	0,493	-	0,017	<b>2,63</b>
	PS40	1,59	0,987	-	0,017	<b>2,59</b>
	PS60	1,06	1,480	-	0,017	<b>2,56</b>
	PS20M	2,12	0,493	2,16	0,015	<b>4,79</b>
	PS40M	1,59	0,987	2,26	0,015	<b>4,85</b>
	PS60M	1,06	1,480	2,36	0,016	<b>4,92</b>
	PS20L	2,12	0,493	1,75	0,017	<b>4,38</b>
	PS40L	1,59	0,987	1,81	0,017	<b>4,40</b>
	PS60L	1,06	1,480	1,87	0,017	<b>4,43</b>
Yeso+ Escoria EAF	PS20	2,65	0,564	-	0,021	<b>3,23</b>
	PS40	2,12	1,128	-	0,019	<b>3,27</b>
	PS60	1,59	1,691	-	0,015	<b>3,30</b>
	PS80	1,06	2,255	-	0,012	<b>3,33</b>

Tabla 9.8. Coste total de la fabricación de 1 m<sup>2</sup> de pared del producto a 500 km.



Gráfica 9.3. Comparativa coste total de la fabricación de 1 m<sup>2</sup> de pared a 500 km.

Coste total por 1 m <sup>2</sup> a 1000 km						
	Muestra	Yeso (€)	Escoria (€)	Aditivo (€)	Agua (€)	Total (€)
Ref.	P0	2,65	-	-	0,016	<b>2,67</b>
Yeso+ Escoria LF	PS20	2,12	0,672	-	0,017	<b>2,81</b>
	PS40	1,59	1,343	-	0,017	<b>2,95</b>
	PS60	1,06	2,015	-	0,017	<b>3,09</b>
	PS20M	2,12	0,672	2,16	0,015	<b>4,97</b>
	PS40M	1,59	1,343	2,26	0,015	<b>5,21</b>
	PS60M	1,06	2,015	2,36	0,016	<b>5,45</b>
	PS20L	2,12	0,672	1,75	0,017	<b>4,56</b>
	PS40L	1,59	1,343	1,81	0,017	<b>4,76</b>
	PS60L	1,06	2,015	1,87	0,017	<b>4,96</b>
Yeso+ Escoria EAF	PS20	2,65	0,768	-	0,021	<b>3,44</b>
	PS40	2,12	1,535	-	0,019	<b>3,67</b>
	PS60	1,59	2,303	-	0,015	<b>3,91</b>
	PS80	1,06	3,070	-	0,012	<b>4,14</b>

Tabla 9.9. Coste total de la fabricación de 1 m<sup>2</sup> de pared del producto a 1000 km.



Gráfica 9.4. Comparativa coste total de la fabricación de 1 m<sup>2</sup> de pared a 1000 km.

Como se observa en los resultados obtenidos, el precio de las muestras en cada serie disminuye cuanta mayor cantidad de escoria se aporta en detrimento del yeso, hasta una distancia de transporte de 1000 km. A partir de esta distancia, esto deja de suceder.

Tomando como punto de partida el coste de la muestra de referencia, queda demostrado que la opción más viable para la elaboración de los conglomerados de yeso con escoria y de las placas de yeso es la serie con adición de escoria blanca PS. Como se puede observar, en todas las distancias de transporte consideradas, hasta llegar a los 1000 km, el coste de producción o bien se mantiene o se reduce con respecto a la muestra de referencia sin adición.

Cabe destacar que el resto de dosificaciones sobrepasa el coste de referencia, apreciándose una mayor diferencia cuanto mayor es la distancia a la que se tienen que transportar los productos.

En este último caso, deberían contemplarse posibles futuras subvenciones por parte de las Administraciones Públicas, concedidas por la utilización de este residuo como materia prima para, de esta forma, hacer más competitivo su precio.

Este tipo de ayudas, bien de forma directa mediante subvenciones a fondo perdido o mediante la reducción de impuestos, son necesarias para hacer competitivo el uso de estos residuos. El factor intangible del beneficio medioambiental es también importante y se analiza a continuación.

## **9.2. VALORACIÓN CUALITATIVA**

El análisis económico no solo puede tener en cuenta una valoración cuantitativa para determinar el coste de los materiales empleados para la obtención de nuevos productos. Es necesario considerar otros parámetros tales como el coste de gestión de los residuos por parte de la industria que los genera o el coste de los acopios y vertederos en los que se acumula. Se podría hablar entonces de una nueva filosofía productiva de bienes y servicios orientada a sistemas de producción sostenibles y respetuosos con el medio ambiente.

Por todo ello, es necesario analizar las diversas razones de oportunidad y las ventajas competitivas por las que se justifica el empleo de las escorias negras y blancas generadas en los procesos de fabricación del acero, en

sustitución de parte del yeso para la elaboración de ecomortero y placas de yeso con adición de escorias.

Su utilización evita el impacto ambiental y paisajístico que se genera en los entornos de producción del acero, que se ven degradados por el deterioro que esta actividad provoca, mejorando de esta forma el entorno natural de estos lugares.

Si damos un uso a las escorias, estas no acabarían depositadas en vertederos, obteniendo de esta forma un ahorro en los recursos destinados al transporte hasta estos lugares, reduciendo la contaminación ambiental y el gasto producido por la tasa de vertido.

Al darle una utilidad a la escoria, se liberarían multitud de espacios que se destinan al almacenaje (de mayor o menor estancia) de este residuo, por lo que se les podría dar un uso alternativo, con los consiguientes beneficios para la industria que los genera o posee.

A demás, al tener estas escorias un nuevo valor de producción, las propias empresas productoras mejorarían sus beneficios, al absorber parte del coste de producción del acero con la venta de los residuos generados.

Y por supuesto, al incorporar las escorias en sustitución de parte de la cantidad de yeso empleado, se reduce el volumen utilizado de este conglomerante, disminuyendo de esta forma los costes de extracción de la materia prima y los costes para su posterior transformación. Esto sería muy beneficioso desde el punto de vista medioambiental, ya que se reduciría la dependencia de los recursos naturales, los costes energéticos para su extracción y transformación y reduciendo la emisión de gases contaminantes, con el consiguiente beneficio para el medio ambiente.

### **9.3. CONCLUSIONES**

Del análisis realizado en este apartado y de los resultados obtenidos en los diferentes apartados se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Los ecomorteros y placas de yeso con adición de escorias analizados en este estudio, presentan propiedades y costes que resultan competitivos frente a los productos tipo sin adiciones.
- Las empresas de elaboración que utilicen este nuevo modelo de producción verían reducidos sus costes debido a la reestructuración del uso de materias primas, de hasta un 22% en función de la

dosificación empleada y de la distancia a la que se localicen los residuos, al utilizar un material más económico como la escoria, en detrimento de otro más costoso como el yeso.

- Las empresas de producción de acero convertirían un residuo en una materia prima, con el consiguiente beneficio económico y medioambiental que ello conlleva.
- Los diferentes productos planteados abrirían la posibilidad de moderar el consumo de un recurso natural limitado como es el yeso, así como dar solución a un problema cada vez mayor como es la gestión de un material de desecho, como son las escorias blancas y negras procedentes de la industria siderúrgica.
- Por otra parte, también se reducirían los costes energéticos asociados a los procesos de fabricación tradicionales, con el consiguiente balance positivo consumo de energía/emisiones en relación con el medio ambiente, el desarrollo sostenible y la Economía Circular de los Residuos.

# **CAPÍTULO X**

## **Conclusiones finales**





## 10. CONCLUSIONES FINALES

La investigación recogida en esta Tesis Doctoral muestra que es viable la utilización de residuos procedentes de la industria siderúrgica, tales como las escorias blancas LFS y las escorias negras EAF, como carga mineral en sustitución del yeso, con el objetivo de diseñar ecomorteros y placas de yeso para su uso en construcción. Esta investigación ha demostrado que los subproductos generados en el proceso de fabricación del acero pueden valorizarse como materia prima en sustitución de recursos naturales tradicionales.

Los resultados obtenidos en este estudio permiten afirmar que se han alcanzado los objetivos propuestos, ya que se han obtenido ecomorteros y placas de yeso con adición de escorias técnicamente viables, con características similares a los materiales tradicionales de referencia y con una alta resistencia frente al fuego.

Los resultados obtenidos en los procesos experimentales que se han desarrollado en los diferentes apartados de este documento, permiten extraer numerosas conclusiones.

### 10.1. MEZCLAS CON ESCORIAS

Respecto de las mezclas de yeso con escoria, las conclusiones más significativas son las siguientes:

- En el caso de las escorias blancas LF, la cantidad de agua de amasado necesaria para la dosificación no depende del porcentaje de escoria añadida en las mezclas. Solo disminuye cuando se introducen aditivos plastificantes. Por el contrario, la cantidad de agua de amasado en las muestras dosificadas con escorias negras EAF es inversamente proporcional a la cantidad añadida a las mezclas. En este caso, la cantidad de agua disminuye con el incremento del porcentaje de escoria negra utilizada.
- La dosificación de escoria blanda LF determina una reducción del tiempo de fraguado de las mezclas. Por el contrario, en las muestras con adición de escorias negras EAF, el tiempo de fraguado se incrementa cuando se supera el 40% de sustitución.

- Tanto las escorias blancas LF como las negras EAF producen en las mezclas una menor absorción de agua en comparación con las probetas de yeso de referencia. También reducen la pérdida del agua de amasado, lo que infiere un curado más uniforme, reduciéndose la aparición de fisuras por retracción.
- La adición de escorias no produce cambios significativos en los parámetros relacionados con la dureza Shore C, ya que todos ellos presentan valores similares al yeso. Solamente se verían afectados de forma negativa con la incorporación del aditivo Sika® (SikaLatex).
- En todos los ensayos de adherencia sobre soporte cerámico se ha obtenido una rotura por cohesión, con una disminución de los parámetros de adherencia de forma proporcional al aumento de residuo siderúrgico dosificado. Pese a este descenso de los valores de adherencia, se puede afirmar que el fallo por rotura se produce en la interface yeso-escoria y no entre la superficie cerámica y la muestra.
- La incorporación de las escorias en sustitución de parte del yeso produce una reducción de la resistencia mecánica. No obstante, los valores obtenidos cumplen con las prescripciones establecidas en la norma para su uso en albañilería. siempre y cuando estos no se supere la proporción del 60% del residuo utilizado. Este comportamiento se mejora mediante el uso del aditivo Sika® (SikaMix), que aumenta la resistencia mecánica al reducir la relación agua/conglomerante de la muestra.
- Las series que presentan un mayor porcentaje de escoria en el conglomerante, presentan un mayor tamaño del diámetro de los poros, una reducción de los capilares largos y un incremento en los capilares medianos. Estas características que presentan las muestras se pueden asociar a una mayor permeabilidad al vapor de agua, lo que determina un incremento de la transmisión en los paramentos fabricados con estos productos.
- El análisis microscópico indica que la adición de escorias no afecta significativamente a la matriz porosa del yeso, desarrollándose una buena interacción con el hemidrato.
- De acuerdo con el análisis termogravimétrico, con el incremento de la cantidad de escoria dosificada se produce una mejora significativa

en la resistencia térmica, ya que con mayor cantidad de residuo se produce una pérdida de masa cada vez menor.

Como conclusión, se puede determinar que el empleo de escoria en sustitución de parte del yeso, en el proceso de diseño de conglomerante de yeso para albañilería es factible, ya que todos los parámetros estudiados cumplen con los requisitos mínimos establecidos por la normativa de aplicación e incluso los mejoran. Cabe destacar que con la utilización de escorias blancas LF en las dosificaciones se obtienen valores ligeramente mejorados sobre el resto.

## **10.2. PLACAS DE YESO CON ESCORIA BLANCA**

De los estudios realizados y los resultados obtenidos en las placas de yeso con escorias blancas se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- El empleo de escorias blancas para la elaboración de placas de yeso presenta valores adecuados en densidad, humedad, absorción de agua y dureza superficial.
- La adición de escoria blanca provoca una reducción de los valores de la resistencia a flexión, pero manteniéndose por encima de los 100 N requeridos por la normativa salvo cuando se incorpora el 80% de residuo. Sin embargo, la adición del 20% de escoria blanca con aditivo Sika® (SikaLatex) provoca un incremento del 10% en los valores de resistencia.
- La incorporación del aditivo Sika® (SikaLatex) mejora las propiedades de la muestra evitando densidades altas debido a una menor absorción de agua, contribuyendo a lograr una menor rigidez de la matriz yeso-escoria.
- Tanto los ensayos de termogravimetría como de no combustibilidad, determinan que este tipo de placas presentan un muy buen comportamiento frente al fuego, aunque posean una conductividad térmica mayor según se aumenta la cantidad de residuo.
- Tras los ensayos de exposición al fuego, se confirma mediante el análisis microscópico la estabilidad de la estructura interna de estos materiales.

- A medida que aumenta la cantidad de residuo empleado, la muestra pierde menos cantidad de masa original, ya que la escoria es más inerte que el yeso, presentando una persistencia a la inflamación inferior a 5 segundos.
- Estas placas de yeso con escoria blanca se clasifican como Euroclass A1 (incombustibles) según los resultados obtenidos en los ensayos estandarizados EN ISO1716 y EN ISO 1182.

En definitiva, la fabricación de placas de yeso con adición de escoria blancas en sustitución de parte del yeso es perfectamente viable como material de construcción, ya que su fabricación se realiza de manera sencilla, obteniendo valores adecuados de densidad, humedad, flexión, absorción de agua y dureza superficial, presentando un comportamiento al fuego excelente, siendo este mayor cuanto más cantidad de residuo es empleado.

### **10.3. ESTUDIO ECONÓMICO**

De los estudios realizados en el aspecto económico se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Estos compuestos contribuyen a la reutilización de grandes cantidades de este residuo, para obtener materiales con base de yeso con propiedades adecuadas. De esta forma se convierte un residuo en una materia prima, con el consiguiente beneficio económico y medioambiental que ello conlleva.
- La elaboración de estos materiales contribuiría a moderar el consumo de un recurso natural limitado como es el yeso, así como dar solución a un problema cada vez mayor como es la gestión de un material de desecho.
- Los resultados económicos confirman que estos productos presentan precios competitivos frente a los materiales estándar, llegando a tener precios similares en función de las distancias de transporte, como es el caso de los ecomorteros y placas de yeso con adición de escorias blancas.
- Si por los beneficios del uso de estos residuos surgen posibles subvenciones desde diferentes ámbitos, esto provocaría una disminución de costes que llevaría a todas las dosificaciones a niveles muy competitivos.

Se puede determinar que los ecomorteros y placas de yeso con adición de escorias analizadas en este estudio, presentan propiedades y costes que resultan competitivos frente a los productos tipo sin adiciones





# **CAPÍTULO XI**

**Futuras líneas de investigación**



## 11. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

El estudio realizado en la presente Tesis Doctoral y el análisis de los resultados obtenidos, plantea la posibilidad de continuar las siguientes Líneas de Investigación:

- Analizar la influencia de la incorporación de aditivos en las muestras diseñadas, mediante la adición de escorias negras EAF en sustitución de parte del yeso.
- Estudiar las características que presentan las placas de yeso con adición de escoria negra EAF.
- Se podría analizar el comportamiento de este tipo de residuos en otras mezclas elaboradas con diferentes conglomerantes, tales como cales, así como la dosificación de otro tipo de aditivos, con el fin de innovar y mejorar la composición de las mezclas.
- Completar el conocimiento de las características que presentan las placas de yeso con adición de escorias mediante ensayos acústicos, para conocer de esa forma su adaptación a las prescripciones de habitabilidad determinadas en el Código Técnico de la Edificación, estableciendo los valores de aislamiento de las mismas.
- Sería conveniente analizar el comportamiento real de los ecomorteros y placas de yeso con adición de escorias en su aplicación y puesta en obra, definiendo las unidades de obra en la que es posible su utilización.



# **ANEXO I**

## **Bibliografía**





---

## ANEXO I: BIBLIOGRAFÍA

### Referencias bibliográficas por orden alfabético:

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*, (2015), 66, 199-205.

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

A. Serna, M. del Río, J.G. Palomo, M. González. Improvement of gypsum plaster strain capacity by the addition of rubber particles from recycled tires. *Construction and Building Materials*, (2012), 35, 633-641.

A.J. Lewry, J. Williamson. The setting of gypsum plasters. The effect of additives and impurities. *Journal of Materials Science*, (1994), 29, 6085-6090.

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*, (2012), 34, 392-399.

AENOR. "UNE-EN 13279. Yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción.

Asociación Mundial del Acero (WorldSteel in Figures 2018).

Asociación Mundial del Acero (WorldSteel)

B. Guan B, Q. Ye J. Zhang W. Lou Z Wu. Interaction between  $\alpha$ -calcium sulfate hemihydrate and superplasticizer from the point of adsorption

characteristics, hydration and hardening process. Cement Concrete Research,(2010), 40, 253–259.

Bianca L, Serraa V, Fantuccia S, Duttob M, Massolino M (2015): Thermal insulating plaster as a solution for refurbishing historic building envelopes: first experimental results.

Buchaman AH, Abu AK (2017) Structural design for dire safety, 2nd edn. Wiley, University of Canterbury, New Zeland

Carvalho MTM, Leles MIG, Tubino RMC. Tg and DSC studies on plaster residues as recycled material. J Therm Anal Calorim 2008;91(2):621–5.

CEDEX Ministerio de Fomento.

CELSA, Badische Stahl-Engineering GmbH y ADEC GLOBAL

Ciudad A, Lacasta A.M, Haurie L, Formosa J, Chimenos J.M. Improvement of passive fire protection in a gypsum panel by adding inorganic fillers: Experiment and theory. Applied Thermal Engineering 31 (2011)

Dalmay P, Smith A, Chotard T, Sahay-Turner P, Gloaguen V, Krausz P (2010) Properties of cellulosic fibre reinforced plaster: influence of hemp or flax fibres on the properties of set gypsum. J Master Sci 45:793-803.

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

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

EN 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.

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

EN ISO 1182:2010 Ensayos de reacción al fuego de productos. Ensayo de no combustibilidad.

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

Escalante-Garcia J.I., Magallanes-Rivera R.X., Gorokhovskiy A., Waste gypsum-blast furnace slag cement in mortars with granulated slag and silica sand as aggregates. *Constr Build Mater* 2009;23:2851-5.

European Steel in Figures 2020. Handbook, The European Steel Association (EUROFER).

F. Puertas. Escorias de alto horno: composición y comportamiento hidráulico. *Materiales de Construcción*, (2012), 43, 37-48.

F.J. González Madariaga, J.L. Macía. EPS (expanded polystyrene) recycled beads mixed with plaster or stucco, some applications in building industry. *Informes de la Construcción*. (2008), 60, 35-43.

Fangrat J (2017) On non combustibility of commercial building materials. *Fire Mater* 41:99-110.

Fire behavior of regular and latent heat storage gypsum boards. D. A. Kontogeorgos, I. D. Mandilaras and M. A. Founti. *Fire Mater*. 2015; 39:507–517. DOI: 10.1002/fam.2246

García, J. (2017) Elaboración de morteros de cal y bastardos para albañilería fabricados con áridos siderúrgicos.

Gruyaert E, Robeyst N, De Belie N. Study of the hydration of Portland cement blended with blast-furnace slag by calorimetry and thermogravimetry. *J Therm Anal Calor* 2010;102(3):941-51.

Gutiérrez-González S, Gadea J, Rodríguez A, Blanco-Varela M.T, Calderón, V. Compatibility between gypsum and polyamide powder waste to produce lightweight plaster with enhanced thermal properties. *Constr Build Mater* 2012;34:179. OTRA, es la misma otra vez

Gutiérrez-González S, Gadea J, Rodríguez A, Blanco-Varela M.T, Calderón, V. Compatibility between gypsum and polyamide powder waste to produce lightweight plaster with enhanced thermal properties. *Constr Build Mater* 2012;34:179-85. PONER OTRA

H. Begliardo, M. Sánchez, C. Panigatti, S. Garrappa. Reuse of recovered construction gypsum plaster: a study based on aptitude requirements of argentine and Chilean standards. *Revista de la Construcción*, (2013), 12, 3.

H. Uysal, R. Demirboğa, R. Şahin, R. Gül The effects of different cement dosages, slumps, and pumice aggregate ratios on the thermal conductivity and density of concrete, *Cement and Concrete Research*, Volume 34, Issue 5, May 2004

Herrero S, Mayor P, Hernández-Olivares F. Influence of proportion and particle size gradation of rubber from end-of-life tires on mechanical, thermal and acoustic properties of plaster-rubber mortars. *Mater Des* 2013;47,633–42.

I. Lancellotti, F. Piccolo, K. Traven, M. Češnovar, V. Ducman, C. Leonelli. Alkali activation of metallurgical slags: Reactivity, chemical behavior, and environmental assessment. *Materials*, (2021), 14, 639.

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*, (2018), 188, 210-220.

J. Maia. N. M.M.Ramos, P. de Freitas Vasco, A. Sousa. Laboratory Tests and Potential of Thermal Insulation Plasters. *Energy Procedia*, (2015), 78, 2724-2729.

J. Zhao, D. Wang, P. Yan, D. Zhang, H. Wang. Self-cementitious property of steel slag powder blended with gypsum. *Construction and Building Materials*, (2016), 113, 835-842.

J.Geiseler. Use of steelworks slag in Europe. *Waste Management*, (1996), 16, 59-63.

Katsoulis C, Kandare E, Kandola BK (2011) The combined effect of epoxy nanocomposites and phosphorus flame retardant additives on thermal and fire reaction properties of fiber-reinforced composites. *J Fire Sci* 29(4):361-383.

Kontogeorgos D, Ghazi Wakili K, Hugi E, Founti M. Heat and moisture transfer through a steel stud gypsum board assembly exposed to fire. *Construction and Building Materials* 26 (2012)

L. Alameda, V. Calderón, C. Junco, J. Gadea, S. Gutiérrez-González. Characterization of gypsum plasterboard with polyurethane foam waste reinforced with polypropylene fibers. *Materiales de Construcción*, (2016), 66. 324.

L. Contrafatto, S. Gazzo, A. Purrazzo, A. Gagliano. Thermo-mechanical characterization of insulating bio-plasters containing recycled volcanic pyroclasts. *Open Civil Engineering Journal*, (2020), 14, 66-77.

L. Xu, J.Guan, J, H. Yuan, W. Gu, S. Cui, Z. Liu. Mechanical performance of gypsum plaster composite materials reinforced by non-metallic powder

recycled from waste printed circuit board. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, (2017), 11, 2439-2446.

Lewry AJ, Williamson J. The setting of gypsum plasters. The effect of additives and impurities.

M. Hognies, S. Gutiérrez-González, A. Rodríguez, V. Calderón. Effects of the use of polyamide powder wastes on the microstructure and macroscopic properties of masonry mortars. *Cement and Concrete Composites*, (2014), 52, 64-72.

M.A. Pedreño-Rojas, C. Rodríguez-Liñán, I. Flores-Colen, J. de Brito. Use of polycarbonate waste as aggregate in recycled gypsum plasters. *Materials* (2020), 13, 3042.

M.A. Salas, H. Pérez-Acebo, V. Calderón, H. Gonzalo-Orden. Bitumen modified with recycled polyurethane foam for employment in hot mix asphalt. *Ingeniería e Investigación*, (2018), 38, 60-66.

Madias, J. (2009) "Reciclado de polvos de horno eléctrico". *Acero latinoamericano* 23(513):38.

Ministerio de transporte, movilidad y agenda urbana. Transporte terrestre. Marco de referencia del sector. Inspección y seguridad en el transporte. Peso y dimensiones

O. Najm, H. El-Hassan, A. El-Dieb. Ladle slag characteristics and use in mortar and concrete: A comprehensive review. *Journal of Cleaner Production*, (2021), 288, 125584.

Observatorio de costes del transporte de mercancías (2020).

R.H. Geraldo, J.D. Souza, S. C. Campos, L.F.R. Fernandes, G. Camarini, G. Pressured recycled gypsum plaster and wastes: Characteristics of eco-

---

friendly building components. *Construction and Building Materials* (2018) 191, 136-144.

Rodríguez A, Gutierrez-Gonzalez S, Prieto M.I, Cobo A, Calderón V. Analysis of long-term corrosion behavior in mortars containing recycled ladle furnace slag using computerized tomography and SEM. *Materials Corrosion*. Volume 66, Issue 3, pages 199–205, 2015. doi: 10.1002/maco.201407697

S. Barbero, M.Dutto, C. Ferrua, A. Pereno. Analysis on existent thermal insulating plasters towards innovative applications: Evaluation methodology for a real cost-performance comparison. *Energy and Buildings*, (2014), 77, 40-47.

S. Duan, H. Liao, F. E. Cheng, H. Song, H. Yang. Investigation into the synergistic effects in hydrated gelling systems containing fly ash, desulfurization gypsum and steel slag. *Construction and Building Materials*, (2018), 187, 1113-1120.

S. Gismera, M.M. Alonso, M. Palacios, F. Puertas. Rheology of alkali-activated mortars: Influence of particle size and nature of aggregates. *Minerals*, (2020), 10, 1-15.

S. Gutiérrez-González, J. Gadea, A. Rodríguez, M.T. Blanco-Varela, V. Calderón. Compatibility between gypsum and polyamide waste to produce lightweight plaster with enhanced thermal properties. *Construction Building Materials*, (2013), 34, 179–185.

S. Gutiérrez-González, M. Alonso, J. Gadea, A. Rodríguez, V. Calderón, V. Rheological behaviour of gypsum plaster with polyamide powder wastes. *Construction and Building Materials*, (2013), 38, 407-412.

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

T. Wang, K. Wu, M. Wu. Development of green binder systems based on flue gas desulfurization gypsum and fly ash incorporating slag or steel slag powders. *Construction and Building Materials*, (2020), 265, 120275.

Thomas G. Thermal properties of gypsum plasterboard at high temperatures. *Fire Mater.* 2002.

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

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

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

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

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

UNE-EN 13279-1:2014 Yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para construcción.

UNE-EN 13279-1:2014 Yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para construcción.

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

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

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

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

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

Yu QL, Brouwers HJH (2012): Thermal properties and microstructure of gypsum board and its dehydration products: a theoretical and experimental investigation.

Zimolo, D. and Tomadin, L. (2013) EAF slag recovery turns a waste disposal problema into a business opportunity. 44th ABM Steelmaking Seminar.





## **ANEXO II**

### **Índice de tablas, gráficos y figuras**



## **ANEXO II: ÍNDICE DE TABLAS, FIGURAS Y GRÁFICOS**

### ***Índice de Tablas***

Tabla 5.1. Distribución del material por volúmenes. ....	47
Tabla 5.2. Composición química del yeso determinada por difracción de rayos x. ....	48
Tabla 5.3. Caracterización física de las escorias blancas. ....	50
Tabla 5.4. Caracterización química de las escorias blancas. ....	52
Tabla 5.5. Composición química FRX de las escorias blancas. ....	53
Tabla 5.6. Composición química DRX de las escorias blancas. ....	54
Tabla 5.7. Composición mineralógica por DRX de las escorias blancas. ....	54
Tabla 5.8. Caracterización física de las escorias negras. ....	59
Tabla 5.9. Caracterización química de las escorias negras. ....	59
Tabla 5.10. Composición química FRX de las escorias negras de alto horno. ....	60
Tabla 5.11. Composición química FRX de las escorias negras de alto horno. ....	61
Tabla 5.12. Aditivos empleados en el estudio. ....	63
Tabla 5.13. Características del aditivo SikaMix W-10. ....	63
Tabla 5.14. Características SikaLatex. ....	64
Tabla 6.1. Dosificaciones de las muestras a estudiar. ....	70
Tabla 6.2. Relación agua/conglomerante obtenida en la mesa de sacudidas. ....	72
Tabla 6.3. Principio de fraguado de cada muestra obtenido por método cono de Vicat. ....	74
Tabla 6.4. Densidad en fresco de las muestras. ....	76
Tabla 6.5. Densidad aparente y densidad real. ....	78
Tabla 6.6. Capacidad de retención de agua % de las muestras. ....	81
Tabla 6.7. Dureza superficial Shore C de las muestras. ....	83

Tabla 6.8. Resistencias mecánicas a flexión y compresión de las muestras.....	85
Tabla 6.9. Adherencia de las muestras.....	89
Tabla 6.10. Permeabilidad al vapor de agua de las muestras.....	92
Tabla 6.11. Porosidad y diámetro crítico de poros de las muestras.....	93
Tabla 7.1. Dosificaciones de las muestras a estudiar.....	110
Tabla 7.2. Relación agua/conglomerante obtenida en la mesa de sacudidas.....	113
Tabla 7.3. Principio de fraguado de cada muestra obtenido por método cono de Vicat.....	115
Tabla 7.4. Densidad en fresco de las muestras.....	117
Tabla 7.5. Densidad aparente a los 7 días y a los 28 días.....	118
Tabla 7.6. Capacidad de retención de agua % de las muestras.....	121
Tabla 7.7. Dureza superficial Shore C de las muestras.....	122
Tabla 7.8. Resistencias mecánicas a flexión y compresión de las muestras.....	125
Tabla 7.9. Adherencia de las muestras.....	128
Tabla 7.10. Permeabilidad al vapor de agua de las muestras.....	131
Tabla 8.1. Dosificaciones y propiedades físicas de las muestras para las placas de yeso.....	140
Tabla 8.2. Resultados de las propiedades físicas de las placas de yeso con escoria blanca.....	149
Tabla 8.3. Resultados ensayos reacción frente al fuego de las dosificaciones.....	154
Tabla 8.4. Resultados después de los ensayos de no combustibilidad.....	157
Tabla 9.1. Cantidad de material empleado para elaborar 1 m <sup>2</sup> de producto.....	166
Tabla 9.2. Coste transformación escorias.....	168
Tabla 9.3. Coste de las materias primas.....	169
Tabla 9.4. Coste del transporte de las ecorias blancas y negras.....	170

Tabla 9.5. Coste del transporte de las ecorias blancas y negras en tramos. .....	171
Tabla 9.6. Coste total de la fabricación de 1 m <sup>2</sup> de pared del producto. .....	172
Tabla 9.7. Coste total de la fabricación de 1 m <sup>2</sup> de pared del producto a 100 km.....	173
Tabla 9.8. Coste total de la fabricación de 1 m <sup>2</sup> de pared del producto a 500 km.....	174
Tabla 9.9. Coste total de la fabricación de 1 m <sup>2</sup> de pared del producto a 1000 km.....	175



## **Índice de Gráficos**

Gráfica 6.1. Comparativa tiempos de fraguado.....	75
Gráfica 6.2. Comparativa de las densidades en fresco. ....	77
Gráfica 6.3. Comparativa de las densidades aparentes. ....	79
Gráfica 6.4. Comparativa de las densidades reales. ....	80
Gráfica 6.5. Comparativa retención de agua %. ....	82
Gráfica 6.6. Comparativa dureza Shore C. ....	84
Gráfica 6.7. Comparativa resistencias mecánicas. ....	86
Gráfica 6.8. Comparativa adherencia sobre cerámico.....	90
Gráfica 6.9. Comparativa permeabilidad al vapor de agua.....	92
Gráfica 6.10. Comparativa porosidad total en%.....	93
Gráfica 7.1. Comparativa tiempos de fraguado.....	115
Gráfica 7.2 Comparativa de las densidades en fresco. ....	117
Gráfica 7.3. Comparativa de las densidades aparentes a los 7 días. ...	119
Gráfica 7.4. Comparativa de las densidades aparentes a los 28 días. ....	120
Gráfica 7.5. Comparativa retención de agua %. ....	121
Gráfica 7.6. Dureza superficial Shore C.....	123
Gráfica 7.7. Comparativa resistencias mecánicas a flexión y compresión. .....	126
Gráfica 7.8. Comparativa adherencia sobre cerámico.....	128
Gráfica 7.9. Comparativa permeabilidad al vapor de agua.....	131
Gráfica 8.1. Relación entre el % de escoria y la resistencia a flexión. ....	150
Gráfica 8.2. TGA de las líneas de degradación de todas las muestras. .....	152
Gráfica 8.3. Comparación perdida masa Horno-TGA a 750°C.....	159
Gráfica 9.1. Comparativa coste total de la fabricación de 1 m <sup>2</sup> de pared. .....	172
Gráfica 9.2. Comparativa coste total de la fabricación de 1 m <sup>2</sup> de pared a 100 km.....	173

Anexo II

---

Gráfica 9.3. Comparativa coste total de la fabricación de 1 m <sup>2</sup> de pared a 500 km.....	174
Gráfica 9.4. Comparativa coste total de la fabricación de 1 m <sup>2</sup> de pared a 1000 km.....	175

## **Índice de Figuras**

Figura 2.1. Consumos del sector del acero por actividad económica, en millones de toneladas. Fuente: EUROFER. ....	11
Figura 2.2.. Producción de acero y de escoria en los 10 últimos años en Europa, en millones de toneladas. Fuente: EUROFER. ....	12
Figura 2.3. Esquema de producción de acero y de escoria.....	13
Figura 2.4. Rutas de valorización de escorias. ....	17
Figura 2.5. Esquema clasificación yesos de construcción.....	20
Figura 4.1. Amasadora y mesa de sacudidas. ....	35
Figura 4.2. Cono de Vicat. ....	36
Figura 4.3. Durómetro Shore C. ....	37
Figura 4.4. Ensayos de resistencia a flexión y compresión. ....	38
Figura 4.5. Ensayos de adherencia sobre cerámico.....	38
Figura 4.6. Ensayos de permeabilidad al vapor.....	39
Figura 5.1. Yeso B1/2/20 utilizado en la experimentación.....	46
Figura 5.2. Imagen gráfica de volumen acumulado por partículas de yeso. ....	47
Figura 5.3. Aspecto inicial de las escorias blancas.....	49
Figura 5.4. Aspecto final después del tratamiento de las escorias blancas. ....	50
Figura 5.5. Granulometría y distribución por tamaños de las escorias blancas.....	51
Figura 5.6. Microscopía electrónica de barrido de las escorias blancas. ....	55
Figura 5.7. Detalle de la granulometría y superficie de las escorias blancas.....	56
Figura 5.8. Aspecto de las escorias negras de alto horno de arco eléctrico. ....	58
Figura 5.9. Detalle de la granulometría y superficie de las escorias negras. ....	62

Figura 6.1. Amasadora mecánica programable. ....	71
Figura 6.2. BSE muestra de serie PS40. ....	87
Figura 6.3. Curva de volumen intrusivo acumulativo del diámetro de poros en $\mu\text{m}$ . ....	94
Figura 6.4. Curva de distribución diferencial del diámetro de poros en $\mu\text{m}$ . ....	95
Figura 6.5. Distribución volumen intrusivo total del diámetro de poros en $\mu\text{m}$ . ....	96
Figura 6.6. Área de la muestra PS40 con agragación de LFS en la matriz (a y b) y mapa de ambas áreas con EDX (a' y b'). ....	98
Figura 6.7. TGA de la degradación de las muestras sin aditivos. ....	100
Figura 7.1. Escorias negras después de tamizar. ....	109
Figura 7.2. Amasadora mecánica programable. ....	111
Figura 7.3. Consistencia y relación a/c muestra PS80. ....	113
Figura 7.4. Principio de fraguado cono de Vicat de la muestra PS20. .	114
Figura 7.5. Probetas normalizadas para los ensayos de resistencias mecánicas. ....	123
Figura 7.6. Probetas ensayo resistencia mecánica a flexión. ....	124
Figura 7.7. Probetas ensayo resistencia mecánica a compresión. ....	124
Figura 7.8. Fases del ensayo de adherencia en las muestras. ....	127
Figura 7.9. Probetas cilíndricas para el ensayo de permeabilidad. ....	130
Figura 8.1. Ensayo comportamiento térmico en dos caras de placa. ...	144
Figura 8.2. Realización del ensayo de no combustibilidad. ....	147
Figura 8.3. Detalles de las muestras y colocación en el horno. ....	147
Figura 8.4. Muestras del ensayo resistencia al impacto de PBS20, PBS40, PBS60. ....	151
Figura 8.5. Muestras antes y después del ensayo de no combustibilidad. ....	157
Figura 8.6. Muestra PBS40:superficie yeso-escoria-microestructura matriz-mapeo y composición. ....	158

Figura 9.1. Esquema de la instalación para el proceso de transformación de la escoria..... 167





# **ANEXO III**

## **Producción científica**



---

## ANEXO III: PRODUCCIÓN CIENTÍFICA

### *Producción científica ligada a la Tesis Doctoral*

---

#### Artículos

A. Alonso, A. Rodríguez, J. Gadea, S. Gutiérrez-González y V. Calderón. Departamento de Construcciones Arquitectónicas e I.C.T, Escuela Politécnica Superior, Universidad de Burgos (2019). “**Impact of Pasterboard with Ladle Furnace Slag on Fire Reaction and Thermal Behavior**”. Fire Technology. 55, pages1733–1751.

<https://doi.org/10.1007/s10694-019-00828-6>

#### Patentes

**ES1227514 U. “Placa de yeso prefabricada de alta resistencia al fuego”**. Álvaro Alonso Díez, Verónica Calderón Carpintero, Ángel Rodríguez Saiz, Sara Gutiérrez-González, Jesús Gadea Sáinz, Carlos Junco Petrement. (2019)

#### Congresos

Isabel Santamaría-Vicario, Ángel Rodríguez, Juan García-Cuadrado, Álvaro Alonso-Díez. Dpto. Construcciones Arquitectónicas e ICT, Universidad de Burgos (2016). “**Influencia de la porosidad en el comportamiento de morteros fabricados con escorias de acería en ambientes húmedos**”. Congreso Internacional de Innovación Tecnológica en Edificación CITE 2016. 4th International Conference on Technological Innovation in Building.

Ángel Rodríguez Saiz, Isabel Santamaría-Vicario, Álvaro Alonso Díez, Sara Gutiérrez-González, Verónica Calderón Carpintero. “**Design of new materials for the protection of construction units of residential buildings against fire action**”. REHABEND2020. 8th Euro-American Congress. Construction Pathology, Rehabilitation Technology and Heritage Management. Granada.

Álvaro Alonso Díez, Verónica Calderón Carpintero, Ángel Rodríguez Sáiz. **“Comportamiento térmico de placas ecológicas de yeso con escorias blancas de acería”**. CITE 2021. VI International Conference on Technological Innovation in Building.



