



UNIVERSIDAD DE BURGOS
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR
DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIONES ARQUITECTÓNICAS
E INGENIERÍA DE LA CONSTRUCCIÓN Y DEL TERRENO

TESIS DOCTORAL

**Fabricación de morteros de
albañilería con escoria negra de
horno eléctrico de arco EAF y
escoria blanca de horno cuchara LF**

ISABEL SANTAMARÍA VICARIO

Directores:

Dr. Ángel Rodríguez Sáiz

Dra. Verónica Calderón Carpintero

Burgos, abril de 2015



D. Ángel Rodríguez Sáiz, Profesor Titular Doctor y **Dña. Verónica Calderón Carpintero**, Profesora Titular Doctora, del Área de Construcciones Arquitectónicas del Departamento de Construcciones Arquitectónicas e Ingeniería de la Construcción y del Terreno de la Escuela Politécnica Superior de la Universidad de Burgos,

INFORMAN:

Que la presente Memoria titulada “**FABRICACIÓN DE MORTEROS DE ALBAÑILERÍA CON ESCORIA NEGRA DE HORNO ELÉCTRICO DE ARCO EAF Y ESCORIA BLANCA DE HORNO CUCHARA LF**” se ha realizado en el Departamento de Construcciones Arquitectónicas e Ingeniería de la Construcción y del Terreno de la Universidad de Burgos, bajo su dirección, por la Arquitecta Técnica Dña. Isabel Santamaría Vicario y autorizan su presentación para que sea calificada como TESIS DOCTORAL.

Burgos, 14 de abril de 2015

Fdo.: Dr. Ángel Rodríguez Sáiz Fdo.: Dra. Verónica Calderón Carpintero

A mi marido, Sergio
y nuestros hijos, Silvia, Diego y Óscar

A mis padres, Pedro Luis y Maura
y hermanos, David, Elena e Inés

Agradecimientos

Concluir esta Tesis Doctoral sólo ha sido posible después de un largo periodo de trabajo, por lo que espero poder reflejar en estas líneas toda mi gratitud hacia aquellos que me han ayudado a que sea posible.

En primer lugar quiero expresar mi más sincero agradecimiento a Ángel Rodríguez Sáiz, director de esta Tesis Doctoral, por la confianza que ha depositado en mí durante todos estos años, por inculcarme el espíritu científico e investigador, por el apoyo incondicional, consejos, dedicación y trabajo. Por estar siempre ahí, gracias Ángel.

A Verónica Calderón Carpintero, codirectora, por su experiencia y conocimientos, sin los cuales no hubiera podido desarrollar esta Tesis, por el tiempo dedicado en unos momentos personales, en los que todo lo demás es secundario, gracias.

A mis compañeros del Laboratorio de Materiales de Construcción y Construcciones Arquitectónicas, José Luis Díez Campo, Pablo Campos de la Fuente, Jorge Hernández Bagaces y José Miguel Solaguren-Beascoa. Gracias por vuestra ayuda en la realización de los ensayos, por el tiempo dedicado, por estar siempre para echar una mano y por supuesto, por los “buenos momentos” de laboratorio.

A mis compañeros del Departamento de Construcciones Arquitectónicas e Ingeniería de la Construcción y del Terreno, por el ánimo transmitido y la preocupación mostrada en todo momento por los avances en mi trabajo, en especial a José Antonio de la Fuente Alonso y Julián Becerril García, por su paciencia, colaboración y apoyo, a todos, gracias.

A Maricruz Bilbao León, compañera de la Universidad de Burgos, por haber accedido con gran interés a revisar este trabajo, constatando la manera *especial* que tenemos los técnicos a la hora de expresarnos, gracias por tus aportaciones y sugerencias.

Por último, deseo expresar mi agradecimiento a las empresas que han contribuido generosamente suministrando las materias primas empleadas en esta Tesis: Cementos Alfa, Arenas industriales de Montorio, Hormor áridos, SIKA (COPSA).

GRACIAS

Resumen

La industria metalúrgica genera grandes cantidades de residuos en forma de *escorias siderúrgicas*. Debido al progresivo aumento en la fabricación de acero, los residuos producidos no se pueden reutilizar en otras actividades industriales, y se ha recurrido a su depósito masivo en acopios y vertederos, creando un inconveniente medioambiental importante.

En el caso concreto de España, la fabricación de acero se basa prácticamente en el reciclaje de chatarra, de tal manera que un 75% de su producción proviene de hornos eléctricos de arco. Por este motivo esta Tesis Doctoral estudia la valorización de los residuos que se obtienen en estos hornos, es decir, se plantean alternativas para la reutilización de las escorias y con ello frenar el deterioro del entorno natural.

En el horno eléctrico de arco se genera, en un primer proceso de fusión, el residuo conocido como "*escoria negra EAF*". En el posterior afino de las coladas obtenidas, se procede al ajuste de su composición en hornos refractarios denominados hornos cuchara, formándose un segundo tipo de residuo denominado "*escoria blanca LF*".

Por otra parte, la industria de la construcción consume una gran cantidad de recursos naturales. La extracción de áridos naturales empleados en la fabricación de hormigones y morteros se encuentra sometida a una problemática creciente, debido tanto al progresivo agotamiento de las canteras, como a la aplicación de normativas cada vez más exigentes por parte de las Administraciones Públicas.

Es evidente que entre la industria siderúrgica y la construcción existe una afinidad con necesidades recíprocas que, si se investigan y estudian, podrían evitar tanto la acumulación de las escorias en vertederos, como la extracción y consumo de áridos naturales.

Durante los últimos años se han desarrollado trabajos que avalan el uso de escorias como áridos siderúrgicos para su uso, sobre todo, en hormigones y en menor medida en morteros.

La investigación que recoge la presente Tesis Doctoral desarrolla un estudio experimental para obtener morteros de albañilería utilizando como árido una mezcla de escoria negra EAF y escoria blanca LF, de manera conjunta, con el objetivo de conseguir mezclas con prestaciones similares a las de los morteros convencionales.

El objetivo es diseñar un "mortero seco industrial", de consistencia plástica y una resistencia de, como mínimo, 5 N/mm^2 . Para conseguirlo se parte de una dosificación en peso de sus componentes 1/6 (1 parte de cemento y 6 partes de árido), y se consideran diferentes posibilidades de sustitución del árido natural por árido siderúrgico (25%, 50%, 75% y 100%), empleando además aditivos comerciales en las mezclas.

Se realiza un estudio comparativo de las propiedades más significativas de los morteros, tales como la trabajabilidad, permeabilidad, adherencia y resistencias mecánicas, entre aquellos elaborados con áridos naturales y los fabricados con escorias.

Los resultados indican que se pueden obtener morteros técnicamente viables para su uso en construcción y edificación, y de esta manera lograr una reutilización y puesta en valor de unos residuos que, de otro modo se destinarían a vertedero.

Una vez diseñados los morteros, se procede a estudiar los efectos del envejecimiento acelerado en los mismos. Se analiza la durabilidad y comportamiento frente a ciclos hielo-deshielo, humedad-sequedad, ambiente marino, cristalización de sales y atmósferas industriales.

Para ello, además de la realización de los correspondientes ensayos y una vez finalizados éstos, se ensayan las muestras a flexión y compresión, y se cotejan los resultados obtenidos con las resistencias mecánicas a 90 días de curado. El estudio confirma la viabilidad de la elaboración de morteros con áridos siderúrgicos.

Por último se realiza un estudio económico de los morteros elaborados con áridos siderúrgicos, planteando para ello varias opciones de distancia al centro de producción de escorias.

Palabras clave:

Escorias de acería, escoria negra EAF, escoria blanca LF, árido siderúrgico, morteros de albañilería, trabajabilidad, permeabilidad, adherencia, resistencias mecánicas, durabilidad.

Abstract

The metallurgy industry generates great amounts of waste in the form of *steelworks slag*. Due to the progressive rise in the manufacture of steel, the waste produced cannot be reused for other industrial processes and, thus, we have resorted to its bulk storage in stockpiles and dumps; this, in turn, brings about great environmental concern.

In the case of Spain, steel manufacture is based almost entirely around the recycling of scrap, with 75% of production coming from electric arc furnaces. For this reason, this Doctoral Thesis studies the waste obtained from said furnaces. That is to say, alternative ways for slag to be reused are considered in hopes of slowing the damage done to the natural environment.

The Electric Arc Furnace produces a waste known as “*EAF black slag*” in the first fusion process. In the subsequent refining of the cast obtained, composition adjustment is undertaken in refractory ovens known as Ladle Furnaces, with a second type of waste being formed which is called “*LF white slag*.”

In addition, the construction industry uses an incredible amount of natural resources. The extraction of natural aggregates (sand and gravel) used for the manufacture of concrete and mortar is facing a growing problem due to both the progressive depletion of quarries and the application of increasingly stringent regulations by governments.

It is obvious that, in the steelworks and construction industries, there is a relationship with reciprocal needs which, if researched and studied, could put an end to both the accumulation of slag in dumps and the extraction and consumption of natural aggregates.

Over the last few years, research has been carried out which backs up the use of slags –steelworks slag aggregate– in, mainly, concrete and, to a lesser degree, mortar.

The research carried out under this Doctoral Thesis developed an experimental study to obtain masonry mortar using a mix of EAF black slag and LF white slag together as an aggregate, with the aim of obtaining mixtures whose performance is similar to that of conventional mortars.

The goal was to design a “dry industrial mortar,” with plastic consistency and whose resistance was, at minimum, 5 N/mm². To achieve this goal, a 1/6 dosage by component weight (1 part cement and 6 parts aggregate) and different possibilities for the substitution of natural aggregates by steelworks slag aggregates (25%, 50%, 75%, and 100%) were used, with commercial additives also being employed in the mixtures.

A comparative study was carried out between the mixtures composed of natural aggregates and those which had slag to compare the most

significant properties of the mortars, such as workability, permeability, adherence, and mechanical resistance.

The results indicated that mortars which are technically viable can be obtained for construction and building use and, in this way, we can manage to reuse and give new value to waste which would otherwise be sent to a dump.

Once the mortars were designed, the effects of accelerated aging on them were studied. Their durability and behavior when faced with freeze-thaw cycles, wet-dry cycles, ocean environments, salt crystallization, and industrial atmospheres were analyzed.

To accomplish this, in addition to carrying out the corresponding tests and, once said tests were finalized, the samples underwent a bend and compression test and the results obtained were checked against the mechanical resistance at 90 days of aging. The study confirmed that it is viable to use steelworks slag aggregates in mortar.

Lastly, the mortars made with steelworks slag aggregates underwent economic analysis, taking into account several distance variables from the slag production center.

Keywords:

Steelworks slag, EAF slag, LF slag, slag aggregate, masonry mortars, workability, permeability, adherence, mechanical resistance, durability.

Índice

1. INTRODUCCIÓN	3
1.1. JUSTIFICACIÓN	3
1.2. ESTRUCTURA DE LA TESIS	5
2. ESTADO DEL ARTE Y OBJETIVOS	9
2.1. ESCORIAS SIDERÚRGICAS	9
2.1.1. Introducción	9
2.1.2. Producción de acero y escoria	10
2.1.3. Escorias siderúrgicas	18
2.1.3.1. Escoria siderúrgica de horno alto BF	18
2.1.3.2. Escoria de convertidor de oxígeno BOF o escorias de acería LD	19
2.1.3.3. Escoria de convertidor AOD, VOD	21
2.1.3.4. Escoria de cubilote	22
2.1.4. Escorias de acería eléctrica (EAF y LF)	22
2.1.4.1. Introducción y generación	22
2.1.4.2. Producción	24
2.1.4.3. Composición química de escorias EAF y LF	27
2.1.4.4. Composición mineralógica	32
2.1.4.5. Propiedades físicas	34
2.1.4.6. Estabilidad volumétrica	35
2.1.4.7. Valorización y aplicaciones	38
2.2. MORTEROS DE ALBAÑILERÍA	41
2.2.1. Breve reseña histórica	41
2.2.2. Concepto de mortero	43
2.2.2.1. Conglomerante	44
2.2.2.2. Agua	45
2.2.2.3. Áridos	45
2.2.2.4. Adiciones	51
2.2.2.5. Aditivos	51
2.2.3. Morteros para fábricas de albañilería	53

2.3. OBJETIVOS.....	55
2.3.1. Antecedentes.....	55
2.3.2. Objetivos.....	60
3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	65
3.1. INTRODUCCIÓN	65
3.2. PROPIEDADES DEL MORTERO FRESCO	65
3.2.1. Consistencia del mortero fresco	65
3.2.2. Trabajabilidad	67
3.2.3. Retención de agua	68
3.2.4. Densidad aparente del mortero fresco	70
3.2.5. Contenido de aire ocluido	71
3.3. PROPIEDADES DEL MORTERO ENDURECIDO.....	72
3.3.1. Densidad aparente en seco mortero endurecido.....	72
3.3.2. Resistencia mecánica a flexión y a compresión	74
3.3.3. Absorción de agua.....	76
3.3.3.1. Absorción de agua por capilaridad	76
3.3.3.2. Absorción de agua a presión atmosférica	78
3.3.4. Adherencia del mortero endurecido.....	79
3.3.5. Permeabilidad al vapor de agua	80
3.4. CARACTERIZACIÓN QUÍMICA Y MICROSCÓPICA.....	82
3.4.1. Microscopía electrónica de barrido (MEB).....	82
3.4.2. Composición elemental por energía dispersa de rayos X84	
3.4.3. Difracción de rayos X (DRX).....	84
3.4.4. Fluorescencia de rayos X (FRX).....	84
3.4.5. Análisis termogravimétrico (TGA).....	85
3.4.6. Tomografía axial computerizada (TAC).....	85
3.4.7. Porosimetría de intrusión de mercurio (MIP)	85
3.5. DURABILIDAD DE MORTEROS	86
3.5.1. Heladicidad.....	86
3.5.2. Choque térmico	87
3.5.3. Agua salina.....	89
3.5.4. Cristalización de sales	90
3.5.5. Atmósfera industrial. Ensayo Kesternich	91

4. CARACTERIZACIÓN DE MATERIAS PRIMAS	95
4.1. CONGLOMERANTE	95
4.2. AGUA.....	97
4.3. ÁRIDO NATURAL	98
4.4. ESCORIA NEGRA DE HORNO ELÉCTRICO DE ARCO (EAF)	101
4.4.1. Caracterización física	102
4.4.2. Caracterización química	103
4.4.3. Difracción de rayos X (DRX).....	104
4.4.4. Fluorescencia de rayos X (FRX).....	104
4.4.5. Microscopía electrónica de barrido (MEB).....	105
4.4.6. Microanálisis por energía dispersa de rayos X.....	106
4.4.7. Análisis termogravimétrico (TGA).....	107
4.5. ESCORIA BLANCA DE HORNO CUCHARA (LF).....	109
4.5.1. Caracterización física	109
4.5.2. Caracterización química	110
4.5.3. Difracción de rayos X (DRX).....	110
4.5.4. Fluorescencia de rayos X (FRX).....	111
4.5.5. Microscopía electrónica de barrido (MEB).....	112
4.5.6. Microanálisis por energía dispersa de rayos X.....	113
4.5.7. Análisis termogravimétrico (TGA).....	114
4.6. ADITIVOS	116
4.6.1. Cimsil C22	117
4.6.2. PremorterMix 201	117
4.6.3. PremorterMix 202	117
4.6.4. PremorterMix 100	118
4.6.5. PremorterMix 112	118
4.6.6. Preflow 1000.....	118
5. FABRICACIÓN Y DOSIFICACIÓN	121
5.1. ELABORACIÓN DE LOS MORTEROS	121
5.1.1. Equipos de laboratorio utilizados en los ensayos	121
5.1.2. Procedimiento operatorio.....	121
5.1.2.1. Preparación de los materiales	121
5.1.2.2. Amasado del mortero	122

5.1.2.3.	Preparación de las probetas.....	123
5.2.	DOSIFICACIONES EXPERIMENTALES.....	124
5.2.1.	Estudio previo de dosificación	126
5.2.1.1.	Elección de aditivos.....	128
5.2.2.	Conclusiones del estudio previo de dosificación	129
6.	CARACTERIZACIÓN DE LOS MORTEROS FABRICADOS CON	
	ÁRIDO SIDERÚRGICO.....	133
6.1.	INTRODUCCIÓN.....	133
6.2.	CARACTERIZACIÓN DEL MORTERO FRESCO	134
6.2.1.	Consistencia del mortero y relación agua/cemento	134
6.2.2.	Densidad aparente del mortero fresco	137
6.2.3.	Contenido de aire ocluido	139
6.2.4.	Tiempo de utilización o de trabajabilidad del mortero fresco.....	142
6.2.5.	Retención de agua del mortero fresco.....	146
6.3.	CARACTERIZACIÓN DEL MORTERO ENDURECIDO	149
6.3.1.	Densidad aparente seca del mortero endurecido	149
6.3.2.	Resistencias a flexión y compresión.....	151
6.3.3.	Adherencia del mortero endurecido.....	172
6.3.4.	Absorción de agua.....	177
6.3.4.1.	Absorción de agua a presión atmosférica	178
6.3.4.2.	Absorción de agua por capilaridad	180
6.3.5.	Permeabilidad al vapor de agua	185
6.4.	CARACTERIZACIÓN MICROESTRUCTURAL	190
6.4.1.	Microscopía electrónica de barrido (M.E.B.).....	190
6.4.1.1.	Introducción.....	190
6.4.1.2.	Mortero de referencia MR.....	193
6.4.1.3.	Mortero con escorias MEB	195
6.4.1.4.	Mortero con escorias MED	196
6.4.1.5.	Mortero con aditivo Cimsil C22: MEB-C22	198
6.4.1.6.	Mortero con aditivo PremorterMix 201: MEB 201	199
6.4.2.	Tomografía axial computerizada (TAC).....	200
6.4.3.	Porosimetría de intrusión de mercurio MIP	206

7. DURABILIDAD DE LOS MORTEROS.....	211
7.1. HELADICIDAD.....	211
7.1.1. Variación del volumen aparente	212
7.1.2. Inspección visual	213
7.1.3. Variación de resistencias	215
7.2. CHOQUE TÉRMICO.....	217
7.2.1. Variación del peso seco.....	217
7.2.2. Inspección visual	218
7.2.3. Variación de resistencias	219
7.3. AGUA SALINA.....	221
7.3.1. Variación del peso seco y expansión.....	221
7.3.2. Inspección visual	223
7.3.3. Variación de resistencias	226
7.4. CRISTALIZACIÓN DE SALES.....	227
7.4.1. Variación del peso seco.....	228
7.4.2. Inspección visual	229
7.4.3. Variación de resistencias	230
7.5. ATMÓSFERAS INDUSTRIALES. ENSAYO KESTERNICH	231
7.5.1. Variación del peso seco.....	232
7.5.2. Inspección visual	232
7.5.3. Variación de resistencias	234
7.6. RESISTENCIAS MECÁNICAS DESPUÉS DEL ENVEJECIMIENTO ACELERADO	235
8. ESTUDIO ECONÓMICO	241
8.1. VALORACIÓN CUANTITATIVA.....	242
8.1.1. Coste de materiales	243
8.1.2. Coste de los morteros.....	245
8.2. VALORACIÓN CUALITATIVA	250
9. CONCLUSIONES FINALES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.....	253
9.1. CONCLUSIONES FINALES	253
9.2. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	257
10. BIBLIOGRAFÍA	261

Índice

ANEXO. Índice de tablas, figuras y gráficos.....	277
---	------------

Capítulo I

Introducción

1. INTRODUCCIÓN

1.1. JUSTIFICACIÓN

Se conoce como “metalurgia del hierro” al desarrollo de las técnicas de obtención y transformación del mineral del hierro en objetos útiles para el hombre.

Sus comienzos se remontan a la denominada “Edad del Hierro”, última de las edades en las que se divide la prehistoria, que sucedió a la “Edad de Bronce” y a la “Edad de Piedra”.

El empleo de este mineral comenzó en el II milenio a.C. en Asia Menor, aunque la expansión del conocimiento por Europa y ciertas zonas de África se produce durante el siguiente milenio.

Este metal es superior al bronce en cuanto a dureza y abundancia de yacimientos. También los métodos de transformación para la obtención y empleo del hierro, el acero o bronce han evolucionado tecnológicamente a lo largo del tiempo, consiguiendo de este modo materiales de mayor calidad y prestaciones.

Para la elaboración del hierro y el acero se requiere el empleo de otros minerales no metálicos en el proceso de refinado y purificación química del hierro que, durante el proceso de fabricación, sufren transformaciones en su composición, generándose un residuo denominado “**escoria siderúrgica**”, con especiales propiedades que han sido aprovechadas a lo largo de la historia.

Así, la *escoria siderúrgica* fue empleada en la época Romana y durante la Edad Media en construcción y en obra civil. Con ella se realizaron pavimentaciones y acondicionamientos de suelos, o bien se aprovecharon en la fabricación de primitivos hormigones amasados con cal y utilizados en cimentaciones y bases.

Las propiedades hidráulicas de la escoria fueron descubiertas por Emil Langen en 1862 y comenzó una nueva era para el uso de este residuo industrial. No fue hasta principios del siglo XX, cuando la escoria fue utilizada de forma habitual en la fabricación de otros materiales útiles para el hombre¹.

No obstante, a partir del siglo XIX la elaboración intensiva de acero dio lugar a un desequilibrio en el proceso de reutilización de las escorias que, de ser un material válido, se convirtió en un inconveniente medioambiental importante. Al no poder asumir toda la producción de escoria en otras actividades industriales, se ha recurrido a su depósito masivo en acopios y

¹ EUROSLAG. "The European Association representing metallurgical slag producers and processors [<http://www.euroslag.com/>]."

vertederos, cercanos a las zonas de fabricación, lo que supone un perjuicio y deterioro del entorno natural.

Por otro lado, la extracción de los áridos naturales empleados en la fabricación de hormigones y morteros y en la construcción en general, se encuentra sometida a una problemática económica y ambiental creciente debido tanto al progresivo agotamiento de los recursos naturales obtenidos en las canteras, como a la aplicación de normativas cada vez más exigentes por parte de las Administraciones Públicas.

Según la Asociación Nacional de Empresarios Fabricantes de Áridos (ANEFA), el consumo total de áridos naturales para la construcción en el año 2013 fue de 91,7 Mtn².

Es evidente que entre la industria metalúrgica y la industria de la construcción existe una afinidad con necesidades recíprocas, de tal manera que si se investigan y desarrollan, se podría evitar tanto la acumulación de la escoria siderúrgica en acopios y vertederos, como la extracción y consumo de recursos naturales.

Por todo ello, es preciso establecer una cadena de gestión que transforme la escoria como residuo en una materia útil para otros procesos industriales, es decir, una estructura productiva que valore el producto, lo acondicione y lo transporte, integrándolo en la fabricación de otros productos aptos a un coste razonable, tanto desde el punto de vista técnico como económico.

Tal y como acreditan las investigaciones realizadas sobre las *escorias*, éstas se pueden *valorizar* como *árido siderúrgico* e introducirlas de nuevo en la cadena de producción aprovechando sus propiedades para fabricar, por ejemplo, hormigones, morteros o estabilización de suelos, dejando así de ser considerada como un residuo a eliminar.

El trabajo que recoge este documento es una forma de participar en el reto de la reutilización de las *escorias siderúrgicas*.

La motivación que justifica la presente Tesis Doctoral es avanzar en la aplicación de ciertos tipos de *escoria siderúrgica*, las **escorias negras de horno eléctrico de arco (EAF)** y las **escorias blancas de horno cuchara (LF)**, en el campo de la construcción, concretamente en la **elaboración de morteros de albañilería** con propiedades equivalentes a las de los morteros tradicionales, posibilitando de esta manera un modelo de consumo de áridos ecológicamente más sostenible que el actual, basado sobre todo en prácticas extractivas en yacimientos a cielo abierto.

² ANEFA (2014). "El sector de los áridos en 2013." Revista anual Anefa 2014(Asociación Nacional de Empresarios Fabricantes de Áridos).

1.2. ESTRUCTURA DE LA TESIS

La presente Tesis Doctoral se articula en torno a diez capítulos, tal y como se resume a continuación:

Capítulo I: Introducción

En el primer capítulo se resume el problema que justifica la investigación elaborada y se define la estructura de la Tesis Doctoral.

Capítulo II: Estado del Arte y Objetivos

En este capítulo se hace una revisión completa de las escorias siderúrgicas generadas en los procesos de fabricación del acero, sus características principales, así como las investigaciones previas relativas a su empleo en distintos campos.

Además, y debido a la orientación de la Tesis, se realiza una breve reseña historia de los morteros de albañilería, se analiza el concepto de mortero y los requisitos que deben cumplir las materias primas que lo forman.

Por último se establecen los objetivos a alcanzar en la investigación.

Capítulo III: Procedimiento experimental

En el tercer apartado de la Tesis Doctoral se reflejan los diferentes ensayos tipificados en la normativa vigente relativos a la caracterización de los morteros, así como para el estudio de su durabilidad.

Además, se describen los ensayos químicos y microscópicos realizados para conocer la estructura interna de las materias primas y los morteros, así como sus composiciones químicas.

Capítulo IV: Caracterización de las materias primas

Se analizan y reflejan las características de las materias primas empleadas en la elaboración de los morteros objeto de ensayo.

Capítulo V: Fabricación y dosificación

En este capítulo se estudian las dosificaciones experimentales de las mezclas para conseguir los objetivos fijados en el diseño, es decir, morteros de consistencia plástica y una resistencia a compresión a los 28 días de curado de, como mínimo, 5 N/mm².

Capítulo VI: Caracterización de los morteros fabricados con árido siderúrgico

Una vez finalizado el estudio previo de dosificación de los morteros, y elegidas las mezclas que se ajustan a los objetivos marcados, se desarrolla la caracterización de los morteros, tanto en estado fresco, como en estado endurecido, además del estudio microestructural de los mismos.

Capítulo VII: Durabilidad de los morteros

El séptimo capítulo se centra en aspectos relativos al envejecimiento acelerado o durabilidad de los morteros. Se estudia el comportamiento de los morteros frente a los ciclos hielo-deshielo, choque térmico, agua salina, cristalización de sales y atmósferas industriales o ensayo Kesternich.

Capítulo VIII: Estudio económico

Se realiza un estudio económico de los morteros elaborados con áridos siderúrgicos, planteando para ello varias opciones de distancia al centro de producción de escorias, concluyendo con la selección de los morteros que mejor ratio resistencia/coste tienen.

Capítulo IX: Conclusiones finales y futuras líneas de investigación

Finalmente se lleva a cabo un análisis y recopilación de todas las conclusiones obtenidas en la investigación.

Además, se proponen investigaciones futuras para continuar con el trabajo realizado y que no han podido abordarse en el transcurso de la presente Tesis Doctoral.

Capítulo X: Bibliografía

Las referencias bibliográficas aparecen a pie de página en todo el documento de la Tesis Doctoral según se citan en el texto, además se recopila en el décimo capítulo un listado de todos los autores referenciados por orden alfabético.

Capítulo II

Estado del arte y objetivos

2. ESTADO DEL ARTE Y OBJETIVOS

2.1. ESCORIAS SIDERÚRGICAS

2.1.1. Introducción

Los procesos siderúrgicos de fabricación tienen como objetivo final obtener acero. Éste se puede conseguir utilizando dos sistemas de producción con tecnologías perfectamente diferenciadas: mediante horno alto (proceso integral) o con horno eléctrico (ver Figura 2.1).

De igual forma, las materias primas utilizadas en la fabricación del acero pueden provenir, bien del arrabio, obtenido de minerales de hierro, coque y fundentes, como de pre-reducidos de chatarra compuestos por hierro dulce o acero.

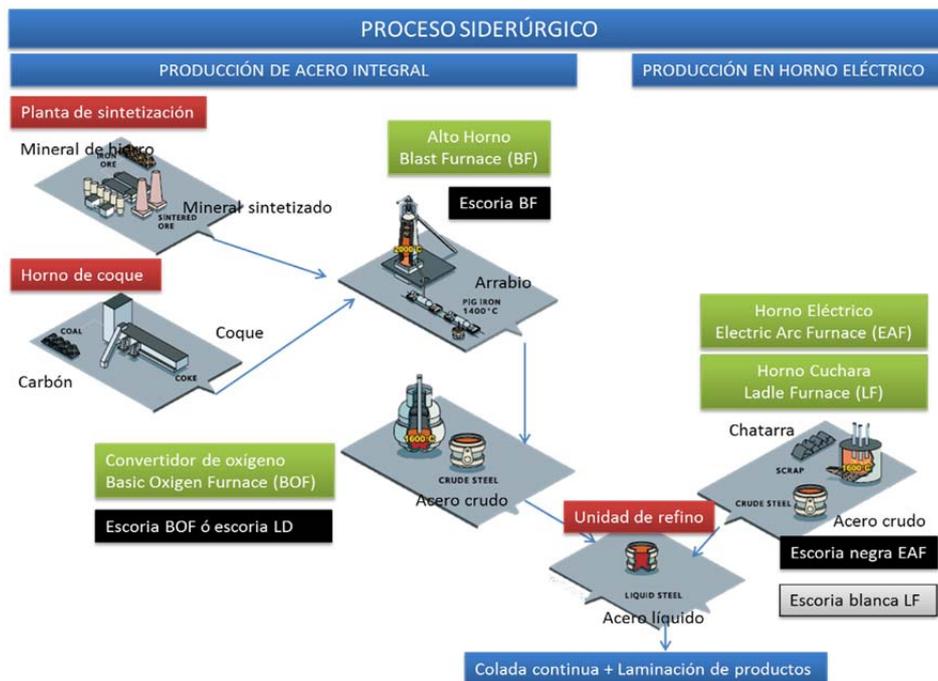


Figura 2.1 Proceso siderúrgico.

(Imágenes: <http://spain.arcelormittal.com/~media/Files/A/ArcelorMittal-Espanol/documents/how%20steel%20is%20made%20UK.pdf>)

En el proceso de fabricación del acero se generan gran variedad de residuos, tales como:

- Escorias siderúrgicas
- Polvos de acería
- Refractarios

- Arenas de fundición
- Cascarilla de laminación

El mayor volumen de residuos del proceso siderúrgico son las escorias y los polvos de acería.

Como *escoria siderúrgica* se denomina al “*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*”. La escoria es un material complejo, compuesto de varios materiales más sencillos, que se encuentran también en estado mayoritariamente líquido a las temperaturas del caldo férreo, y cuya densidad es apreciablemente menor que la del propio caldo, por lo que la flotación está asegurada³.

En función de las técnicas y procesos de fabricación empleados existen diferentes tipos de escorias siderúrgicas. Además, dependiendo del producto que se obtiene (hierro, acero al carbono, aceros de baja aleación, aceros de alta aleación, fundiciones, etc.) las escorias también tienen diferente composición, características y propiedades.

Los grandes grupos de escorias, en función del proceso de obtención de los diferentes tipos de hierros y aceros, son las siguientes:

- 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 cuchara LF
- Escoria de convertidor AOD, VOD
- Escoria de cubilote

Los tipos de escoria empleados en esta Tesis Doctoral son la “*escoria negra*” de Horno Eléctrico de Arco (EAF) y la “*escoria blanca*” de Horno Cuchara (LF), estudiadas de manera específica en el apartado 2.1.4.

2.1.2. Producción de acero y escoria

Según Worldsteel⁴, se estima que la producción mundial de acero bruto en el año 2013 fue de 1.606 millones de toneladas, un 3% mayor que el año 2012 (1.559 Mtn). El país que más aporta al crecimiento, en términos absolutos, es China, que produjo 779 millones de toneladas, lo que supone el 48,5% del acero mundial. La producción de Alemania y España juntas en el año 2013 ronda las 57 Mtn, cifra muy parecida a la que China es capaz

³ Manso Villalaín, J. M. (2001). “Fabricación de hormigón hidráulico con escoria negra de horno eléctrico de arco” Tesis doctoral, Universidad de Burgos.

⁴ World-Steel-Association (2014) “World Steel in Figures 2014.” ISBN: 978-2-930069-73-9.

de aportar en un solo mes. España ocupa el puesto número 16 a nivel mundial en producción de acero.

La producción mundial de acero, que en 1900 era de 28 millones de toneladas, ascendía en 2001 a 851 millones de toneladas y a 1.606 millones de toneladas en 2013⁵. La evidente evolución de los datos de producción mundial de acero es consecuencia del desarrollo y crecimiento económico de los países, que emplean el acero para construir puentes, líneas de ferrocarril, conducciones de gas y agua, redes de saneamiento, fábricas, etc. Esto implica que las escorias y residuos generados en su obtención experimentan un incremento progresivo que determina una descompensación en los procesos de reutilización de las mismas.

El Gráfico 2.1 muestra la producción mundial de acero, así como la producción en China, donde puede apreciarse que, en los últimos años, ésta es aproximadamente la mitad del acero mundial.

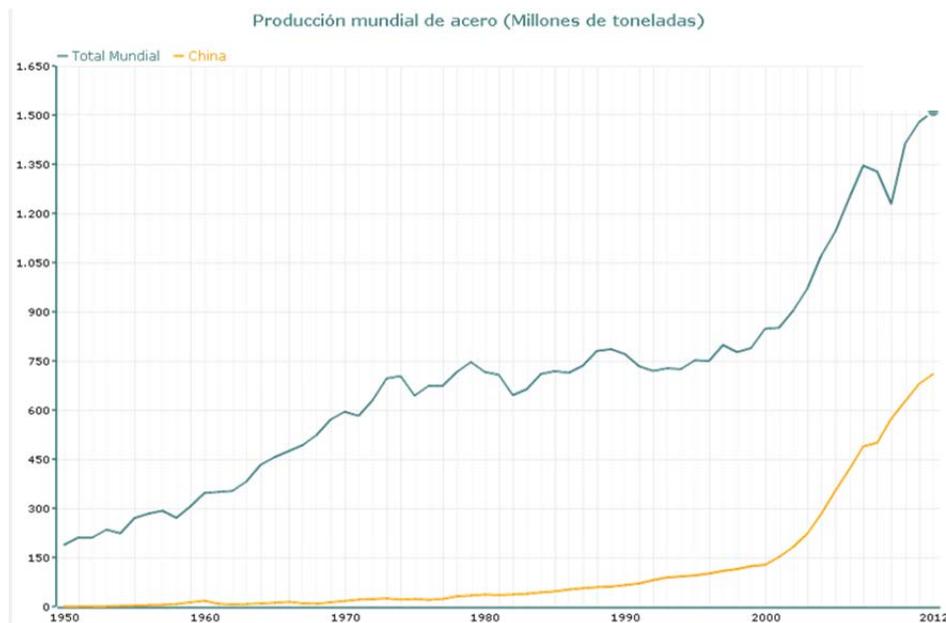


Gráfico 2.1 Producción mundial de acero (Unesid)

Si se analizan los datos de la Unión Europea (EU-27), la producción de acero bruto en el año 2013 fue de 165,9 millones de toneladas, lo que supone un 1,5% menos que en el año 2012 (168,5 Mtn). Alemania fue el mayor productor de acero de la Unión Europea, generando 42,6 millones de toneladas, seguido de Italia que produjo 24,1 Mtn, Francia 15,7 Mtn y España 14,2 Mtn⁴.

⁵ UNESID. (2013). "IRIS 2013 Informe 2013 sobre el Reciclaje del acero en la Industria Siderúrgica Española." from <http://www.unesid.org/iris2013/IRISINFORMERECICLAJEACERO2013.pdf> Fecha de consulta: septiembre 2014.

Además de las cifras de producción de acero, es también importante contrastar los procesos de fabricación. En este sentido, el procedimiento de elaboración de acero más utilizado en el mundo es el Horno Alto (metalurgia primaria o integral). El 71% de la producción global y el 60% de la producción en la Unión Europea se han realizado mediante esta tecnología⁴. Sin embargo, en España el 75% de la producción de acero se genera en hornos eléctricos⁶.

En la Tabla 2.1⁷ se especifica la producción total de acero en España desde el año 2002 hasta 2013, así como la producción de arrabio.

Producción siderúrgica básica en España (miles toneladas)		
Año	Arrabio	Total Acero
2002	3.973	16.408
2003	3.651	16.407
2004	4.035	17.684
2005	4.160	17.904
2006	3.432	18.401
2007	3.976	18.999
2008	3.784	18.640
2009	2.920	14.362
2010	3.572	16.343
2011	3.540	15.556
2012	3.081	13.639
2013	3.949	14.252

Tabla 2.1 Producción siderúrgica básica en España.

En la Tabla 2.2⁷ se recoge la calidad del acero producido. La producción de acero inoxidable representa un 5-6% de la producción total de acero al año en España (Gráfico 2.2).

⁶ World-Steel-Association. (2012). "Steel statistical year book 2012."

⁷ UNESID. "Unión de Empresas siderúrgicas.", from <http://www.unesid.org>.

Calidad del acero producido en España (miles toneladas)						
Año	No aleado	%	Aleado	%	Acero Inoxidable	%
2002	14.587	88,9	726	4,4	1.096	6,7
2003	14.495	88,3	748	4,6	1.164	7,1
2004	15.814	89,4	766	4,3	1.103	6,2
2005	15.995	89,3	783	4,4	1.127	6,3
2006	16.397	89,1	748	4,1	1.257	6,8
2007	17.077	89,9	817	4,3	1.105	5,8
2008	16.896	90,6	746	4,0	998	5,4
2009	13.356	93,0	313	2,2	693	4,8
2010	14.838	90,8	660	4,0	844	5,2
2011	14.023	90,1	726	4,7	807	5,2
2012	12.146	89,1	650	4,8	844	6,2
2013	12.798	89,8	596	4,2	858	6,0

Tabla 2.2 Calidad del acero producido en España

Producción de acero en España

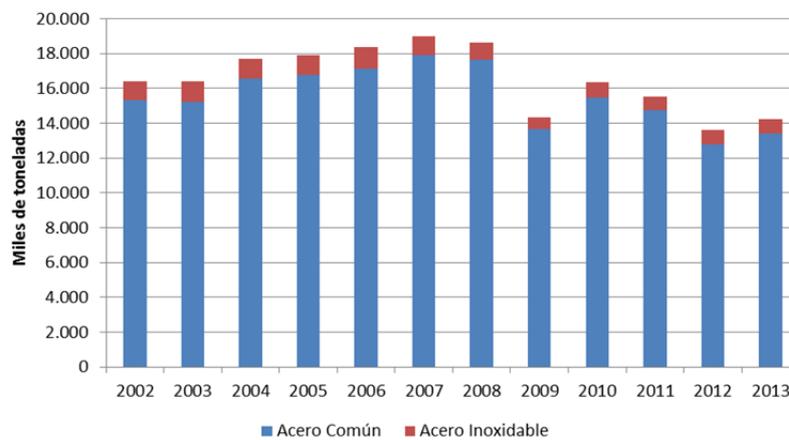


Gráfico 2.2 Producción de acero en España.

Si se analiza el contexto español, sólo Asturias fabrica acero en Hornos Altos (dos ubicados en Gijón), cuya producción en 2010, según información facilitada por Arcelormittal Asturias, S.A. para el Cedex⁸, fue de 3.992.921 tn de arrabio, siendo el volumen total de escorias generadas mediante esta

⁸ CEDEX (2011). Catálogo de Residuos utilizables en construcción. Escorias de horno alto[<http://www.cedexmateriales.vsf.es/view/archivos/residuos/255.pdf>], Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. Ministerio de Medio Ambiente Rural y Marino. Ministerio de Fomento.

técnica ese mismo año de 1.201.518 tn, de las cuales 794.526 tn fueron granuladas y 496.992 tn cristalizadas.

Las escorias de acería LD se originan en el proceso de afinado del arrabio obtenido del horno alto. Como los dos únicos hornos altos españoles se localizan en Gijón (Asturias), las acerías de tipo LD también están ubicadas en la misma Comunidad Autónoma, concretamente en las ciudades de Avilés y Gijón⁹. La producción de escorias LD, según datos facilitados por Unesid al Cedex, asciende a 585.000 tn en año 2005, 573.000 tn en el año 2007, 500.000 tn en el año 2008 y 440.000 en 2009.

El resto de la producción de acero en España se fabrica en Hornos Eléctricos de Arco. En España actualmente están en funcionamiento 24 acerías de este tipo (14 de ellas en el País Vasco)⁷ (Figura 2.2 y Figura 2.3). La producción de escorias, según datos facilitados por Unesid al Cedex, en 2005 fue de 1.616.600 tn de escoria negra y 372.600 tn de escoria blanca¹⁰.

En la Figura 2.2, Figura 2.3 y Tabla 2.3, se muestran la localización de las acerías españolas, así como el tipo de acero que se produce en ellas.



Figura 2.2 Distribución de acerías de horno eléctrico en España (ampliación País Vasco Figura 2.3)

⁹ CEDEX (2012). "Catálogo de Residuos utilizables en construcción. Escorias de acería LD" [<http://www.cedexmateriales.vsf.es/view/archivos/residuos/282.pdf>], Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. Ministerio de Medio Ambiente Rural y Marino. Ministerio de Fomento.

¹⁰ CEDEX (2013). "Catálogo de Residuos utilizables en construcción. Escorias de acería de horno eléctrico de arco" [<http://www.cedexmateriales.vsf.es/view/archivos/residuos/217.pdf>], Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. Ministerio de Medio Ambiente Rural y Marino. Ministerio de Fomento.

ACERÍAS DE HORNO ELÉCTRICO DE ARCO				
Empresa		Ubicación	Tipo de acería	
	Acerinox Europa SAU	Algeciras (Cádiz)	Acero inoxidable	www.acerinox.es
	Acería de Álava, SA	Amurrio (Álava)	Acero inoxidable	http://www.tubacex.es/
	Aceros Inoxidables Olarra, SA	Loiu (Vizcaya)	Acero inoxidable	http://www.olarra.com
	Tubos Reunidos Industrial, SLU	Amurrio (Álava)	Plano, fino, especial	http://www.tubosreunidos.com/
	Productos Tubulares, SAU	Valle de Trapaga (Vizcaya)	Plano, fino, especial	http://www.tubosreunidos.com/
	AG Corrugados Azpeitia, SLU	Azpeitia (Guipúzcoa)	Acero al carbono común	http://www.grupoag.es
	AG Corrugados Getafe, SL	Getafe (Madrid)	Acero al carbono común	http://www.grupoag.es
	AG Siderúrgica Balboa, SA	Jerez de los Caballeros (Badajoz)	Acero al carbono común	http://www.grupoag.es
	Siderúrgica Sevillana, SA	Alcalá de Guadaíra (Sevilla)	Acero al carbono común	http://www.siderurgicasevillana.com/es/
	Megasa Siderúrgica, SL	Narón (La Coruña)	Acero al carbono común	http://www.sostenibilidadsiderurgica.com/index.php/fabricas-con-marca-lista/98-megasa-siderurgica-s-l
	Global Steel Wire, SA	Santander (Cantabria)	Acero al carbono común	http://www.celsagroup.com/
	Nervacero, SA	Valle de Trapaga (Vizcaya)	Acero al carbono común	http://www.celsagroup.com/
	CELSA Compañía Española de Laminación, SL	Castellbisbal (Barcelona)	Acero al carbono común	http://www.celsagroup.com/
	GERDAU Aceros Especiales Europa, SL	Basauri (Vizcaya)	Plano, fino, especial	http://www.gerdau.es/
	GERDAU Aceros Especiales Europa, SL	Azcoitia (Guipúzcoa)	Acero al carbono común	http://www.gerdau.es/
	GERDAU Aceros Especiales Europa, SL	Legazpi (Guipúzcoa)	Acero al carbono común	http://www.gerdau.es/
	GERDAU Aceros Especiales Europa, SL	Reinosa (Cantabria)	Plano, fino, especial	http://www.gerdau.es/
	CAF	Beasain (Guipúzcoa)	Plano, fino, especial	http://www.caf.es/
	Arcelor Mittal Madrid	Madrid (Madrid)	Acero al carbono común	http://spain.arcelormittal.com/
	Arcelor Mittal Olaberria	Olaberria (Guipúzcoa)	Acero al carbono común	http://spain.arcelormittal.com/
	Arcelor Mittal Zumarraga	Zumarraga (Guipúzcoa)	Acero al carbono común	http://spain.arcelormittal.com/
	Arcelor Mittal (AHB Bergara)	Bergara (Guipúzcoa)	Acero al carbono común	http://spain.arcelormittal.com/
	Arcelor Mittal Sestao (ACB Sestao)	Sestao (Vizcaya)	Plano, fino, especial	http://spain.arcelormittal.com/
	Arcelor Mittal Zaragoza	Zaragoza (Zaragoza)	Acero al carbono común	http://spain.arcelormittal.com/

Tabla 2.3 Acerías españolas



Figura 2.3 Acerías de Horno eléctrico localizadas en el País Vasco

En Europa, según datos publicados por Euroslag¹, la producción de escorias en el año 2010 fue la que se indica en la Tabla 2.4 y el Gráfico 2.3.

Producción escorias en Europa año 2010 (Millones de toneladas)		
Blast furnace slag	BF- granulada	19,270
	BF- vitrificada	4,230
Steel Slag	BOF	10,464
	EAF	6,665
	LF	2,795
	AOD	1,720

Tabla 2.4 Producción de escorias en Europa año 2010

Como puede apreciarse el mayor volumen de escorias son las que proceden del proceso integral de producción de acero (BF), mientras que las generas en hornos eléctricos (EAF y LF) representan el 21% del total.

En el caso concreto de España estos datos se invierten pues, como se ha expuesto con anterioridad el 75% de la producción de acero se genera en hornos eléctricos, con lo que se genera más volumen de escorias EAF y LF.

¹ EUROSILAG. "The European Association representing metallurgical slag producers and processors [http://www.euroslag.com/]

Producción de escorias en Eupora año 2010

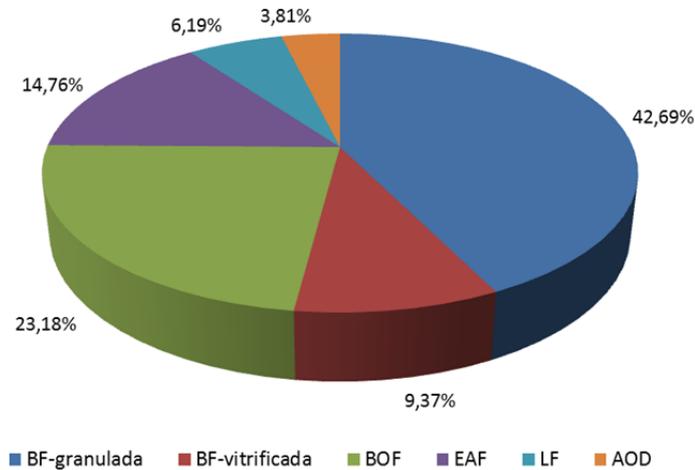


Gráfico 2.3 Producción de escorias en Europa año 2010

El Gráfico 2.4 muestra los usos que tienen las escorias siderúrgicas en España¹¹, donde, como puede apreciarse, una gran parte de ellas todavía se destina a vertedero (23%).

Usos de las escorias en España

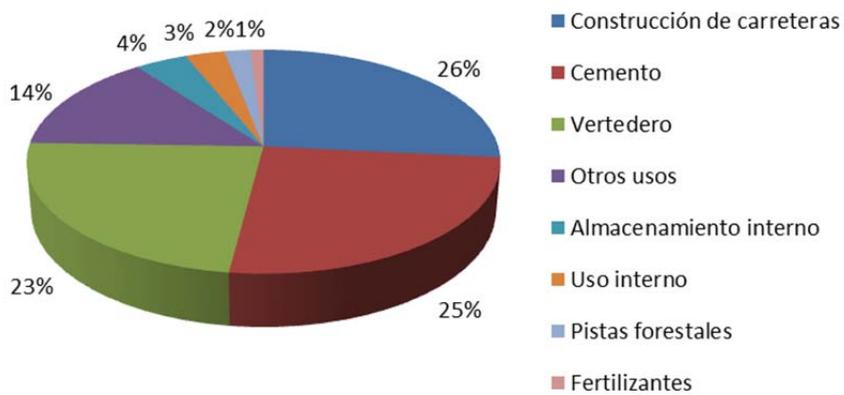


Gráfico 2.4 Usos de las escorias en España

¹¹ UNESID. (2013). "La industria siderúrgica española en 2013." Unión de empresas siderúrgicas, from <http://blog.unesid.org/wp-content/uploads/2014/07/Folleto2013.pdf> Fecha de consulta: septiembre 2014.

2.1.3. Escorias siderúrgicas

2.1.3.1. Escoria siderúrgica de horno alto BF

El Horno Alto (Blast Furnace, BF) es la instalación base para la obtención del caldo de hierro o arrabio ("pig iron"), el cual, a su vez, constituye la materia prima para la fabricación de acero¹².

Durante el proceso continuo de obtención del arrabio, se combinan y calientan hasta su fundición minerales de hierro y carbono en el interior del horno, así como fundentes (cal y/o dolomita)¹. Estos fundentes se encargan de formar la escoria que atrapa las impurezas del mineral.

Para favorecer la combustión se inyecta aire caliente a gran presión, lo que permite sostener la carga mientras se realiza el proceso de fundición. El producto obtenido, el arrabio, es un material con una riqueza en hierro cercana al 95% y alrededor del 3,5% de carbono. El resto lo componen materiales como el silicio, el manganeso, el azufre y el fósforo. Para minimizar la cantidad de azufre, un elemento muy negativo para el acero, se emplea el calcio en el proceso de desulfuración¹³.

La diferencia entre el arrabio y el acero estriba en la cantidad de carbono que tiene el producto férreo. Si el contenido es inferior al 1,7% se considera acero. Si es superior, recibe el nombre de fundición. El arrabio forma parte de este grupo. El acero presenta innumerables ventajas: es un material duro, elástico, capaz de absorber impactos y que se puede extender en láminas e hilos. Por el contrario, la fundición es extremadamente dura, pero frágil y quebradiza, presentando dificultades para su laminado y estirado mediante procedimientos mecánicos¹³.

Para evitar este comportamiento, el arrabio en estado líquido se trata en el convertidor de la acería, instalación que se encarga de eliminar el exceso de carbono mediante la aportación de oxígeno en un nuevo proceso de combustión.

Así pues, en la parte inferior del horno alto, denominada "crisol", se forman dos productos finales: arrabio y escoria. (BF slag). Éstos fluyen juntos en estado líquido hasta llegar a una especie de balsa. La escoria, al ser menos densa que el metal caliente, sobrenada y flota, formando una capa en la parte superior del líquido. Posteriormente ésta sale a través de un orificio denominado "piquera", a una temperatura de 1.500°C. En función de las técnicas de enfriamiento a la que es sometida la escoria se obtienen

¹ EUROSLAG. "The European Association representing metallurgical slag producers and processors [<http://www.euroslag.com/>]

¹² Ruiz-Cuevas López-Para, F. and J. Ibarzabal (1988). Presentación del producto escoria-escoria. Materiales básicos, fabricación, características y propiedades. Jornadas sobre escorias Tratadas. Oviedo.

¹³ ARCERLORMITTAL. from <http://spain.arcelormittal.com/>.

materiales diferentes con distintas características de utilización^{14,15} (ver Tabla 2.5):

Tipos de escoria de alto horno BF			
		Elemento de enfriamiento	
		Aire	Agua
Tiempo de enfriamiento	Lento	Escoria BF cristalizada	Escoria BF expandida "foamy"
	Rápido		Escoria BF vitrificada granulada

Tabla 2.5 Tipos de escorias de alto horno BF

- Escoria BF cristalizada. Obtenida por enfriamiento lento de la escoria líquida al aire. Se utiliza en la preparación de bases y subbases de carreteras. En algunos países de la Unión Europea, las escorias cristalizadas son clasificadas como relleno granular seleccionado.
- Escoria BF vitrificada granulada. Obtenida por enfriamiento brusco de la escoria líquida mediante un potente chorro de agua fría. Se utiliza como adición activa en la fabricación de cemento Portland.
- Escoria BF vitrificada peletizada. Obtenida dejando caer la escoria líquida en un tambor giratorio regado con agua.
- Escoria BF expandida (también denominada "foamy"). Obtenida añadiendo a la escoria líquida una pequeña cantidad de agua. Se utiliza como base en la preparación de plataformas de carreteras.

Esta escoria es muy uniforme en su composición en las diferentes tongadas que configuran los ciclos de producción del Horno Alto y suponen del orden del 25-30% de la producción de acero, a razón de 250-300 Kg. por tonelada de acero útil producido.

La composición química de la escoria de Horno Alto depende de los minerales de hierro y de las cenizas del coque utilizadas como combustible, así como de los óxidos de los fundentes empleados. Es muy uniforme y está constituida principalmente por óxidos de cal, sílice, alúmina y magnesita, que constituyen más del 95%.

2.1.3.2. Escoria de convertidor de oxígeno BOF o escorias de acería LD

Las escorias de acería LD (procedimiento Linz-Donawitz, LD) se originan en el proceso de afinado del arrabio obtenido en el Horno Alto,

¹⁴ Bonnot, J., G. Colombier, N. D. Chi, A. Panis, M. Baillie, A. Astesan, J. J. Chauvin, G. Morel, A. Rigot and B. Bivert (1980). Utilisation du laitier granule en construction routiere. RAPPORT FINAL CONVENTION N 7210-XA/3/301 (EUR6553FR).

¹⁵ Shi, C. J. and J. S. Qian (2000). "High performance cementing materials from industrial slags - a review." Resources Conservation and Recycling **29**(3): p.195-207.

eliminándose mediante un Convertidor de Oxígeno (Basic Oxigen Furnace, BOF) por oxidación, en todo o en parte, las impurezas existentes.

Este afino se lleva a cabo inyectando oxígeno a presión en el baño que contiene las materias primas y las adiciones para la formación de escoria (fundamentalmente cal, dolomía y espató). El oxígeno se insufla mediante una lanza refrigerada hasta conseguir eliminar del arrabio el exceso de carbono y las impurezas que lo acompañan. El carbono se elimina por oxidación en forma de gas (CO y CO₂) y el resto de impurezas queda en forma de escoria semipastosa, que sobrenada por encima del acero ($t > 1600^{\circ}\text{C}$). De esta forma, es posible separar la escoria de éste por gravedad y enviarla a un foso, donde se riega hasta alcanzar temperaturas inferiores a 50°C ^{16,17}.

Esta técnica permite producir en torno a 80-120 Kg. de escoria BOF por tonelada de acero útil y, aunque las variaciones tecnológicas de los diferentes convertidores utilizados no influyen en la cantidad de escoria obtenida, sí pueden afectar a la composición mineralógica de éstas¹⁸.

Su composición es una mezcla de silicatos cálcicos con óxidos de hierro, predominando generalmente los primeros, y debidos los últimos al soplado de oxígeno al que se somete el caldo durante la operación. Su relación de basicidad cal/sílice (CaO/SiO₂) está en el rango 3-4, y poseen una fracción de cal libre y de magnesia total que no sobrepasa, en su conjunto, el 15%¹⁹.

Desde el punto de vista mineralógico, las escorias LD presentan en su contenido diferentes fases: silicatos bi y tricálcico, wusita (combinación de óxido de hierro y manganeso FeO y MnO), ferrito bicálcico y cal, más o menos impregnada de óxidos metálicos, responsables de la cal libre⁹.

Estas escorias pueden utilizarse como correctores de suelos agrícolas, donde su uso ha sido ocasional²⁰, en pavimentación de carreteras, sobre todo en capas de rodadura, estabilización de suelos, rellenos y terraplenes.

⁹ CEDEX (2012). "Catálogo de Residuos utilizables en construcción. Escorias de acería LD"[\[http://www.cedexmateriales.vsf.es/view/archivos/residuos/282.pdf\]](http://www.cedexmateriales.vsf.es/view/archivos/residuos/282.pdf), Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. Ministerio de Medio Ambiente Rural y Marino. Ministerio de Fomento.

¹⁶ López, F. A. and F. Medina (1989). "Escorias LD: co-productos de la industria siderúrgica." C y E.

¹⁷ Shi, C. J. (2004). "Steel slag - Its production, processing, characteristics, and cementitious properties." Journal of Materials in Civil Engineering **vol 16**(3): p.230-236.

¹⁸ Losáñez, M. (2005). "Aprovechamiento integral de escorias blancas y negras de acería eléctrica en construcción y obra civil", Universidad del País Vasco.

¹⁹ Geiseler, J. and R. Schlosser (1986). Criteria for the Utilization of Electric Furnace Slags.(Retroactive Coverage). European Electric Steel Congress(Congresso Europeo sull' Acciaio Elettrico). II, Florence.

²⁰ Formoso, A., F. López, F. Medina and N. Balcázar (1996). "Utilización agrícola de la escoria LD." Informe Final CENIM. Comisión Europea EUR(Luxembourg) **EUR 15591**.

Su utilización requiere tomar precauciones respecto a posibles comportamientos expansivos del material por la presencia de Cal (CaO libre o lima) y magnesia (MgO) sin hidratar (periclasa), circunstancia que impide obtener una buena estabilidad de los rellenos a corto plazo.

Es indispensable evaluar la expansividad de la escoria y mitigarla a corto plazo. El procedimiento más utilizado para reducir al mínimo los fenómenos de inestabilidad volumétrica es regarla previamente con agua para hidratar los elementos inestables.

Se ha comprobado que el envejecimiento al aire sin riego de agua no ofrece garantías y que los cúmulos de escoria deben tener una altura máxima de 1,5-2 m⁹.

2.1.3.3. Escoria de convertidor AOD, VOD

Para fabricar aceros inoxidables o aceros de alta aleación, se utiliza un proceso más complejo que el empleado en la fabricación de hierros, aceros y fundiciones mediante Horno Alto o mediante Convertido de Oxígeno. La tecnología utilizada es la de fusión en Horno Eléctrico de Arco (EAF), y posterior afino mediante un convertidor, el más utilizado es el Argon Oxigen Decarburation (AOD), sistema que supone el 70% de la producción y que, en algunos casos, se le añade un tratamiento VOD (Vacuum Oxigen Decarburation)^{21,22}.

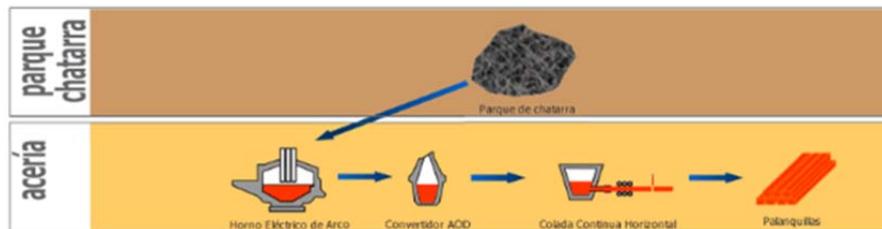


Figura 2.4 Producción de aceros inoxidables con afino en convertidor AOD

Fuente: <http://www.olarra.com/procesos.htm>

El componente principal de las escorias de aceros de alta aleación es el silicato cálcico^{23,24}. El tratamiento de los caldos en un segundo afino con convertidores AOD/VOD, que no utilizan aire, permite obtener

²¹ Geiseler, J. (1994). "Der bustoff electroofenshalacke. Entstehung, nutzung, erfahrungen." *Schiriftenreihe der forschungsgemeinschaft Eisenhüttenschlacken* vol 3: p.1-8.

²² Ferrer, F. J. (2006). "El refractario en la fabricación de acero inoxidable." *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio* vol 45(5): p.363-366.

²³ Capodilupo, D. "Development of the foamy slag method in the electric arc furnace for melting and treatment of high-chrome steel." *Final report CSM European Commission*. Eds. *In press*.

²⁴ Okumura, H. (1993). Recycling of iron and steelmaking slags in Japan" *Minerals, Metals & Materials Soc. First International Conference on Processing Materials for Properties*. H. Henein and T. Oki. Warrendale, Minerals, Metals & Materials Soc: p.803-806.

concentraciones bajas de óxidos de hierro y de cromo²⁵, por lo que la contaminación por cromo hexavalente es muy tenue o inexistente.

La presencia de cromo hexavalente limita su uso en otras aplicaciones por la conocida acumulación de este metal en los organismos. Es por ello que debe cuidarse su utilización como corrector de suelos agrícolas. Actualmente, se acumula en grandes acopios sin uso definido²⁶.

2.1.3.4. Escoria de cubilote

El horno de Cubilote se ha utilizado en la fabricación de fundiciones de acero, además del Horno Alto y Hornos Eléctricos de Arco. Las características de las escorias producidas en este horno no difieren respecto a las obtenidas en Hornos de Arco Eléctrico (EAF) o de Convertidor de Oxígeno (BOF).

La producción de escoria mediante Horno de Cubilote es del orden de 60.000- 70.000 tn y, dada la singularidad de los procesos que la originan, se observa también una heterogeneidad en su composición química y propiedades, pero no difieren sustancialmente del resto de escorias estudiadas obtenidas mediante otras técnicas de producción²⁶.

2.1.4. Escorias de acería eléctrica (EAF y LF)

2.1.4.1. Introducción y generación

El proceso de fabricación del acero²⁷, tanto común como especial, en las acerías de Horno de Arco Eléctrico (Electric Arc Furnace, EAF) se compone de dos etapas: una primera denominada metalurgia primaria o de fusión, donde se produce la fusión de las materias primas que se realiza en Hornos de Arco Eléctrico, y la segunda, denominada metalurgia secundaria o afino del baño fundido, que se inicia en el Horno Eléctrico y finaliza en el Horno Cuchara (Ladle Furnace, LF), donde se produce el ajuste de la composición. (Figura 2.5 y Figura 2.6).

Los Hornos Eléctricos de Arco son habitualmente cilíndricos y se encuentran envueltos en material refractario. En la parte superior disponen de una bóveda móvil por donde se introducen las materias primas. La materia prima principal empleada para la fabricación de acero en Horno Eléctrico de Arco es la chatarra de hierro dulce o acero (50-90%). Como elementos auxiliares se pueden cargar también pequeñas cantidades de fundición, de mineral de hierro y de ferroaleaciones. De igual forma, se

²⁵ Geiseler, J. (1991). Verwertung der Stahlwerksschlacken. Stahl und Eisen 111, Nr 1. Düsseldorf. vol 1: p.133-138.

²⁶ Rodríguez Sáiz, A. (2008). "Fabricación de morteros de albañilería con escoria blanca de horno cuchara y su utilización en construcción". Tesis doctoral, Universidad de Burgos.

²⁷ IHOBE, S. A. (1999). "Libro Blanco de Minimización de Residuos y Emisiones de Escorias de Acería", Departamento de Ordenación del Territorio, Vivienda y Medio Ambiente del Gobierno Vasco.

añaden materiales formadores de escoria, que protegen el revestimiento refractario del horno y que están constituidos en su mayor parte por cal, sílice, magnesia y alúmina.

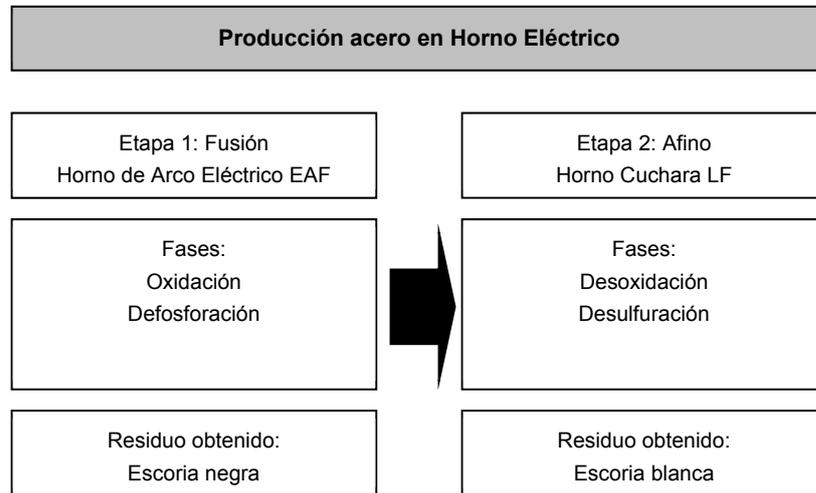


Figura 2.5 Proceso de fabricación de acero con hornos EAF-LF



Figura 2.6 Proceso de transformación de acero en hornos EAF-LF

Fuente: http://www.siderurgicasevillana.com/items/24/allegati/1/EIProceso_SiderurgicaSevillana.pdf

Una vez llenado y cerrado el horno, se hace saltar el arco eléctrico y comienza la etapa de fusión. Ésta incluye una serie de fases como la oxidación, dirigida a eliminar impurezas de manganeso, silicio y cromo, la defosforación y la formación de escoria espumante, en la que se acumulan todas las impurezas. Al final de todas estas fases se extraen las **escorias negras (EAF)**.

Tras la extracción de la escoria del horno, su enfriamiento puede hacerse de diferentes formas¹⁰:

- La escoria se vierte directamente al suelo y se enfría con agua para que pueda ser recogida y transportada en camiones. Presenta un aspecto muy poroso, de tamaño relativamente pequeño y en estado vítreo.
- Se puede verter en un Cono de Fundición que se coloca debajo de la piquera del Horno Eléctrico de Arco. La escoria comienza a enfriarse en el cono y, posteriormente, se vierte en una fosa donde completa su total enfriamiento. El material resultante es menos poroso que el anterior y más cristalino.
- Se vierte en un Cono de Fundición que se deja enfriar. En este caso el enfriamiento es el más lento y, una vez fría, se saca del cono. La escoria obtenida es muy compacta, con pocos poros, dura y muy cristalina.

Después de la etapa de fusión comienza la fase de afino: el líquido fundido, procedente del Horno Eléctrico de Arco, se traslada al Horno de Cuchara para su afino. Una vez en el horno, se cubre inmediatamente con una escoria reductora, que se denomina **escoria blanca (LF)**, y se agita continuamente con el soplado de gas inerte, normalmente argón. La escoria blanca permite la reducción de los óxidos metálicos presentes en el baño, durante la denominada fase de desoxidación. Paralelamente se realiza la desulfuración del líquido fundido, que finalizará en el Horno Cuchara, y que se produce por simple contacto con la cal existente en la escoria blanca (LF).

2.1.4.2. Producción

Tal y como se ha comentado en el apartado 2.1.2 la producción de acero mediante Horno Eléctrico de Arco en España representa aproximadamente un 75% de la producción total, funcionando actualmente un total de 24 acerías.

La distribución de las acerías es desigual, pues la Comunidad Autónoma del País Vasco cuenta con 14 plantas, representando prácticamente la mitad del acero producido en España. Los datos de reparto de producción de acero, según datos facilitados por Unesid al Cedex en el año 2005, quedan reflejados en la Tabla 2.6

¹⁰ CEDEX (2013). "Catálogo de Residuos utilizables en construcción. Escorias de acería de horno eléctrico de arco" [<http://www.cedexmateriales.vsf.es/view/archivos/residuos/217.pdf>], Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. Ministerio de Medio Ambiente Rural y Marino. Ministerio de Fomento.

Reparto producción acero por comunidades (2005)	
País Vasco	45,5 %
Cataluña- Aragón	17,6 %
Andalucía	11,9 %
Galicia- Castilla y León- Extremadura	10,1 %
Cantabria	8,6 %
Madrid	6,3 %

Tabla 2.6 Reparto de producción de acero por comunidades.

La fabricación de aceros mediante la tecnología del Horno Eléctrico de Arco y posterior afino en Horno Cuchara produce dos tipos de escorias con diferentes características organolépticas, físicas y químicas²⁷:

- La generación de escoria negra EAF es de 110-150 kg por tonelada de acero producido.
- La escoria blanca LF se obtiene a razón de 20-30 kg por tonelada de acero.

Con estos datos y teniendo en cuenta que el acero producido en España mediante Horno Eléctrico de Arco supone en torno a un 75% del total, se puede hacer un cálculo estimado orientativo de la cantidad de escorias negras y blancas generadas en nuestro país. (Tabla 2.7)

Estimación orientativa de la generación de escorias en Hornos Eléctricos de Arco en España				
Año	Acero Total en España (Miles de tn)	Producción en hornos eléctricos ≈75%	EAF slag (tn) 110-150 kg/tn	LF slag (tn) 20-30 kg/tn
2002	16.408	12.306	1.600.000	307.000
2003	16.407	12.305	1.600.000	307.000
2004	17.684	13.263	1.724.000	331.000
2005	17.904	13.428	1.745.000	336.000
2006	18.401	13.800	1.794.000	345.000
2007	18.999	14.249	1.852.000	356.000
2008	18.640	13.980	1.817.000	350.000
2009	14.362	10.771	1.400.000	269.000
2010	16.343	12.257	1.593.000	306.000
2011	15.556	11.667	1.515.000	280.000
2012	13.639	10.229	1.330.000	255.000
2013	14.252	10.689	1.390.000	267.000

Tabla 2.7 Estimación orientativa de la generación de escorias en Hornos Eléctricos de Arco en España

La problemática que entrañan estos residuos hace necesario una investigación respecto a su valorización y reutilización de la manera más adecuada.

Al existir una mayor producción de acero en Europa mediante Convertidor de Oxígeno (aproximadamente un 60%), así como mundial (71%), casi todas las investigaciones se orientan más a su estudio, debido a la mayor dificultad de su aplicación como material reciclado en la fabricación de otros materiales, particularmente en el ámbito de la construcción, y por presentar problemas de estabilidad importantes debido a su composición^{28,29,30,31,32,33}.

No obstante, cada vez existen más investigaciones que tratan de la utilización de escorias negras procedentes de Hornos Eléctricos de Arco^{34,35,36,37,38,39}, y de las escorias blancas generadas en Hornos Cuchara^{17,40,41,42,43,44,45,46}.

²⁸ Dussart, J. (1986). Utilisation de la scorie LD en technique routiere: rapport final, Office des publications officielles des Communautés européennes, Eds. EUR 10244 FR.

²⁹ Lopez, F. A., N. Balcazar, A. Formoso, M. Pinto and M. Rodriguez (1995). "The recycling of Linz-Donawitz (LD) converter slag by use as a liming agent on pasture land." Waste Management & Research **Vol.13**(6): p.555-568.

³⁰ Das, B., S. Prakash, P. S. R. Reddy and V. N. Misra (2007). "An overview of utilization of slag and sludge from steel industries." Resources Conservation and Recycling, **vol 50**(1): p.40-57.

³¹ Mahieux, P. Y., J. E. Aubert and G. Escadeillas (2009). "Utilization of weathered basic oxygen furnace slag in the production of hydraulic road binders." Construction and Building Materials, **vol 23**(2): p.742-747.

³² Topcu, I. B. and A. R. Boga (2010). "Effect of ground granulate blast-furnace slag on corrosion performance of steel embedded in concrete." Materials & Design **31**(7): p.3358-3365.

³³ Santos, R. M., D. Ling, A. Sarvaramini, M. X. Guo, J. Elsen, F. Larachi, G. Beaudoin, B. Blanpain and T. Van Gerven (2012). "Stabilization of basic oxygen furnace slag by hot-stage carbonation treatment." Chemical Engineering Journal **203**: p.239-250.

³⁴ Frías, M., M. I. Sánchez and A. Uría (2002). "Study of the instability of black slags from electric arc furnace steel industry." Materiales de Construcción **vol 52**(267): p.79-83.

³⁵ Manso, J. M., J. A. Polanco, M. Losañez and J. J. González (2006). "Durability of concrete made with EAF slag as aggregate." Cement & Concrete Composites **vol. 28**: p.528-534.

³⁶ Manso, J. M. and J. Setien (2006). "Investigación de nuevos usos de las escorias de horno eléctrico de arco (EAF): la oportunidad de los hormigones." Hormigón y acero (**241**): p.51-57.

³⁷ Pellegrino, C. and V. Gaddo (2009). "Mechanical and durability characteristics of concrete containing EAF slag as aggregate." Cement and Concrete Composites **vol 31**(9): p.663-671.

³⁸ Suer, P., J. E. Lindqvist, M. Arm and P. Frogner-Kockum (2009). "Reproducing ten years of road ageing - Accelerated carbonation and leaching of EAF steel slag." Science of the Total Environment **407**(18): p.5110-5118.

En cambio, existen muy pocas investigaciones sobre el uso conjunto de ambos materiales en un mismo producto de construcción^{47,48}, por lo que puede considerarse un campo interesante para su estudio, objetivo que se propone en el desarrollo de esta Tesis Doctoral.

2.1.4.3. Composición química de escorias EAF y LF

Las escorias negras se forman durante las operaciones básicas de fabricación del acero, tal y como se explicó anteriormente, y en general la composición química y mineralógica es similar⁴⁹, conteniendo esencialmente hierro, sílice y calcio⁵⁰.

-
- ³⁹ Pasetto, M. and N. Baldo (2010). "Experimental evaluation of high performance base course and road base asphalt concrete with electric arc furnace steel slags." Journal of hazardous materials **vol 181**(1): p. 938-948.
- ¹⁷ Shi, C. J. (2004). "Steel slag - Its production, processing, characteristics, and cementitious properties." Journal of Materials in Civil Engineering **vol 16**(3): p.230-236.
- ⁴⁰ Nicolae, M., I. Vilciu and F. Zaman (2007). "X-ray diffraction analysis of steel slag and blast furnace slag viewing their use for road construction." UPB Scientific Bulletin, Series B: Chemistry and Materials Science **vol 69**(2): p.99-108.
- ⁴¹ Tossavainen, M., F. Engstrom, Q. Yang, N. Menad, M. Lidstrom Larsson and B. Bjorkman (2007). "Characteristics of steel slag under different cooling conditions." Waste Management **vol 27**(10): p.1335-1344.
- ⁴² Setién, J., D. Hernández and J. J. González (2009). "Characterization of ladle furnace basic slag for use as a construction material." Construction and Building Materials **vol 23**: p.1788-1794.
- ⁴³ Rodríguez, A., J. M. Manso, Á. Aragón and J. J. González (2009). "Strength and workability of masonry mortars manufactured with ladle furnace slag." Resources, Conservation and Recycling **vol. 53**: p.645-651.
- ⁴⁴ Manso, J. M., A. Rodríguez, Á. Aragón and J. J. González (2011). "The durability of masonry mortars made with ladle furnace slag." Construction and Building Materials **vol 25**(8): p.3508-3519.
- ⁴⁵ Adolfsson, D., R. Robinson, F. Engström and B. Björkman (2011). "Influence of mineralogy on the hydraulic properties of ladle slag." Cement and Concrete Research **vol 41**(8): p.865-871.
- ⁴⁶ Prieto Barrio, M. I., A. Cobo, A. Rodríguez Sáiz and J. M. Manso Villalain (2011). Estudio de la corrosión de armaduras embebidas en morteros prefabricados con sustitución parcial y total de áridos por escorias blancas de horno cuchara. V Congreso de la Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural,. Octubre 2011.
- ⁴⁷ Polanco, J. A., J. M. Manso, J. Setién and J. J. González (2011). "Strength and durability of concrete made with electric steelmaking slag." ACI Materials Journal **vol 108**(2): p.196-203.
- ⁴⁸ Manso, J. M., D. Hernández, M. M. Losáñez and J. J. González (2011). "Design and elaboration of concrete mixtures using steelmaking slags." ACI Materials Journal **vol 108**(6): p.673-681
- ⁴⁹ Yildirim, I. Z. and M. Prezzi (2011). "Chemical, mineralogical, and morphological properties of steel slag." Advances in Civil Engineering **vol 2011** (Article ID 463638).
- ⁵⁰ Vázquez Ramonich, E. and M. Barra (2001). "Reactivity and expansion of electric arc furnace slag in their application in construction." Materiales De Construccion **51**(263-64): p.137-148.

En 2011 los autores Yildirim, I.Z. & Prezzi, M⁴⁹ publicaron un artículo que recoge una recopilación de las distintas composiciones químicas de las escorias investigadas por varios autores recientemente, y que queda reflejada en la Tabla 2.8 y Tabla 2.9.

Las escorias obtenidas en el Convertidor de Oxígeno (BOF), o escorias de acería LD, están compuestas principalmente por CaO, FeO y SiO₂. En este tipo de hornos, las escorias producidas pueden presentar una relación FeO/Fe₂O₃ de hasta un 38%, que prácticamente coincide con las cantidades de hierro oxidado de primera fusión y de chatarra utilizados como materia prima, que no se recupera durante la transformación del hierro en acero.

Las escorias de acería LD o de Convertidor de Oxígeno BOF contienen SiO₂ en cantidades comprendidas entre el 7 y el 18%, mientras que la presencia de Al₂O₃ se sitúa entre el 0,98 y el 5% y el MgO en valores entre el 0,8 y el 15%.

Si se comparan los contenidos de Cal Libre o lima no combinada tanto en la escoria negra EAF como en la escoria BOF, se puede observar que su presencia es mayor en ésta última, alcanzando valores próximos al 12%^{51,52}. Esta diferencia se justifica por las grandes cantidades de cal cálcica y cal dolomítica utilizadas como fundentes que se añaden en el Horno BOF, por lo que la presencia de CaO en las escorias producidas en este tipo de horno es más elevado (CaO>30%)^{53,54,17,55}.

⁵¹ Formoso, A. (1994). Use of Blast furnace and steelwork slags as fertilizer. 5th EC Conference RTD on Industrial Technologies. Proceedings. Brussels 6-9 December 1994: p. 71-72.

⁵² Balcázar, N. (1992). "La gestión medioambiental de la escoria LD: su utilización en agricultura y silvicultura", Universidad de Alcalá.

⁵³ Schoenberger, H. (2001). Final draft: best available techniques reference document on the production of iron and steel. European Comision, Joint Research Centre, IPTS. European IPPC Bureau.

⁵⁴ Juckes, L. M. (2003). "The volume stability of modern steelmaking slags." Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy Section C-Mineral Processing and Extractive Metallurgy vol 112(3): p.C177-C197.

¹⁷ Shi, C. J. (2004). "Steel slag - Its production, processing, characteristics, and cementitious properties." Journal of Materials in Civil Engineering vol 16(3): p.230-236.

⁵⁵ Robinson, H. L. (2002). The utilization of blastfurnace and steel making slags as aggregates for construction. Industrial Minerals and Extractive Industry Geology. P. W. Scott and C. M. Bristow. Bath, Geological Soc Publishing House (36th Forum on the Geology of Industrial Minerals/11th Extractive Industry Geology Conference): 327-330.

Composición química escorias BOF, EAF y LF (%)													
Tipo escoria		CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	FeO	Fe ₂ O ₃	Fe _{total}	SO ₃	MnO	TiO ₂	P ₂ O ₅	CaO _{libre}
Das 2007 ³⁰	BOF	47.9	12.2	1.2	0.8	26.3	-	-	0.3	0.3	-	3.3	-
Juckes 2003 ^{a 54}	BOF	36.4-45.8	10.7-15.2	1-3.4	4.1-7.8	-	-	19-24	0.1-0.2	2.7-4.3	-	1-1.5	2.5-12
Mahieux 2009 ³¹	BOF	47.5	11.8	2.0	6.3	-	22.6	-	-	1.9	0.5	2.7	-
Poh 2006 ⁵⁶	BOF	52.2	10.8	1.3	5.04	17.2	10.1	-	-	2.5	0.6	1.3	10.2
Shen 2009 ⁵⁷	BOF	39.3	7.8	0.98	8.56	-	38.06	-	0.0	4.2	0.9	-	-
Shi 2004 ¹⁷	BOF	30-55	8-20	1-6	5-15	10-35	-	-	0.1-0.2	2-8	0.4-2	0.2-2	-
Tossavainen2007 ⁴¹	BOF	45.0	11.1	1.9	9.6	10.7	10.9	-	-	3.1	-	-	-
Waligora 2010 ⁵⁸	BOF	47.7	13.3	3.0	6.4	-	24.4	-	-	2.6	0.7	1.5	9.2
Xuequan 1999 ⁵⁹	BOF	45-60	10-15	1-5	3-13	7-20	3-9	-	-	-	-	1-4	-
Barra 2001 ⁶⁰	EAF	29.5	16.1	7.6	5.0	-	32.56	-	0.6	4.5	0.78	0.6	-
Luxán 2000 ⁶¹	EAF	24.4	15.4	12.2	2.9	34.4	-	-	-	5.6	0.56	1.2	-
Manso 2006 ³⁵	EAF	23.9	15.3	7.4	5.1	-	-	42.5	0.1	4.5	-	-	0.5
Shi 2004 ¹⁷	EAF	35-60	9-20	2-9	5-15	15-30	-	-	0.1-0.2	3-8	-	0.0-0.3	-
Tossavainen2007 ⁴¹	EAF	38.8	14.1	6.7	3.9	5.6	20.3	-	-	5	-	-	-
Tsakiridis2008 ⁶²	EAF	35.7	17.5	6.3	6.5	-	36.4	-	-	2.5	0.8	-	-

Tabla 2.8 Composición química escorias BOF, EAF y LF (l)

- ³⁰ Das, B., S. Prakash, P. S. R. Reddy and V. N. Misra (2007). "An overview of utilization of slag and sludge from steel industries." *Resources Conservation and Recycling*. vol 50(1): p.40-57.
- ³¹ Mahieux, P. Y., J. E. Aubert and G. Escadeillas (2009). "Utilization of weathered basic oxygen furnace slag in the production of hydraulic road binders." *Construction and Building Materials*. vol 23(2): p.742-747.
- ⁵⁶ Poh, H. Y., G. S. Ghataora and N. Ghazireh (2006). "Soil stabilization using basic oxygen steel slag fines." *Journal of Materials in Civil Engineering* vol 18(2): p.229-240.
- ⁵⁷ Shen, D.-H., C.-M. Wu and J.-C. Du (2009). "Laboratory investigation of basic oxygen furnace slag for substitution of aggregate in porous asphalt mixture." *Construction and Building Materials*. vol 23(1): p.453-461.
- ⁵⁸ Waligora, J., D. Bulteel, P. Degrugilliers, D. Damidot, J. L. Potdevin and M. Measson (2010). "Chemical and mineralogical characterizations of LD converter steel slags: A multi-analytical techniques approach." *Materials Characterization*. vol 61(1): p.39-48.
- ⁵⁹ Xuequan, W., Z. Hong, H. Xinkai and L. Husen (1999). "Study on steel slag and fly ash composite Portland cement." *Cement and Concrete Research* vol 29(7): p.1103-1106.
- ⁶⁰ Barra, M., E. V. Ramonich and M. A. Muñoz (2001). Stabilization of soils with steel slag and cement for application in rural and low traffic roads. *Beneficial Use of Recycled Materials in Transportation Applications*. RMCR University of Durham, Arlington, Va: p.423-432.
- ⁶¹ Luxán, M. P., R. Sotolongo, F. Dorrego and E. Herrero (2000). "Characteristics of the slags produced in the fusion of scrap steel by electric arc furnace." *Cement and Concrete Research*. vol 30(4): p.517-519.
- ⁶² Tsakiridis, P. E., G. D. Papadimitriou, S. Tsvilis and C. Koroneos (2008). "Utilization of steel slag for Portland cement clinker production." *Journal of Hazardous Materials*. vol 152(2): p.805-811.

Composición química escorias BOF, EAF y LF (%)													
Tipo escoria		CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	FeO	Fe ₂ O ₃	Fe _{total}	SO ₃	MnO	TiO ₂	P ₂ O ₅	CaO _{libre}
Nicolae 2007 ⁴⁰	LF	49.6	14.7	25.6	7.9	0.44	0.22	0.17	0.8	0.4	-	0.2	-
Shi 2004 ¹⁷	LF	30-60	2-35	5-35	1-10	0-15	-	-	0.1-1	0-5.0	-	0.1-0.4	-
Qian 2002 ⁶³	LF	49.5	19.59	12.3	7.4	-	0.9	-	-	1.4	-	0.4	2.5
Setién 2009 ⁴²	LF	50.5-57.5	12.6-19.8	4.3-18.6	7.5-11.9	-	1.6-3.3	-	-	0.4-0.5	0.3-0.9	0-0.01	3.5-19
Tossavainen 2007 ⁴¹	LF	42.5	14.2	22.9	12.6	0.5	1.1	0.4	-	0.2	-	-	-

^a El rango de valores son acumuladas basadas en los datos de composición química de 4 fuentes diferentes en Gran Bretaña proporcionadas por Juckes
^b Xuequan et al 1999 Informe composición química de la escoria de acero del proceso de refinado (no especificado como BOF)
 - No hay datos

Tabla 2.9 Composición química escorias BOF, EAF y LF (II)

Como puede observarse en la Tabla 2.8, la composición química de las escorias BOF y EAF es muy parecida y ambas dependen en gran medida de la materia prima utilizada. En el caso del Horno Eléctrico de Arco, la chatarra procedente de la recuperación de componentes metálicos y de los procesos de transformación, como los recortes de prensas, guillotinas o máquinas herramientas, constituye el grueso de la materia prima utilizada.

Las escorias blancas generadas en el Horno Cuchara LF dependen también de la calidad del acero producido en la primera fase del proceso de fabricación. En comparación con las escorias BOF y EAF, las escorias LF presentan una composición muy variable.

Si bien la presencia de FeO es mucha más baja que en las escorias BOF y EAF (<10%), los contenidos de Al₂O₃ y CaO son más altos que en éstas.

La presencia de metales pesados en la escoria blanca LF es también más acusada, encontrando contenidos importantes de cromo, zinc y plomo (<1%). Además, su aspecto es el de un material fino de color blanquecino, con una granulometría muy fina¹⁰.

En el caso concreto de las escorias estudiadas en España y recogidas en el Catálogo de Residuos utilizables en construcción; Escorias de acería

⁴⁰ Nicolae, M., I. Vîlcu and F. Zaman (2007). "X-ray diffraction analysis of steel slag and blast furnace slag viewing their use for road construction." *UPB Scientific Bulletin, Series B: Chemistry and Materials Science* vol 69(2): p.99-108.

¹⁷ Shi, C. J. (2004). "Steel slag - Its production, processing, characteristics, and cementitious properties." *Journal of Materials in Civil Engineering* vol 16(3): p.230-236.

⁶³ Qian, G. R., D. D. Sun, J. H. Tay and Z. Y. Lai (2002). "Hydrothermal reaction and autoclave stability of Mg bearing RO phase in steel slag." *British Ceramic Transactions* vol 101(4): p.159-164.

⁴² Setién, J., D. Hernández and J. J. González (2009). "Characterization of ladle furnace basic slag for use as a construction material." *Construction and Building Materials* vol 23: p.1788-1794.

¹⁰ CEDEX (2013). "Catálogo de Residuos utilizables en construcción. Escorias de acería de horno eléctrico de arco" [<http://www.cedexmateriales.vsf.es/view/archivos/residuos/217.pdf>]. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. Ministerio de Medio Ambiente Rural y Marino. Ministerio de Fomento.

de horno eléctrico de arco eléctrico, procedentes del estudio de varios autores^{27,64,65}, se han obtenido las composiciones químicas que se recogen en la Tabla 2.10.

Composición química escoria negra (EAF) %	
CaO	22-60
SiO ₂	11-37
FeO	0,5-4
Fe ₂ O ₃	38
MgO	4-12
Cr ₂ O ₃	1-8
TiO ₂	0,6-2
MnO	1-4
Al ₂ O ₃	2-8
P ₂ O ₆	0-0,02

Tabla 2.10 Composición química escoria negra.

La composición química de la escoria blanca de acería, recogida en el mismo documento, es la indicada en la Tabla 2.11

Composición química escoria blanca (LF) %			
SiO ₂	17,4-19,3	Fluoruro (%)	1,4
Fe ₂ O ₃	1,1-3,6	Sulfuro (mg/kg)	503
FeO	0,0-0,95	Zinc (ppm)	596
Al ₂ O ₃	3,2-10,4	Plomo (ppm)	84
CaO	45,3-62,1	Cobre (ppm)	200
MgO	4,5-17,2	Cromo (ppm)	150
MnO	0,0-1,2	Níquel (ppm)	80
S	1,45-1,65		
C	0,0-0,03		

Tabla 2.11 Composición química escoria blanca

²⁷ IHOBE, S. A. (1999). "Libro Blanco de Minimización de Residuos y Emisiones de Escorias de Acería", Departamento de Ordenación del Territorio, Vivienda y Medio Ambiente del Gobierno Vasco.

⁶⁴ Etxeberria, M., C. Pacheco, J. M. Meneses and I. Berridi (2010). "Properties of concrete using metallurgical industrial by-products as aggregates." Construction and Building Materials **24**(9): p.1594-1600.

⁶⁵ Rubio, M. D., F. Contreras, M. A. Parrón and F. Rubio (2011). Resistencia mecánica de hormigones con sustitución de un porcentaje de cemento por polvos de humo y escoria de horno de arco eléctrico. V Congreso ACHE. Octubre 2011. Barcelona.

2.1.4.4. Composición mineralógica

Si se analizan las escorias EAF desde un punto de vista mineralógico, se observan importantes concentraciones de silicato bicálcico, silicato tricálcico, cal libre, wüsite, espinela, ferrita dicálcica y fases magnéticas (Fe_3O_4 y Fe_2O_3)^{66,67}. La composición mineralógica estudiada por Vázquez & Barra en 2001⁵⁰ es la presentada en la Tabla 2.12.

Composición mineralógica escoria negra					
Óxidos de hierro		Silicatos		Compuestos de calcio y magnesio	
FeO	Wuesita	$2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	Larnita	$(\text{Ca}(\text{OH})_2$	Portlandita
Fe_2O_3	Hematita	$\text{CaMg}(\text{SiO}_4)_2$	Merwinita	CaCO_3	Calcita
Fe_3O_4	Magnetita	$\text{Ca}_2\text{Al}_3\text{SiO}_7$	Gelenita	Eventualmente:	
		MgSiO_3	Clioenstatita	CaO	Cal libre
		$(\text{Ca,Fe,Mg})_2\text{SiO}_4$	Bredigita	MgO	Periclusa

Tabla 2.12 Constituyentes cristalinos detectados por DRX

En el artículo antes mencionado de los autores Yildirim, I.Z. y Prezzi, M (2011), también quedan recogidas las composiciones mineralógicas de las escorias de varios autores a lo largo de los últimos años. (Ver Tabla 2.13)

En la Tabla 2.13 puede comprobarse que las escorias BOF y EAF contienen importantes concentraciones de óxido de hierro, una de cuyas fases minerales es la wüsite (FeO). Por el contrario, en las escorias blancas de Horno Cuchara LF, el contenido de óxido de hierro (FeO) es menor, con una importante presencia de diversas formas cristalinas de silicato bicálcico (C_2S)^{62,68,69}.

La formación de C_2S se debe principalmente a la combinación de la sílice con la cal a altas temperaturas, o bien como consecuencia de un

⁶⁶ Smolczyk, H. (1980). Slag structure and identification of slags. Proceedings, 71st International Congress on the Chemistry of Cement.

⁶⁷ Luxán, M. P. (1995). Tipificación de escorias producidas por la siderurgia de horno eléctrico, como material utilizable en la construcción. I Caracterización previa de las escorias. Informe técnico 16.939-I. CSIC. Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja. Madrid.

⁵⁰ Vázquez Ramonich, E. and M. Barra (2001). "Reactivity and expansion of electric arc furnace slag in their application in construction." Materiales De Construcción **51**(263-64): p.137-148.

⁶² Tsakiridis, P. E., G. D. Papadimitriou, S. Tsvilis and C. Koroneos (2008). "Utilization of steel slag for Portland cement clinker production." Journal of Hazardous Materials. vol 152(2): p.805-811.

⁶⁸ Shi, C. J. (2002). "Characteristics and cementitious properties of ladle slag fines from steel production." Cement and Concrete Research **32**(3): p.459-462.

⁶⁹ Geiseler, J. (1996). "Use of steelworks slag in Europe." Waste Management vol **16**(1-3): p.59-63.

enfriamiento brusco del silicato tricálcico C_3S , que propicia la formación del silicato bicalcico y la cal libre, al igual que ocurre en la fabricación de cementos Portland⁶¹.

Composición mineralógica		
Tipo de escoria		Fases minerales
Juckes 2003 ⁵⁴	BOF	C_3S , C_2S , C_2F , RO fases (FeO-MgO-CaO-FeO), MgO, CaO
Nicolae 2007 ⁴⁰	BOF	$2CaO \cdot Al_2O_3 \cdot SiO_2$, Fe_2O_3 , CaO, FeO
Reddy 2006 ⁷⁰	BOF	$2CaO \cdot Fe_2O_3$, $2CaO \cdot P_2O_5$, $2CaO \cdot SiO_2$, CaO
Reddy 2006 ^{q 70}	BOF ^q	$2CaO \cdot Fe_2O_3$, $3CaO \cdot SiO_2$, $2CaO \cdot SiO_2$, Fe_2O_3
Tossavainen 2007 ⁴¹	BOF	β - Ca_2SiO_4 , FeO-MnO-MgO solid solution, MgO
Wachsmuth 1981 et al ⁷¹	BOF	Ca_2SiO_4 , Ca_3SiO_5 , FeO, $2CaO \cdot Fe_2O_3$
Barra 2001 ⁶⁰	EAF	$CaCO_3$, FeO, MgO, Fe_2O_3 , $Ca_2Al(AlSiO_7)$, Ca_2SiO_4
Geiseler 1996 ⁶⁹	-	$2CaO \cdot SiO_2$, $3CaO \cdot SiO_2$, $2CaO \cdot Fe_2O_3$, FeO, (Ca, Fe)O (calciowusita), (Mg, Fe)O (Magnesiowusita), MgO, CaO
Luxan 2000 ⁶¹	EAF	Ca_2SiO_5 , $Ca_2Al(AlSiO_7)$, Fe_2O_3 , $Ca_{14}Mg_2(SiO_4)_8$, $MgFe_2O_4$, Mn_3O_4 , MnO_2
Nicolae 2007 ⁴⁰	EAF	MnO_2 , MnO, Fe_2SiO_4 , Fe_7SiO_{10}
Qian 2002 ⁶³	EAF	γ - Ca_2SiO_4 , C_3MS_2 , CFMS, FeO-MnO-MgO solid solution
Tossavainen 2007 ⁴¹	EAF	$Ca_3Mg(SiO_4)_2$, β - Ca_2SiO_4 , Spinel solid solution (Mg,Mn) $(Cr,Al)_2O_4$, wustite-type solid solution ((Fe,Mg,Mn)O), $Ca_2(Al,Fe)_2O_5$
Tsakiridis 2008 ⁶²	EAF	Ca_2SiO_4 , $4CaO \cdot Al_2O_3$, $Ca_2Al(AlSiO_7)$, Ca_3SiO_5 , $2CaO \cdot Al_2O_3 \cdot SiO_2$, FeO, Fe_3O_4 , MgO, SiO_2
Manso 2005 ⁷²	LF	Al_2O_4Mg , $Ca(OH)_2$, Si_2O_6CaMg , MgO, Ca_3SiO_5 , β - Ca_2SiO_4 , γ - Ca_2SiO_4 , SO_4Ca
Nicolae 2007 ⁴⁰	LF	$CaO \cdot SiO_2$, $CaOAl_2O_3 \cdot 2SiO_2$, CaS, Al_2O_5
Qian 2002 ⁶³	LF	γ - Ca_2SiO_4 , C_3MS_2 , MgO
Tossavainen 2007 ⁴¹	LF	$Ca_{12}Al_{14}O_{33}$, MgO- β - Ca_2SiO_4 , γ - $Ca_2Al_2SiO_7$

^q enfriamiento rápido
- tipo de escoria no proporcionado

Tabla 2.13 Composición mineralógica escoria

⁷⁰ Reddy, A. S., R. K. Pradhan and S. Chandra (2006). "Utilization of Basic Oxygen Furnace (BOF) slag in the production of a hydraulic cement binder." *International Journal of Mineral Processing* **79**(2): p.98-105.

⁷¹ Wachsmuth, F., J. Geiseler, W. Fix, K. Koch and K. Schwerdtfeger (1981). "Contribution to the structure of BOF-slugs and its influence on their volume stability." *Canadian Metallurgical Quarterly* **20**(3): p.279-284.

⁷² Manso, J. M., M. Losañez, J. A. Polanco and J. J. González (2005). "Ladle Furnace Slag in Construction." *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. **17**(5): p.513-518.

2.1.4.5. Propiedades físicas

La Tabla 2.14 y Tabla 2.15 recogen las propiedades físicas de las escorias negras y blancas estudiadas en España, incluidas en el Catálogo de Residuos utilizables en Construcción.

Características físicas de los áridos procedentes de escorias negras		
Propiedad	Árido grueso	Árido fino
Tamaño (mm)	4,76-25,0	0-4,76
Densidad aparente (g/cm ³)	3,35	3,70
Absorción (%)	3,29	2,84
Porosidad (%)	10,5	-
Desgaste de los ángeles (%)	≅ 20	-

Tabla 2.14 Características físicas de las escorias negras.

Propiedades físicas de las escorias blancas		
Densidad	g/cm ³	2,65
Superficie específica	cm ² /g	2064

Tabla 2.15 Propiedades físicas de las escorias blancas

Los áridos siderúrgicos procedentes de las escorias negras de acerías de hornos de arco eléctrico tienen una elevada densidad, entre 3,1 y 4,5 (gr/cm³), muy por encima de los áridos naturales^{64,73}.

La absorción de agua de la escoria negra presenta en general valores entre 1% y 4%^{27,64,74} en volumen y en algunos próximos al 7%. Esta absorción puede influir en la durabilidad si el árido va a estar sometido a ciclos hielo-deshielo o humedad-sequedad¹⁰.

⁶⁴ Etxeberria, M., C. Pacheco, J. M. Meneses and I. Berridi (2010). "Properties of concrete using metallurgical industrial by-products as aggregates." *Construction and Building Materials* **24**(9): p.1594-1600.

⁷³ Japan-society-of-Civil-Engineers (2004). *Recommendations for design and construction of concrete structures using electric arc furnace oxidizing slag aggregate*. ISBN-4-8106-0478-0.

²⁷ IHOBE, S. A. (1999). "Libro Blanco de Minimización de Residuos y Emisiones de Escorias de Acería", Departamento de Ordenación del Territorio, Vivienda y Medio Ambiente del Gobierno Vasco.

⁷⁴ Tomasiello, S. and M. Felitti (2010). "EAF Slag in self-compacting concretes." *Architecture and Civil Engineering* **vol 8 (1)**: p.13-21.

¹⁰ CEDEX (2013). "Catálogo de Residuos utilizables en construcción. Escorias de acería de horno eléctrico de arco" [<http://www.cedexmateriales.vsf.es/view/archivos/residuos/217.pdf>], Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. Ministerio de Medio Ambiente Rural y Marino. Ministerio de Fomento.

2.1.4.6. Estabilidad volumétrica

El comité de normalización CEN/TC 154, incluye en la norma EN-1744-1⁷⁵ métodos para la determinación de la estabilidad volumétrica de la escoria cuando se utiliza como árido, reconociendo 3 tipos posibles de reacciones expansivas en las mismas: la hidratación de los compuestos de hierro, la transformación de la forma metaestable β -C₂S en la forma estable γ -C₂S, más propia de las escorias de horno alto, y la hidratación de la cal libre y/o periclasa⁵⁰.

El enfriamiento brusco de la escoria puede producir importantes variaciones en su volumen como consecuencia del cambio polimórfico del silicato bicálcico, produciéndose cambios en las formas cristalinas.

Entre los 400 y 500°C, la forma cristalina en equilibrio beta β , con la pérdida de temperatura, se desestabiliza transformándose en la forma cristalina γ . Este proceso alotrópico de transformación determina incrementos de volumen entre el 10 al 12% respecto de la fase inicial. El efecto inmediato de este incremento es la fractura de la escoria como consecuencia de las tensiones internas que el cambio brusco de temperatura genera en su estructura, favoreciendo su desintegración, lo que contribuye a facilitar su manipulación y los posteriores procesos de machaqueo y molienda en tamaños menores⁷⁶.

Por otro lado, la inestabilidad volumétrica de las escorias depende fundamentalmente de dos factores:

- La hidratación de la cal libre
- La hidratación del óxido de magnesio libre

Debido a la presencia de estos óxidos libres en su composición, las escorias negras de acería tienen naturaleza expansiva. La cal libre se hidrata rápidamente y puede originar grandes cambios de volumen en pocas semanas, mientras que la hidratación del magnesio se produce mucho más lentamente¹⁰.

La Dra. Amaral recoge en su Tesis "*Hormigones con escoria de horno eléctrico como áridos: propiedades, durabilidad y comportamiento ambiental*"⁷⁷ un estudio exhaustivo del comportamiento de las escorias como árido en la fabricación de hormigones, un análisis de la interacción

⁷⁵ AENOR (2013). "UNE-EN 1744-1. Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos. Parte 1: Análisis químico". Madrid, Aenor.

⁵⁰ Vázquez Ramonich, E. and M. Barra (2001). "Reactivity and expansion of electric arc furnace slag in their application in construction." *Materiales De Construcción* **51**(263-64): p.137-148.

⁷⁶ Arribas García, I. (2011). "Estudio y diseño de hormigones estructurales basados en la incorporación de subproductos siderúrgicos: viabilidad técnica", Universidad del País Vasco.

⁷⁷ Amaral de Lima, L. (1999). "Hormigones con escorias de horno eléctrico como áridos: propiedades, durabilidad y comportamiento ambiental", Politécnica de Catalunya.

entre la escoria y el resto de componentes del hormigón, así como criterios para la preparación de la escoria previamente a su utilización, para garantizar su estabilidad volumétrica.

De acuerdo con estudios previos realizados sobre la escoria negra EAF³, parece coherente atribuir a la magnesia libre en forma cristalina de periclasa, una parte muy significativa de la expansividad potencial de la escoria, mientras que la cal libre contribuye en menor medida a la misma. No obstante, la presencia de magnesia libre sólo afecta a la estabilidad de las escorias si su contenido supera el 4% del peso.

Los autores de esta investigación añadieron una serie de recomendaciones para su empleo posterior, como por ejemplo, llevar a cabo una exposición prolongada a la intemperie tras su machaqueo al tamaño final.

Concluye en la necesidad del volteo periódico de los acopios de escoria negra EAF machacada, para que se igualen las condiciones ambientales de toda la masa. Demuestra que los ciclos noche-día, en los que la humedad pasa de un ambiente más seco a otro más húmedo, influyen en el posterior comportamiento y estabilidad de la escoria. De esta forma, presentan expansividades potenciales inferiores al 0,5%, suficientemente estables para su uso en la fabricación de hormigones, tal y como demuestran sus trabajos.

Por otra parte, la resistencia al hinchamiento de la escoria puede deberse a la su porosidad interna, su granulometría o al tamaño de grano de la cal libre⁷⁸.

Con independencia de la influencia de todos estos factores, lo que se debe garantizar es la estabilidad volumétrica de la escoria antes de ser utilizada en otros cometidos, exponiéndola a la intemperie en los propios acopios hasta conseguir un material invariable.

Existen investigaciones previas³⁴, en las que se caracterizan químicamente dos escorias negras de Horno de Arco Eléctrico con diferente procedencia y se cuantifican algunos de los principales compuestos conocidos por sus efectos expansivos, tales como la cal libre, la magnesia libre, los cloruros y los sulfatos. Las conclusiones a las que se llega en este estudio es que ambas escorias negras muestran que estos compuestos nocivos están presentes en cantidades insignificantes o nulas, por lo que no deben tener ningún problema de inestabilidad en presencia de agua, cuando se utilicen como árido reciclado.

³ Manso Villalaín, J. M. (2001). "Fabricación de hormigón hidráulico con escoria negra de horno eléctrico de arco" Tesis doctoral, Universidad de Burgos.

⁷⁸ González Martínez, J. J. (1999). Estudio del hinchamiento de la escoria de horno eléctrico de arco. Valoración como material de construcción. Informe final Proyecto de Investigación Universidad-Empresa UE 97-19. Bilbao 1999.

³⁴ Frías, M., M. I. Sánchez and A. Uría (2002). "Study of the instability of black slags from electric arc furnace steel industry." Materiales de Construcción vol 52(267): p.79-83.

Hay trabajos posteriores⁷⁹, que presentan un estudio de los compuestos potencialmente expansivos (Cl^- , SO_3 , CaO libre y MgO libre) de los áridos siderúrgicos, así como su evolución después de un proceso de envejecimiento. El envejecimiento habitual dado a la escoria negra, para asegurar su estabilidad en volumen, se caracteriza por extender el material en una superficie amplia, voltearlo y someterlo a ciclos de humectación-secado. La evolución de los contenidos de los compuestos expansivos pone de manifiesto que 45 días de tratamiento son suficientes. Periodos más largos (entre 45 y 90 días) no aportan más efectividad.

Por otro lado, la estabilidad volumétrica de la escoria blanca fue estudiada por otros autores¹⁸ que proponen una serie de procesos previos a su utilización que permitan convertirla en un material homogéneo y estable. Los pasos a seguir serían los siguientes:

- Remover las escorias apiladas en los vertederos, que origine un comportamiento uniforme del material mediante la meteorización de sus componentes mineralógicos.
- Regado de las escorias mediante aspersores que faciliten la hidratación del óxido de calcio y de magnesio.
- Cubrir las escorias con lonas para protegerlas del viento o introducirlas en naves hasta su estabilización.

Como se ha comentado anteriormente, la escoria blanca recién extraída del horno contiene sustancias potencialmente expansivas, como la cal libre (lima) o la magnesia libre (periclasa). Al hidratarse estos compuestos, y dependiendo de su concentración en la escoria, pueden producirse incrementos de volumen de entorno al 10%, pudiendo alcanzar en algunos casos el 30%. Concentraciones de portlandita y brucita también pueden producir carbonataciones más a largo plazo.

Una vez hidratados los componentes expansivos se forman hidróxidos cálcicos (portlandita) e hidróxidos magnésicos (brucita). La hidratación de estos componentes produce la disgregación de la escoria en fragmentos de menor tamaño, dando lugar a un material disgregado de aspecto granulado.

Dependiendo del grado de meteorización, la escoria se comportará como un material más o menos estable en función de la hidratación producida en la cal libre y la magnesia libre. La durabilidad y estabilidad de los materiales fabricados con la escoria dependerá de los tratamientos de estabilización a los que se la haya sometido, previos a su utilización.

⁷⁹ Frías Rojas, M. and M. I. Sánchez de Rojas (2004). "Chemical assessment of the electric arc furnace slag as construction material: Expansive compounds." Cement and Concrete Research vol 34(10): p.1881-1888.

¹⁸ Losáñez, M. (2005). "Aprovechamiento integral de escorias blancas y negras de acería eléctrica en construcción y obra civil", Universidad del País Vasco.

2.1.4.7. Valorización y aplicaciones

La valorización de las escorias como material apto para otros usos puede orientarse desde varios puntos de vista:

- a) Utilizándolas directamente sin un procesado previo y sin tratamientos físico-mecánicos para su transformación.
- b) Someterlas a una serie de procesos (machaqueo, separación magnética, cribado...) para convertirlas en un material granulado estable, denominado "árido siderúrgico".

Tradicionalmente, las escorias negras BOF y EAF se han empleado de manera directa en la preparación de bases y subbases de plataformas de carreteras y calzadas de caminos, para capas de rodadura e incluso en vías férreas^{80,81,82,83}. La justificación de uso es debido a su excelente resistencia a la abrasión, por lo que su desgaste es bajo^{84,39}.

También, aunque de manera puntual, y debido a la falta de uniformidad en las características del producto, se han empleado las escorias en escolleras como material fino de relleno, acompañando a rocas de mayor tamaño¹⁹.

Si lo que se pretende es utilizar la escoria como árido siderúrgico, debe someterse a diversos tratamientos previos para asegurar su estabilidad, propiciando con anterioridad a su utilización los fenómenos de expansividad mediante una exposición inducida a la intemperie, que asegure posteriormente su comportamiento inerte⁷⁸.

⁸⁰ Rubio, A. R. and J. G. Carretero (1991). "La aplicación de las escorias de acería en carreteras." Ingeniería Civil vol 80: p.5-9.

⁸¹ Motz, H. and J. Geiseler (2001). "Products of steel slags an opportunity to save natural resources." Waste Management vol 21(3): p.285-293.

⁸² Thomas, G. H. (1983). Investigations on LD slag with particular reference to its use for road construction. Final report British Steel Corporation. Commission of the European Communities, Eds. EUR 8622 EN.

⁸³ Xie, J., S. P. Wu, J. T. Lin, J. Cai, Z. W. Chen and W. Wei (2012). "Recycling of basic oxygen furnace slag in asphalt mixture: Material characterization & moisture damage investigation." Construction and Building Materials 36: p.467-474.

⁸⁴ Jones, N. (2001). The successful use of EAF slag in asphalt. Proc., 2nd European Slag Conf: p.123-135.

³⁹ Pasetto, M. and N. Baldo (2010). "Experimental evaluation of high performance base course and road base asphalt concrete with electric arc furnace steel slags." Journal of hazardous materials vol 181(1): p. 938-948.

¹⁹ Geiseler, J. and R. Schlosser (1986). Criteria for the Utilization of Electric Furnace Slags.(Retroactive Coverage). European Electric Steel Congress(Congresso Europeo sull' Acciaio Elettrico). II, Florence.

⁷⁸ González Martínez, J. J. (1999). Estudio del hinchamiento de la escoria de horno eléctrico de arco. Valoración como material de construcción. Informe final Proyecto de Investigación Universidad-Empresa UE 97-19. Bilbao 1999.

En la actualidad, los tratamientos más habituales para conseguir árido siderúrgico estabilizado a partir de escorias negras son, en primer lugar, el granulado de la escoria mediante machaqueo, así como su triturado y molienda hasta alcanzar un tamaño adecuado a su uso y, en segundo lugar, el depósito posterior de la escoria granulada a la intemperie para favorecer su exposición al agua de lluvia, nieve o a la propia humedad relativa ambiental y, de esta manera, propiciar su meteorización⁸⁵.

En un estudio, Frías⁸⁶ analiza la evolución de los compuestos potencialmente expansivos (cloruros, sulfatos, cal y magnesia libre, y óxido de hierro) de las escorias durante un determinado proceso de envejecimiento (trituración, molienda y homogeneización del material en una superficie amplia entre 45 y 90 días), concluyendo la existencia de concentraciones de MgO libre por debajo del 1%, por lo que las escorias negras son aptas como productos reciclados en hormigones debido a su estabilidad volumétrica.

Las escorias blancas de acería eléctrica LF pueden utilizarse como adición activa o inerte en la preparación de cementos Portland^{87,15,88,89}, debido a las características cementantes de las mismas⁹⁰.

También pueden emplearse en la estabilización de suelos^{91,92}, como mezclas de pavimentación de caminos rurales con bajos niveles de tráfico⁷². Otros trabajos⁹³ estudian el comportamiento expansivo de la

⁸⁵ Manso, J. M., J. J. González and J. A. Polanco (2004). "Electric Arc Furnace Slag in Concrete." *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 16(6): p.639-645.

⁸⁶ Frías, M., J. T. San-Jose and I. Vegas (2010). "Steel slag aggregate in concrete: the effect of ageing on potentially expansive compounds." *Materiales de Construcción* vol 60(297): p.33-46.

⁸⁷ Tüfekçi, M., A. Demirbaş and H. Genç (1997). "Evaluation of steel furnace slags as cement additives." *Cement and Concrete Research* vol 27(11): p.1713-1717.

¹⁵ Shi, C. J. and J. S. Qian (2000). "High performance cementing materials from industrial slags - a review." *Resources Conservation and Recycling* 29(3): p.195-207.

⁸⁸ Richardson, I. G. and J. G. Cabrera (2000). "The nature of C-S-H in model slag-cements." *Cement & Concrete Composites* vol 22(4): p.259-266.

⁸⁹ Akin Altun, I. and I. Yilmaz (2002). "Study on steel furnace slags with high MgO as additive in Portland cement." *Cement and Concrete Research*, vol 32(8): p. 1247-1249.

⁹⁰ Papayianni, I. and E. Anastasiou (2012). "Effect of granulometry on cementitious properties of ladle furnace slag." *Cement & Concrete Composites* 34(3): p.400-407.

⁹¹ Manso, J. M., V. Ortega-Lopez, J. A. Polanco and J. Setien (2013). "The use of ladle furnace slag in soil stabilization." *Construction and Building Materials* vol 40: p.126-134.

⁹² Ortega-López, V., J. M. Manso, I. I. Cuesta and J. J. González (2014). "The long-term accelerated expansion of various ladle-furnace basic slags and their soil-stabilization applications." *Ibid.* vol 68(0): p. 455-464.

⁷² Manso, J. M., M. Losañez, J. A. Polanco and J. J. González (2005). "Ladle Furnace Slag in Construction." *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 17(5): p.513-518.

escoria blanca en la ejecución de terraplenes determinando que, aunque es factible su utilización, no todos los suelos son adecuados para su estabilización con LF.

La Doctora M. Losáñez¹⁸, estudia el empleo de escorias blancas LF como finos en mezclas bituminosas, como mezcla con el terreno natural o con otros áridos para la estabilización de suelos y firmes de caminos o carreteras, así como su empleo como material en la preparación de morteros para construcción, tanto de albañilería como de revoco y enlucido.

Con posteridad, el Dr. Rodríguez²⁶, estudia su empleo en la fabricación de morteros para albañilería, utilizando la escoria blanca como un agregado para corregir la curva granulométrica de las arenas gruesas, así como sustituyendo parcialmente el cemento^{43,94}.

Con posterioridad, existen estudios que investigan la durabilidad de los morteros realizados con escoria blanca⁴⁴, generando un ahorro de arena y cemento, concluyendo que, en general, los morteros realizados con escoria blanca LF presentan un comportamiento similar a los morteros convencionales frente a los agentes agresivos. Además, en pruebas críticas, como los ciclos de humedad-sequedad, los morteros LF son claramente más eficaces que los convencionales.

Así mismo, hay trabajos que estudian la durabilidad de hormigones elaborados con escorias negras EAF⁹⁵, en los que el comportamiento de estos hormigones fue similar o superior a los de referencia, ejecutados con áridos naturales, excepto en el caso de la exposición a ambientes marinos y de agua de mar, por lo que la penetración de cloruros fue mayor.

⁹³ Montenegro, J. M., M. Celemín-Matachana, J. Cañizal and J. Setién (2013). "Ladle furnace slag in the construction of embankments: Expansive behavior." Journal of Materials in Civil Engineering vol 25(8): p.972-979.

¹⁸ Losáñez, M. (2005). "Aprovechamiento integral de escorias blancas y negras de acería eléctrica en construcción y obra civil", Universidad del País Vasco.

²⁶ Rodríguez Sáiz, A. (2008). "Fabricación de morteros de albañilería con escoria blanca de horno cuchara y su utilización en construcción" Tesis doctoral, Universidad de Burgos.

⁴³ Rodríguez, A., J. M. Manso, Á. Aragón and J. J. González (2009). "Strength and workability of masonry mortars manufactured with ladle furnace slag." Resources, Conservation and Recycling vol. 53: p.645-651.

⁹⁴ Prieto, M. I., A. Cobo, A. Rodriguez and V. Calderon (2013). "Corrosion behavior of reinforcement bars embedded in mortar specimens containing ladle furnace slag in partial substitution of aggregate and cement." Construction and Building Materials 38: p.188-194.

⁴⁴ Manso, J. M., A. Rodríguez, Á. Aragón and J. J. González (2011). "The durability of masonry mortars made with ladle furnace slag." Construction and Building Materials vol 25(8): p.3508-3519.

⁹⁵ Arribas, I., I. Vegas, J. T. San-José and J. M. Manso (2014). "Durability studies on steelmaking slag concretes." Materials and Design vol 63: p.168-176.

Otros trabajos^{47,48}, investigan hormigones ejecutados con escoria negra EAF y escoria blanca LF, obteniendo una buena resistencia mecánica con bajos contenidos de cemento. Así mismo, concluyen que el comportamiento expansivo a largo plazo de los hormigones es, en general, aceptable.

Publicaciones recientes⁹⁶ estudian hormigones auto-compactados que contienen escoria blanca LF y fibras de acero, en los que el uso de LF parece tener un efecto positivo en las resistencias a compresión de los hormigones, así como en los ciclos hielo-deshielo y la resistencia a la penetración de cloruro.

Otros trabajos estudian el uso de dos tipos distintos de escoria EAF en la elaboración de hormigón estructural⁹⁷, en los que las resistencias mecánicas son similares a los hormigones tradicionales.

Una vez establecida la viabilidad de utilización de la escoria negra y escoria blanca como árido siderúrgico en la fabricación de hormigones y morteros para la construcción, en esta Tesis Doctoral se pretende examinar el empleo de ambos tipos de escoria conjuntamente, en sustitución parcial y total del árido empleado en la fabricación de morteros de albañilería con prestaciones similares a las de los morteros convencionales.

2.2. MORTEROS DE ALBAÑILERÍA

Una vez analizados los tipos de las escorias siderúrgicas con sus aplicaciones y avances más recientes, ahora se centra la atención en los morteros de albañilería.

2.2.1. Breve reseña histórica

El estudio del origen de los morteros de albañilería está íntimamente unido al de los conglomerantes que participan en su composición, por lo que procede analizar la evolución de éstos a través de la historia.

Los conglomerantes tradicionales que han perdurado en el tiempo hasta nuestros días, con las modificaciones lógicas de la evolución técnica, son el yeso, la cal y el cemento.

Las primeras referencias históricas se encuentran en las civilizaciones del Continente Americano hace 5.000 años. Concretamente, en la

⁴⁷ Polanco, J. A., J. M. Manso, J. Setién and J. J. González (2011). "Strength and durability of concrete made with electric steelmaking slag." *ACI Materials Journal* vol 108(2): p.196-203.

⁴⁸ Manso, J. M., D. Hernández, M. M. Losáñez and J. J. González (2011) "Design and elaboration of concrete mixtures using steelmaking slags." *ACI Materials Journal* vol 108(6), p.673-681.

⁹⁶ Anastasiou, E. K., I. Papayianni and M. Papachristoforou (2014). "Behavior of self compacting concrete containing ladle furnace slag and steel fiber reinforcement." *Materials and Design* vol 59: p.454-460.

⁹⁷ San-José, J. T., I. Vegas, I. Arribas and I. Marcos (2014). "The performance of steel-making slag concretes in the hardened state." *Materials & Design* 60(0): 612-619.

confluencia de lo que hoy es Chile, Bolivia y Perú, aparecen las primeras obras de piedra unidas por un conglomerante hidráulico procedente de la calcinación de algas. Estas obras formaban las paredes de las chozas utilizadas por los indígenas⁹⁸.

Los yesos ya se utilizaban en el antiguo Egipto. Emplearon el yeso en la unión de bloques de piedra arenisca de la pirámide de Keops, y los interiores de las cámaras se recubrían con un yeso estucado de color rojo que data del año 2.600 a.C⁹⁹.

No obstante, fueron los griegos y posteriormente los romanos quienes desarrollaron el conocimiento de las cales, tanto aéreas como hidráulicas. Particularmente estos últimos extendieron su conocimiento por todo el mundo conocido hasta entonces.

La fabricación de muros portantes con mortero fabricado con cal y arena data del segundo milenio antes de Cristo y podemos encontrarlos en construcciones civiles de Delos y Thera, donde existen auténticos revocos imitando rejuntado de sillares y mampuestos. En Thera se utilizó, junto a la cal y a la arena, polvo volcánico. Estos morteros eran muy estables en el agua y sus propiedades tienen una cierta analogía con los morteros fabricados con conglomerantes hidráulicos¹⁰⁰.

Para la construcción de bóvedas, muros de ladrillo, acueductos y cloacas, etc., los romanos utilizaban un mortero resistente al agua fabricado con unas proporciones de mezcla exactamente determinadas. A la cal cocida se añadió toba volcánica pulverizada, tierra puzolánica, o también ladrillos pulverizados. A veces era suficiente añadir cal arcillosa para conseguir que el mortero adquiriera características hidráulicas¹⁰¹.

Puede decirse que el origen de los primeros morteros fueron estas mezclas de yeso con cal, tierra arenosa y agua, en el caso de los egipcios, o de cales con arenas, puzolanas y agua, en el caso de los romanos.

En la Edad Media no se producen innovaciones importantes en la técnica de la fabricación de morteros. En los siglos IX, X y XI los morteros son normalmente de baja calidad, poco homogéneos y de peores características que las de los morteros romanos, particularmente por la pérdida de las técnicas de cocción que éstos utilizaban, por lo que se obtenían morteros poco uniformes, fallos en las proporciones y con muchas impurezas¹⁰⁰.

⁹⁸ Rodríguez-Mora, O. (2003). "Morteros: guía general", AFAM, Asociación Nacional de Fabricantes de Mortero.

⁹⁹ Alejandro Sánchez, F. J. (2002). "Historia, caracterización y restauración de morteros". Sevilla, Universidad de Sevilla.

¹⁰⁰ Gárate Rojas, I. (1993). "Artes de la cal". Madrid, Ministerio de Cultura. Dirección General de Bellas Artes y Archivos. Instituto de Conservación y Restauración de Bienes Culturales.

¹⁰¹ Schmitt, H. and A. Heene (2004). "Tratado de Construcción", Editorial Gustavo Gili, SA.

Los análisis y estudios realizados a principios del siglo XIX por el ingeniero francés Louis Vicat determinaron el comportamiento hidráulico de las mezclas de caliza y arcilla, y establecieron las bases para la preparación de los cementos artificiales, mediante la mezcla de calizas y arcillas dosificadas en las proporciones convenientes y molidas conjuntamente.

Es en 1824 cuando James Parker y Joseph Aspdin patentan el “Cemento Artificial Portland”, consiguiendo un producto con excelentes propiedades hidráulicas y de resistencia que denominaron “Clinker”.

El Cemento Portland ha seguido una evolución tecnológica y científica muy importante, paralela a la que ha experimentado la fabricación de morteros. En los últimos años, se ha producido un desplazamiento de los morteros preparados “*in situ*” a favor de los morteros industriales preparados en fábrica, donde el desarrollo de morteros secos ha tomado protagonismo pues se consigue un mayor control en las propiedades de los morteros.

2.2.2. Concepto de mortero

La palabra “*mortero*” se deriva de la expresión latina “*mortarius*”, con la que se designa el caldero que se usó para cocer la cal. Se entiende por mortero¹⁰¹ un material plástico apropiado para cerrar las juntas, de asiento y verticales, y también las que quedan entre las piedras desiguales o irregulares, y conseguir mediante un fraguado un cuerpo resistente a la compresión.

La monografía del Instituto Eduardo Torroja de la Construcción y del Cemento “Morteros de cemento para albañilería”¹⁰², define *mortero de albañilería a la mezcla de un conglomerante con arena que se utiliza para unir elementos de construcción (ladrillos, bloques de hormigón, losetas, tejas, etc.) consigo mismos o con una base, y también para recubrimientos exteriores o interiores de muros.*

La norma UNE EN 998-2 “Especificaciones de los morteros para albañilería. Parte 2: Morteros para albañilería”¹⁰³, y la norma UNE EN 998-1 “Especificaciones de los morteros para albañilería. Parte 1: Morteros para revoco y enlucido”¹⁰⁴ establecen que el mortero es *una mezcla compuesta de uno o más conglomerantes inorgánicos, áridos, agua y a veces adiciones y/o aditivos.*

En función del concepto de mortero, la norma define varios tipos:

¹⁰² Valdehita Rosello, M. T. (1976). “Morteros de cemento para albañilería”. Madrid, Patronato Juan de la Cierva de Investigación Técnica. Instituto Eduardo Torroja de la Construcción y del Cemento. Consejo Superior de Investigaciones Científicas.

¹⁰³ AENOR (2004). “UNE-EN 998-2 Especificaciones de los morteros para albañilería. Parte 2: Morteros para albañilería”, Madrid, Aenor.

¹⁰⁴ AENOR (2003). “UNE-EN 998-1 Especificaciones de los morteros para albañilería. Parte 1: Morteros para revoco y enlucido”, Madrid, Aenor.

- **Mortero diseñado**, aquel cuya composición y sistema de fabricación se han elegido por el fabricante con el fin de obtener las propiedades especificadas (concepto de prestación).
- Mortero prescrito, aquel que se fabrica en unas proporciones predeterminadas y cuyas propiedades dependen de las proporciones de los componentes que se han declarado (concepto de receta).

Con relación al sistema de fabricación la norma discrimina entre:

- **Mortero hecho en fábrica (industrial)**, aquel mortero dosificado y mezclado en una fábrica. Puede ser "**mortero seco**" si es una mezcla preparada y que solamente requiere la adición de agua o "**mortero húmedo**" si se suministra listo para su empleo.
- Mortero predosificado, aquel cuyos componentes se dosifican por completo en una fábrica y se suministran al lugar de su utilización en donde se mezclan de acuerdo con las especificaciones y condiciones indicadas por el fabricante.
- Mortero premezclado de cal y arena, aquel cuyos componentes se han dosificado y mezclado por completo en una fábrica y se suministran al lugar de su utilización en donde se añaden otros componentes especificados o suministrados por la fábrica (p.ej: cemento).
- Mortero hecho en obra, aquel compuesto por los componentes individuales dosificados y mezclados en la obra.

El principal objetivo de esta Tesis Doctoral es precisamente analizar las propiedades de un mortero seco fabricado con materiales tradicionales, con una dosificación en peso 1/6 (1 parte de cemento y 6 partes de árido), y compararlo con otros morteros alternativos elaborados con áridos siderúrgicos.

A continuación se procede al estudio somero de los componentes del mortero, estableciendo los rasgos más característicos de su participación en las mezclas.

2.2.2.1. Conglomerante

La norma UNE EN 197-1 "Cemento. Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes"¹⁰⁵, define cemento como un *conglomerante hidráulico, es decir, un material inorgánico finamente molido que, amasado con agua, forma una pasta que fragua y endurece por medio de reacciones y procesos de hidratación y que, una vez endurecido, conserva su resistencia y estabilidad bajo el agua.*

¹⁰⁵ AENOR (2005). "UNE-EN 197-1:2000/A1 Cemento. Parte1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes", Madrid, Aenor.

El cemento se obtiene mezclando fragmentos de rocas calizas, arcillas y otros componentes minoritarios correctores, cociéndolos por encima de la temperatura de clinkerización o sinterización (1.450°C), y moliendo el clinker resultante con la adición de entre el 3,5-4,5% en peso de yeso, como regulador de fraguado.

La gran variedad de tipos de cemento que existen en la actualidad se recogen en la Instrucción para la Recepción de Cementos (RC-08)¹⁰⁶. En la actualidad, el conglomerante utilizado habitualmente en la fabricación de morteros es el cemento Portland. No obstante, se ha empleado de modo tradicional la cal, tanto por separado formando "Morteros de Cal", como junto al cemento, formando lo que se conoce como "Morteros Bastardos".

2.2.2.2. Agua

El agua a emplear en la elaboración de morteros debe ser inocua, no debe contener elementos perjudiciales que puedan llegar a afectar las propiedades del mortero.

No contendrá sustancias solubles que puedan producir eflorescencias, estará exenta de sulfatos o cloruros que puedan afectar a las armaduras, no contendrá sustancias de carácter orgánico que puedan alterar las reacciones de hidratación de los conglomerantes o inhibir los procesos de fraguado y endurecimiento.

En general, para la fabricación de morteros sirve cualquier tipo de agua apta para el consumo y habitualmente utilizada y suministrada en la red de agua potable.

En cualquier caso, para garantizar su calidad y aptitud en la preparación de morteros, se deberían realizar análisis químicos previos a su utilización.

2.2.2.3. Áridos

Para los áridos utilizados en la fabricación de morteros se dispone de la Norma Europea UNE-EN 13139 "Áridos para morteros"¹⁰⁷, que es la norma armonizada de la Norma Europea EN 13139 aprobada en mayo 2002 por el Comité Europeo de Normalización (CEN/TC 154 Áridos). Esta norma especifica las propiedades de los áridos y del filler de los áridos obtenidos por un proceso natural, materiales fabricados o reciclados, y las mezclas de estos áridos para utilizarlos en los morteros.

¹⁰⁶ Ministerio-Fomento (2009). "RC-08 Instrucción para la recepción de cementos". Madrid, Centro de Publicaciones, Secretaría General Técnica, Ministerio de Fomento.

¹⁰⁷ AENOR (2003). "UNE-EN 13139 Áridos para morteros", Madrid, Aenor.

⁹⁸ Rodríguez-Mora, O. (2003). "Morteros: guía general", AFAM, Asociación Nacional de Fabricantes de Mortero.

Según su procedencia y método de obtención, los áridos pueden clasificarse en naturales (granulares o de machaqueo), artificiales o reciclados⁹⁸.

Se entiende por áridos naturales los de origen mineral que únicamente han sido sometidos a un proceso mecánico. Así, podemos diferenciar entre áridos naturales granulares, obtenidos básicamente en graveras, de naturaleza silíceas, con forma redondeada y superficies lisas y sin aristas, y áridos naturales de machaqueo, producidos en canteras, triturados, molidos y clasificados, de naturaleza caliza, con superficies rugosas y aristas vivas.

La norma también contempla la utilización de los denominados áridos artificiales, de naturaleza mineral y que tienen su origen en un proceso industrial que comprende una modificación térmica o de otro tipo. Son las escorias siderúrgicas, cenizas volantes de la combustión del carbón, filleres, etc.

Por último, define los áridos reciclados como los resultantes del tratamiento de material inorgánico previamente empleado en la construcción. Éstos se denominan actualmente "Residuos de Construcción Demolición" (RCD), que deben ser depositados en vertederos controlados para su clasificación y tratamiento.

2.2.2.3.1. *Propiedades geométricas*

La norma UNE-EN 13139 expone que los áridos se designan empleando la expresión d/D , donde d corresponde al límite menor del tamiz (mm) y D al límite superior del tamiz (mm), dentro de los cuales se encuentra la mayor parte del árido, excepto para los áridos adicionales como filleres, que deben ser descritos como filler del árido.

La distribución de los distintos tamaños de partículas que integran un árido, expresada como porcentajes en masa que pasan por un conjunto específico de tamices, se denomina granulometría de un árido.

La norma UNE-EN 933-2 "Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 2: Determinación de la granulometría de las partículas. Tamices de ensayo, tamaño nominal de las aberturas"¹⁰⁸ recoge una serie de tamices constituido por las siguientes luces de malla:

0,063- 0,125- 0,250- 0,500- 1,00- 2,00- 4,00 mm

El árido grueso se corresponde con la fracción del material cuyo tamaño $D \geq 4$ mm y $d \geq 2$ mm.

El árido fino es aquel cuyo diámetro nominal $D \leq 4$ mm.

El filler del árido es aquel que presenta al menos un 70% de pasa en el tamiz de 0,063 mm.

¹⁰⁸ AENOR (1996). "UNE-EN 933-2 Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 2: Determinación de la granulometría de las partículas. Tamices de ensayo, tamaño nominal de las aberturas", Madrid, Aenor.

Según la norma, se prefieren los siguientes tamaños de árido:

0/1 mm, 0/2 mm, 0/4 mm, 0/8 mm, 2/4 mm, 2/8 mm.



Figura 2.7 Tamices de ensayo según UNE-EN 933-2

Los límites para los tamaños superiores e inferiores deben estar conformes con los valores de la Tabla 2.16, excepto cuando, para usos especiales, se especifiquen otros límites.

Tamaño de los áridos mm	Límites en porcentaje, en masa, que pasa				
	Límites superiores			Límites inferiores	
	$2 D^a$	$1,4 D^b$	D^c	d	$0,5 d^b$
0/1	100	95 a 100	85 a 99	-	-
0/2	100	95 a 100	85 a 99	-	-
0/4	100	95 a 100	85 a 99	-	-
0/8	100	98 a 100	90 a 99	-	-
2/4	100	95 a 100	85 a 99	0 a 20	0 a 5
2/8	100	98 a 100	85 a 99	0 a 20	0 a 5

^a Cuando sea esencial para empleos especiales el tamiz por el que pase el 100 % del árido se puede especificar por un valor inferior a $2 D$. Para mortero de capa fina (0/1), el 100 % del árido debe pasar por D .

^b Cuando los tamices calculados para el $0,5 d$ y $1,4 D$ no sean números exactos de la serie ISO 565:1990/R20, se debe adoptar la dimensión más próxima del tamiz.

^c Si el porcentaje que pasa por D es superior al 99 % en masa, el productor debe documentar y declarar la granulometría típica, incluyendo los tamices identificados en la tabla 2

Tabla 2.16 Límites superior e inferior de tamaño de árido.

La granulometría del filler del árido, determinado de acuerdo con la Norma UNE-EN 933-1 "Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 1: Determinación de la granulometría de

las partículas. Método del tamizado¹⁰⁹ debe estar conforme con los límites especificados en la Tabla 2.17

Tamaño del Tamiz mm	Porcentaje, en masa, que pasa	
	Intervalo completo de resultados individuales	Intervalo de granulometría máximo declarado por el productor para el 90% de los resultados
2,00	100	-
0,125	85 a 100	10
0,063	70 a 100	10

Tabla 2.17 Requisitos de granulometría para el filler del árido

Asimismo, la norma especifica el contenido en finos en el árido, el cual no debe exceder los límites reflejados en la Tabla 2.18.

Tamaño del árido mm	Porcentaje máximo, en masa, que pasa por el tamiz de 0,063 mm				
	Categoría 1	Categoría 2	Categoría 3	Categoría 4	Categoría 5
0/1 ^a	3	5	8	30	>30 ^a
0/2	3	5	8	30	
0/4; 2/4 ^b	3	5	8	30	
0/8; 2/8 ^b	3	5	8	11	

^a Valor declarado por el productor
^b Los tamaños de árido 2/4 y 2/8 se usan en los morteros en combinación con los tamaños 0/1, 0/2, 0/4 y 0/8. Las combinaciones de tamaños de árido deben estar conformes con los límites para el contenido en finos para el tamaño correspondiente del árido combinado.

Tabla 2.18 Límites del contenido en finos

La categoría de cada árido está relacionada con su utilización en la fabricación de morteros, por lo que la Norma también limita los usos para cada categoría, reflejados en la Tabla 2.19.

Categorías de aplicación según los finos	
Categoría	Tipo de Mortero
Categoría 1	Morteros para pavimentos, morteros proyectados, morteros para reparación, pastas. (Todo tipo de áridos).
Categoría 2	Morteros para revocos y enlucidos. (Todo tipo de áridos)
Categoría 3	Morteros para albañilería. (Todos los áridos, excepto la roca triturada)
Categoría 4	Morteros para albañilería (Roca triturada)

Tabla 2.19 Categorías de aplicación

¹⁰⁹ AENOR (1998). "UNE-EN 933-1 Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 1: Determinación de la granulometría de las partículas. Método del tamizado", Madrid, Aenor.

Además, la norma define el Módulo de Finura (MF), expresado en porcentaje, como la suma de los porcentajes acumulados, en masa, retenidos en los tamices siguientes (mm):

$$MF = \frac{\sum\{(> 4) + (> 2) + (> 1) + (> 0,5) + (> 0,25) + (> 0,125)\}}{100}$$

El Módulo de Finura o Módulo Granulométrico da una idea del tamaño medio del árido empleado en un mortero. Pueden existir infinidad de áridos con el mismo Módulo Granulométrico que tengan granulometrías totalmente diferentes. No obstante, resulta adecuado conocer su valor debido a que todas las mezclas de áridos que poseen el mismo módulo precisan la misma cantidad de agua para producir morteros de la misma trabajabilidad y resistencia⁹⁸.

2.2.2.3.2. Requisitos físicos

La norma UNE-EN 13139, establece el conocimiento de los siguientes requisitos físicos de los áridos empleados en la fabricación de morteros: densidad de las partículas, absorción de agua y resistencia al hielo y deshielo, de acuerdo con la Norma Europea UNE-EN 1097-6 "Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 6: Determinación de la densidad de partículas y la absorción de agua"¹¹⁰.

La Instrucción de Hormigón estructural EHE-08¹¹¹, establece limitaciones respecto a los requisitos físico- mecánicos que cumplirán los áridos. Un resumen de las limitaciones se especifican en la Tabla 2.20.

Limitaciones físico- mecánicas según EHE		
	Árido fino	Árido grueso
Índice de lajas, según UNE-EN 933-3	< 35%	< 35%
Desgaste de los ángeles, según UNE-EN 1097-2	-	≤ 40%
Absorción de agua por los áridos, según UNE-EN 1097-6	≤ 5%	≤ 5%
Pérdida de peso % con cinco ciclos de sulfato magnésico, según UNE-EN 1367-2	-	< 18%

Tabla 2.20 Requisitos físico-mecánicos de los áridos según EHE

⁹⁸ Rodríguez-Mora, O. (2003). "Morteros: guía general", AFAM, Asociación Nacional de Fabricantes de Mortero.

¹¹⁰ AENOR (1997). "UNE-EN 1097-6 Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 6: Determinación de la densidad de partículas y la absorción de agua", Madrid, Aenor.

¹¹¹ Ministerio-Fomento (2008). "Instrucción de Hormigón Estructural. EHE-08". Madrid, Ministerio de Fomento. Centro de publicaciones.

2.2.2.3.3. *Requisitos químicos*

De la misma forma la norma UNE-EN 13139 determina las características químicas de los áridos empleados en la elaboración de morteros, de modo que se garantice su durabilidad en función de su particular utilización final.

Las determinaciones se realizarán de acuerdo con la norma UNE-EN 1744-1 “Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos. Parte 1: Análisis químico”:

- Cloruros solubles en agua
- Sulfatos solubles
- Azufre total
- Materia orgánica
- Sustancias solubles en agua
- Pérdida por calcinación
- Reactividad álcali-árido

Además, la Instrucción de Hormigón estructural EHE-08, establece limitaciones respecto a las sustancias contenidas en su composición que, por posibles reacciones, les hagan incompatibles con el resto de componentes. Un resumen de las limitaciones de carácter cuantitativo se muestra en la Tabla 2.21.

Limitaciones químicas según EHE			
		Árido fino	Árido grueso
Materia orgánica		< 0,5%	< 1%
Material retenido por el tamiz 0,063 UNE 993-2 y que flota en un líquido de peso específico 2, determinado con arreglo al método de ensayo indicado en la UNE-EN 1744-1.		< 0,50 %	< 1,00%
Compuestos totales de azufre expresados en S y referidos al árido seco, determinados con arreglo al método de ensayo indicado en el apartado 11 de UNE-EN 1744-1		< 1,00%	< 1,00%
Sulfatos solubles en ácidos, expresados en SO ₃ y referidos al árido seco, determinados con arreglo al método de ensayo indicado en el apartado 12 la UNE-EN 1744-1		< 0,80%	< 0,80%
Cloruros expresados en Cl ⁻ y referidos al árido seco, determinados con arreglo al método de ensayo indicado en el apartado 7 de UNE-EN 1744-1	Hormigón armado u hormigón en masa que contenga armaduras para reducir la fisuración	< 0,05%	< 0,05%
	Hormigón pretensado	< 0,03%	< 0,03%
Reactividad álcali-árido, según UNE 146509 EX		< 0,04%	< 0,04%

Tabla 2.21 Limitaciones químicas de los áridos según EHE

2.2.2.4. Adiciones

La norma UNE-EN 998-2 define las adiciones como “*material inorgánico finamente dividido (que no es árido, ni conglomerante) que se puede añadir al mortero para mejorar o para obtener propiedades especiales*”.

Se trata de pigmentos, filleres minerales, puzolánicos, cenizas volantes, escorias, etc.

Los colorantes son pigmentos que, añadidos a la mezcla del mortero en el momento de su fabricación, tienen por finalidad dar una coloración distinta a la gris o blanca que normalmente presenta, de acuerdo con unos requerimientos estéticos⁹⁸.

La norma que tipifica el uso de adiciones en el mortero es la norma experimental UNE 83841 EX “Adiciones al hormigón”¹¹², en ella se especifica la cantidad máxima de escorias de horno alto a añadir en un mortero, solamente cuando se emplea cemento CEM I, así como recomendaciones relativas a las condiciones medioambientales.

Estas adiciones mejoran las prestaciones de los morteros, tales como la trabajabilidad, resistencia, retracción de fraguado, calor de hidratación, impermeabilidad, durabilidad.

Debido a la imposibilidad de garantizar la homogeneidad de las dosificaciones y mezclas de los componentes de los morteros fabricados en obra, rara vez se utilizan adiciones en ellos.

2.2.2.5. Aditivos

La norma UNE-EN 998-2 define aditivo como “*material añadido en pequeñas cantidades para obtener las modificaciones especificadas de las propiedades*”.

Estas *pequeñas cantidades* que la norma no concreta se pueden expresar en % del peso del cemento¹¹³ o en peso del aditivo por peso total de los componentes sólidos del mortero (árido + cemento). Los fabricantes siempre especifican un intervalo de dosificación recomendada.

Esta norma describe el aditivo inclusor de aire/plastificante como aquel que incrementa la trabajabilidad, o que permite una reducción del contenido en agua al incorporar, durante el amasado, una cantidad controlada de pequeñas burbujas de aire, uniformemente distribuidas, que permanecen

⁹⁸ Rodríguez-Mora, O. (2003). “Morteros: guía general”, AFAM, Asociación Nacional de Fabricantes de Mortero.

¹¹² AENOR (1996). “UNE 83841 EX Adiciones al hormigón. Escorias granuladas molidas de horno alto. Recomendaciones de uso para las escorias granuladas molidas utilizadas en los hormigones y morteros fabricados con cemento portland tipo I”. Madrid, Aenor.

¹¹³ AENOR (2010). “UNE-EN 934-3 Aditivos para hormigones, morteros y pastas. Parte 3: Aditivos para morteros para albañilería. Definiciones, requisitos, conformidad, marcado y etiquetado”, Madrid, Aenor.

retenidas después del endurecimiento. El otro aditivo que recoge la norma es el retardador de fraguado.

En la Guía General de Morteros publicada por la Asociación de Fabricantes de Mortero (AFAM)⁹⁸, se expone que la dosificación de aditivos inclusores de aire durante el amasado del mortero, da lugar a la formación de pequeñas burbujas de aire, comprendidas entre 10 y 500 micras de diámetro, que se distribuyen uniformemente en toda la masa.

Estas pequeñas burbujas contribuyen a mejorar la docilidad del mortero y su trabajabilidad ya que, por su forma esférica y su carácter elástico, permiten el deslizamiento de sus componentes evitando los rozamientos.

Además, la disposición uniforme de estas burbujas en el conjunto de la masa de mortero permite también romper su red capilar, impidiendo la entrada de agua y de otros productos perjudiciales para la hidratación del cemento, y protegiéndole de la acción de las heladas.

Estas burbujas de aire también son beneficiosas para evitar la segregación de los componentes del mortero ya que, al disminuir la densidad aparente del conjunto, las partículas tienden a mantener sus fuerzas de adhesión.

No obstante, esta pérdida de densidad del mortero por la presencia de aire en su interior provocaría una pérdida de resistencias mecánicas importante.

La Guía General de Morteros de AFAM también estudia las mejoras que produce la inclusión de aditivos plastificantes.

El efecto de los aditivos plastificantes en la masa de mortero produce la dispersión temporal de las partículas de cemento en todo el conjunto, lo que contribuye a mejorar su docilidad al modificar su reología.

Además, los aditivos plastificantes contribuyen a mejorar las prestaciones mecánicas de los morteros y su durabilidad, ya que reducen considerablemente la relación agua/cemento de la dosificación. Por otra parte, prolongan el tiempo de trabajabilidad del mortero, aumentando su plasticidad.

No obstante, un exceso de aditivo plastificante en la dosificación puede prolongar el tiempo de fraguado del cemento y, como consecuencia, no desarrollar resistencias mecánicas a corto plazo.

Otro grupo de aditivos son los retardadores de fraguado, que incrementan el tiempo para que el mortero pase de estado plástico a sólido, prolongando su tiempo de trabajabilidad y puesta en obra. Además, este tipo de aditivos no afecta a las resistencias finales del mortero e incluso las puede aumentar, al permitir una hidratación más lenta y sostenida del cemento, reduciendo su calor de hidratación.

Los aditivos retenedores de agua permiten retener durante más tiempo el agua de amasado, evitando su evaporación. Se obtienen morteros más compactos, con una red capilar más cerrada y de baja absorción de agua.

Por otra parte, reducen la exudación en el caso de granulometrías descompensadas, ausencia de finos o por la presencia de áridos no naturales.

Por último, se analizan también los aditivos hidrofugantes y su efecto positivo en el sellado de la red capilar del mortero, lo que contribuye a reducir su capacidad de absorción de agua a baja presión cuando esté en presencia del agua de lluvia.

Como conclusión, la decisión de utilizar aditivos en los morteros debe ser meditada, buscando el equilibrio entre los beneficios que pueden aportar y los efectos negativos que pudieran producir.

En los morteros secos y diseñados, donde las propiedades del mortero están condicionadas por la naturaleza de sus componentes, es preciso elegir los aditivos necesarios con cautela, garantizando su eficacia mediante su correcta dosificación y distribución homogénea.

2.2.3. Morteros para fábricas de albañilería

La norma UNE EN 998-2, recoge todas las determinaciones relativas a los morteros empleados para fábricas de albañilería (fachadas, muros, pilares, tabiques), rejuntado de uniones y trabazón de albañilería.

Distingue tres tipos de mortero para albañilería según sus propiedades y/o utilización:

- Para uso corriente (G): mortero sin características especiales.
- Para juntas y capas finas (T): mortero diseñado con un tamaño máximo de árido menor a 2 mm.
- Ligero (L): mortero diseñado cuya densidad, en estado endurecido seco, es inferior o igual a 1.300 kg/m^3 .

El Código Técnico de la Edificación, en el Documento Básico de Fábricas, CTE DB SE F¹¹⁴, expone que los morteros corrientes u ordinarios pueden especificarse por:

- Resistencia: se designa por la letra M seguida de la resistencia a compresión en N/mm^2 . (La Tabla 2.22 recoge las clases de mortero diseñados en función de su resistencia)

Clases de mortero							
Clase	M 1	M 2,5	M 5	M 10	M 15	M 20	M d
Resistencia a compresión N/mm^2	1	2,5	5	10	15	20	d
d es una resistencia a compresión mayor de 25 N/mm^2 declarada por el fabricante							

Tabla 2.22 Clases de mortero diseñados.

¹¹⁴ Vivienda, M. d. (2006). "Documento Básico SE-F Seguridad Estructural: Fábrica".

- Dosificación en volumen: se designan por la proporción en volumen de los componentes fundamentales (p.ej. 1:1:5 cemento, cal y arena). La elaboración incluirá las adiciones, aditivos y cantidad de agua con los que se supone se obtiene el valor de f_m supuesto.

Así mismo, el CTE dispone que el mortero ordinario para fábricas convencionales no será inferior a M1 y para fábricas armadas o pretensadas, morteros de junta delgada y morteros ligeros, no será inferior a M4.

Además, establece la relación que existe entre la resistencia del mortero, la resistencia de las piezas y la resistencia final del muro. Para evitar roturas frágiles de los muros, la resistencia a compresión del mortero no debe ser superior a 0,75 veces la resistencia normalizada de las piezas. En la Tabla 2.23 se recogen las resistencias a compresión de las fábricas en función del tipo de pieza y la resistencia del mortero empleado.

Resistencia característica a compresión de fábricas									
Resistencia normalizada de las piezas, f_b (N/mm ²)	5		10		15		20		25
Resistencia del mortero, f_m (N/mm ²)	2,5	3,5	5	7,5	7,5	10	10	15	15
Ladrillo macizo con junta delgada	-	-	3	3	3	3	3	3	3
Ladrillo macizo	2	2	4	4	6	6	8	8	10
Ladrillo perforado	2	2	4	4	5	6	7	8	9
Bloques aligerados	2	2	3	4	5	5	6	7	8
Bloques huecos	1	1	2	3	4	4	5	6	6

Tabla 2.23 Resistencia característica a compresión de fábricas usuales f_k (N/mm²)

Junto con la resistencia a compresión de 5 N/mm², la de 7,5 N/mm² es la más solicitada para los morteros de albañilería preparados en planta.

En la antigua normativa NBE-FL 90¹¹⁵, la resistencia a compresión de 7,5 N/mm² era una referencia tipo (M-80a), sin embargo, la norma UNE EN 998-2 no la contempla en las clases de mortero. (Ver Tabla 2.22).

No obstante, la "Instrucción sobre criterios para la puesta en práctica del marcado CE de los morteros para albañilería"¹¹⁶, admite la posibilidad de "la designación M7,5 a los morteros con resistencia superior a 7,5 N/mm²".

¹¹⁵ Obras Públicas y Transportes, M. d. (1990). "Norma Básica de la Edificación NBE FL-90. Muros resistentes de fábrica de ladrillo", Secretaría General Técnica. Centro de Publicaciones.

¹¹⁶ Industria Comercio y Turismo, M. d. (2004). "Instrucción sobre criterios para la puesta en práctica del marcado CE de los morteros para albañilería".

Este reconocimiento explícito en la Instrucción da cobertura técnica a los morteros de resistencia 7,5 N/mm².

Entre las prestaciones básicas de los morteros de albañilería, se encuentran las siguientes¹¹⁷:

- Coaligar los elementos de mampostería.
- Mantener la resistencia necesaria de la fábrica en las juntas.
- Sellar la fábrica haciéndola estanca al agua pero permeable al vapor de agua.
- Permanecer inalterados estética y dimensionalmente o con unas variaciones tolerables.

La selección de un mortero atañe a múltiples variables donde primarían las funciones que debe desempeñar en el elemento donde se integra. Ninguna combinación de los componentes proporciona el mortero óptimo en todas las propiedades exigibles al material. En muros portantes y muros armados, una alta resistencia a compresión será el factor prevalente a considerar. En cerramientos, muros expuestos a acciones horizontales como viento o empujes o considerables excentricidades, se requerirá valorar especialmente la flexibilidad del conjunto y consecuentemente la adherencia del material. En cerramientos vistos pueden ser especialmente valorables aspectos como la estanqueidad y su acabado o color¹¹⁷.

2.3. OBJETIVOS

2.3.1. Antecedentes

La industria siderúrgica no ha sido ajena al fenómeno de la degradación del entorno, ya que los residuos generados en los procesos de obtención de los aceros, las *escorias*, se han depositado la mayor parte de las veces en acopios o vertederos sin control, propiciando un impacto ambiental evidente, por lo que el reto de la industria siderúrgica en relación con el desarrollo sostenible está en buscar alternativas al depósito sistemático de la escorias en vertederos.

Por este motivo, las administraciones han regulado la gestión de residuos, procurando buscar y aplicar técnicas de reutilización de las escorias siderúrgicas, así como la recuperación de los espacios degradados por esta actividad.

La Decisión de la Comisión 2000/532/CE¹¹⁸ establece una lista comunitaria única en la que se han integrado la lista de residuos y residuos

¹¹⁷ AFAM (2004). "Morteros para fábricas". Madrid, Asociación Nacional de Fabricantes de Mortero.

peligrosos. Las escorias vienen incluidas en dicha lista en el apartado 10 "Residuos de procesos térmicos", apartado 10.02 "Residuos de la industria del hierro y del acero":

- 10.02.01 Residuos del tratamiento de escorias
- 10.02.02 Escorias no tratadas

La Directiva Europea 2008/98/CE sobre Residuos¹¹⁹ establece lo que denomina "*jerarquía de recursos*" y servirá "*de orden de prioridades sobre la prevención y gestión de los residuos*":

- a) prevención
- b) preparación para la reutilización
- c) reciclado
- d) otros tipos de valorización, por ejemplo, la valorización energética, y
- e) eliminación

Así pues, se hace necesario "tratar" las escorias generadas en los procesos industriales de fabricación del acero y prepararlas para su reutilización y ponerlas en valor, es decir, que este residuo sirva a una finalidad útil como sustituto de otros materiales que, de otro modo, habría sido necesario emplear.

De igual forma, la norma española, Ley 10/1998 de Residuos¹²⁰, determina el objetivo de prevenir la producción de residuos, establecer el régimen jurídico de su producción y gestión y fomentar, por este orden, su reducción, reutilización, reciclado y otras formas de valorización. Esta normativa cataloga en su anexo a las escorias como residuo en el apartado "Q8 Residuos de procesos industriales (por ejemplo, escorias, posos de destilación, etc.)"

Además, la ley establece la obligación de elaborar y aprobar Planes Nacionales de Residuos que se confeccionarán mediante la integración de los respectivos Planes Autonómicos. Por ello, se elaboró en 2009 el Plan Nacional Integrado de Residuos (PNIR)¹²¹, donde se incluyen el tratamiento

¹¹⁸ (2000). Decisión 2000/532/CE "Decisión de la Comisión de 3 de mayo de 2000, 2000/532/CE, que sustituye a la Decisión 94/3/CE por la que se establece una lista de residuos de conformidad con la letra a) del artículo 1 de la Directiva 75/442/CEE del Consejo relativa a los residuos y a la Decisión 94/904/CE del Consejo por la que se establece una lista de residuos peligrosos en virtud del apartado 4 del artículo 1 de la Directiva 91/689/CEE del Consejo relativa a los residuos peligrosos".

¹¹⁹ (2008). Directiva 2008/98/CE "Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de noviembre de 2008, sobre residuos y por la que se derogan determinadas Directivas", Parlamento Europeo.

¹²⁰ (1998). Ley 10/1998, de 21 de abril, de Residuos, BOE N°96 22 de abril 1998.

¹²¹ Medio Ambiente Medio Rural y Marino, M. (2009). Resolución de 20 de enero de 2009, de la Secretaría de Estado de Cambio Climático, por la que se publica el Acuerdo del Consejo de Ministros por el que se aprueba el Plan Nacional Integrado de Residuos para el período 2008-2015.

de los residuos domésticos y similares, los residuos con legislación específica (peligrosos, vehículos y neumáticos fuera de uso, pilas y acumuladores aparatos eléctricos y electrónicos, residuos de construcción y demolición y lodos de depuradoras), los suelos contaminados y residuos agrarios e industriales no peligrosos.

El artículo 17 del Plan recoge los “Residuos Industriales No Peligrosos (RINP)”, en él se remite a la orden ministerial MAM/304/2002¹²² (trasposición de la Decisión de la Comisión 2000/532/CE) para la clasificación de residuos peligrosos y no peligrosos. Expone que la catalogación de RINP corresponde a un sector muy amplio, en el que se incluyen múltiples subsectores, como queda indicado en el cuadro de actividades CNAE 93, donde las escorias estarían enmarcadas en los residuos de la “*metalurgia y fabricación de productos metálicos*”.

El Plan establece, de manera similar a la directiva europea, que la política en materia de residuos debe basarse en la aplicación de un conjunto de principios y objetivos generales:

- Promover la correcta gestión del conjunto de los residuos, disminuir su generación e impulsar las prácticas más adecuadas para su gestión.
- Establecer prioridades en las opciones de gestión desde la prevención, reutilización, reciclaje, valorización energética y por último la eliminación.
- Que todos los agentes implicados desde las Administraciones Públicas a los agentes económicos y sociales, pasando por los consumidores y usuarios asuman su cuota de responsabilidad en relación con los residuos.
- Disponer de infraestructuras suficientes para garantizar que los residuos se gestionan correctamente y, en lo posible, cerca de su lugar de generación.
- Modificar la tendencia actual del crecimiento de la generación de residuos. Erradicar el vertido ilegal.
- Disminuir el vertido y fomentar de forma eficaz: la prevención y la reutilización, el reciclado de la fracción reciclable, así como otras formas de valorización de la fracción de residuos no reciclable.
- Completar las infraestructuras de tratamiento y mejorar el funcionamiento de las instalaciones existentes.
- Obtener estadísticas fiables en materia de infraestructuras, empresas gestoras y producción y gestión de residuos.

¹²² Medio Ambiente, M. (2002). ORDEN MAM/304/2002, de 8 de febrero, por la que se publican las operaciones de valorización y eliminación de residuos y la lista europea de residuos.

- Evaluar los Instrumentos económicos y en particular los fiscales, que se han puesto en práctica para promover cambios en los sistemas de gestión existentes. Identificar la conveniencia de su implantación de forma armonizada en todas las Comunidades Autónomas.
- Consolidación de los programas de I+D+i aplicados a los diferentes aspectos de la gestión de los residuos, incluyendo análisis de la eficiencia de los sistemas de recogida, optimización de los tratamientos y evaluación integrada de los procesos completos de gestión, desde la generación hasta la eliminación.
- Reducir la contribución de los residuos al Cambio Climático fomentando la aplicación de las medidas de mayor potencial de reducción.

Hay comunidades autónomas, como el País Vasco¹²³, Cantabria¹²⁴ y Cataluña¹²⁵, que debido a los problemas de generación de escorias de acería, han desarrollado legislación específica en materia de valorización de escorias.

Así, establecen, entre otros, los usos admisibles de las escorias negras valorizadas como producto final en bases, subbases y explanadas mejoradas de carreteras y vías públicas o privadas de tráfico rodado, como materia prima en la fabricación de cemento o como árido en la fabricación de hormigones. El único uso autorizado para la escoria blanca es el de materia prima en la fabricación de cementos. La normativa admite la posibilidad de otros usos, previa justificación y autorización por el órgano administrativo correspondiente.

Para poder justificar la idoneidad del uso y valorización de escorias negras y blancas como árido en la fabricación de morteros, se desarrolla el presente trabajo, proponiendo nuevas aplicaciones para estos residuos.

Mediante la sustitución de los materiales naturales por materiales reciclados debería ser posible mejorar sustancialmente la productividad de los recursos de la industria de la construcción y lograr un modelo sostenible de crecimiento¹²⁶.

¹²³ (2003). Decreto 34/2003, de 18 de febrero, por el que se regula la valorización y posterior utilización de escorias procedentes de la fabricación de acero en hornos de arco eléctrico, en el ámbito de la Comunidad Autónoma del País Vasco.

¹²⁴ (2006). Decreto 104/2006, de 19 de octubre, de valorización de escorias en la Comunidad Autónoma de Cantabria.

¹²⁵ (2009). Decreto 32/2009, de 24 de febrero, sobre la valorización de escorias siderúrgicas en la comunidad de Cataluña.

¹²⁶ Mehta, P. K. (2001). "Reducing the environmental impact of concrete. Concrete can be durable and environmentally friendly." *Concrete international* vol 23(10): p.61-66.

⁶⁹ Geiseler, J. (1996). "Use of steelworks slag in Europe." *Waste Management* vol 16 (1-3)(1-3): p.59-63.

A finales del siglo pasado, autores como Geiseler⁶⁹, ya concluían que a las escorias se las podía considerar un "producto" o material útil y no un residuo, debido a la gran calidad de las mismas y su posibilidad de participar en la ejecución de otros materiales para la construcción y obra civil. Como consecuencia, comenzaron a aparecer estudios sobre la reutilización y valorización de las mismas, demostrando su idoneidad^{127,128,129}.

Por otro lado, la escoria blanca de horno cuchara LF es un subproducto no homogéneo que se presenta en forma de polvo blanquecino y que, debido a su composición mineralógica singular, puede desarrollar ciertas propiedades hidráulicas⁴². Otra característica de las escorias blancas es su inestabilidad volumétrica¹³⁰ debido principalmente a la hidratación de la cal libre y la magnesia, circunstancia que hace necesario un pretratamiento de la escoria a la intemperie.

Para conocer su naturaleza, se realiza una caracterización de las escorias empleadas en este trabajo, pues la composición química de las mismas depende significativamente de la calidad del acero producido. En comparación con las escorias negras EAF, cuya composición química es básicamente CaO, MgO, SiO₂ y FeO, en un rango del 88-92%¹⁷, la composición química de la escoria blanca es muy variable¹³¹, aunque hay minerales comunes en ellas como la CaO_{libre} y C₃S y C₂S¹⁵ que justifican sus propiedades hidráulicas.

La investigación sobre la incorporación de *árido siderúrgico*, escoria negra de horno eléctrico de arco EAF y escoria blanca de horno cuchara LF, en la fabricación de hormigones y morteros comenzó hace más de una década, y desde entonces se han ido dando importantes pasos en la incorporación de este residuo de la industria siderometalúrgica, como material para su uso en construcción.

¹²⁷ Burström, G., E. Ye and A. M. Fällman (1995). "Utilisation and stabilisation of steelmaking slags." AFR-report vol 57.

¹²⁸ San José, J. (2000). "Reutilización y valorización en obra civil de escorias de horno de arco eléctrico producidas en la CAPV." Arte y Cemento 124 (6): p.124-126.

¹²⁹ Koros, P. J. (2003). "Dusts, scale, slags, sludges... Not wastes, but sources of profits." Metallurgical and Materials Transactions vol 34(6): p.769-779.

⁴² Setién, J., D. Hernández and J. J. González (2009). "Characterization of ladle furnace basic slag for use as a construction material." Construction and Building Materials vol 23: p.1788-1794.

¹³⁰ Goldring, D. C. and L. M. Jukes (1997). "Petrology and stability of steel slags." Ironmaking & Steelmaking vol 24(6): p.447-456.

¹⁵ Shi, C. J. and J. S. Qian (2000). "High performance cementing materials from industrial slags - a review." Resources Conservation and Recycling 29(3): p.195-207.

¹⁷ Shi, C. J. (2004). "Steel slag - Its production, processing, characteristics, and cementitious properties." Journal of Materials in Civil Engineering vol 16(3): p.230-236.

¹³¹ Posch, W., H. Presslinger and H. Hiebler (2002). "Mineralogical evaluation of ladle slags at voestalpine Stahl GmbH." Ibid. vol 29(4): p.308-312.

Este Trabajo supone un nuevo avance en las investigaciones comenzadas en 1999 por la Dra. Luciana Amaral de Lima en su Tesis "Hormigones con escoria de horno eléctrico de arco como áridos: propiedades, durabilidad y comportamiento ambiental" y en 2001 por el Dr. Juan Manuel Manso Villalaín en su Tesis Doctoral "Fabricación de hormigón hidráulico con escoria negra de Horno Eléctrico de Arco", y continuados por la Dra. Milagros Losáñez González y el Dr. Ángel Rodríguez Sáiz en sus respectivas Tesis Doctorales sobre la utilización e incorporación de las escorias siderúrgicas en hormigones y morteros.

Con posterioridad a estos Trabajos de referencia se ha investigado la incorporación de escorias blancas y negras en la estabilización de suelos y capas de firmes de caminos rurales¹³², el empleo de escoria negra en hormigones estructurales⁷⁶ y la corrosión de armaduras embebidas en morteros elaborados con escorias blancas¹³³.

Como continuación a los estudios mencionados, esta Tesis Doctoral desarrolla la investigación y estudio de morteros de albañilería elaborados con escoria negra EAF y escoria blanca LF conjuntamente, sustituyendo el árido natural comúnmente empleado en su fabricación, con la finalidad de obtener morteros de albañilería viables y aptos para la su utilización en obra y de esta forma buscar un uso útil a los residuos generados.

En la revisión sobre la utilización de los residuos siderometalúrgicos conjuntamente, se han encontrado pocas referencias, si se exceptúan los trabajos en hormigones de Polanco⁴⁷ y Manso⁴⁸, con resultados, en general, aceptables del uso conjunto de las escorias, si bien los hormigones con más contenido de escoria blanca y menor cantidad de cemento presentan peores resultados de durabilidad y expansión.

2.3.2. Objetivos

Con esta Tesis Doctoral se pretende contribuir a resolver el problema del aprovechamiento de las escorias generadas en la industria siderúrgica,

¹³² Ortega López, V. (2011). "Aprovechamiento de escorias blancas (LFS) y negras (EAFS) de acería eléctrica en la estabilización de suelos y en capas de firmes de caminos rurales", Universidad de Burgos.

⁷⁶ Arribas García, I. (2011). "Estudio y diseño de hormigones estructurales basados en la incorporación de subproductos siderúrgicos: viabilidad técnica", Universidad del País Vasco.

¹³³ Prieto Barrio, M. I. (2012). "Análisis del comportamiento a corrosión de armaduras embebidas en probetas de mortero, con sustitución parcial de áridos y cemento por escorias blancas de horno cuchara", Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica de Madrid.

⁴⁷ Polanco, J. A., J. M. Manso, J. Setién and J. J. González (2011). "Strength and durability of concrete made with electric steelmaking slag." ACI Materials Journal vol 108(2): p.196-203.

⁴⁸ Manso, J. M., D. Hernández, M. M. Losáñez and J. J. González (2011). "Design and elaboration of concrete mixtures using steelmaking slags." ACI Materials Journal vol 108(6): p.673-681.

mediante su aplicación a la fabricación de materiales útiles y técnicamente factibles para su uso en construcción, empleando conjuntamente y en un mismo mortero las escorias negras EAF y las escorias blancas LF.

El objetivo principal de esta Tesis Doctoral es la elaboración de un “**mortero seco industrial**”, con una **resistencia** mínima a **compresión**, a los 28 días de curado, de **5 N/mm²**, y **consistencia plástica**, utilizando para ello una granulometría de árido determinada en la que se sustituye la fracción de arena por escoria negra EAF y el filler calizo por escoria blanca LF, en porcentajes del 25%, 50%, 75% y 100%.

La finalidad es conseguir productos viables en construcción que mejoren la gestión de los residuos siderometalúrgicos, e impidan la continua explotación de canteras de árido natural que produce un importante impacto medioambiental.

Las líneas que se proponen se pueden resumir en los siguientes apartados:

- Conocimiento de la industria que genera residuos escoria negra EAF y escoria blanca LF, volumen de residuos generados y gestión de los mismos.
- Caracterización de la escoria siderúrgica obtenida de la fabricación del acero.
- Dosificación de los distintos morteros, en función del grado de sustitución del árido natural por árido siderúrgico y del aditivo empleado.
- Determinación de las diferentes propiedades en estado fresco y endurecido de las distintas mezclas elaboradas con materiales tradicionales y de los obtenidos con áridos siderúrgicos.
- Estudio microestructural de los morteros diseñados con árido siderúrgico.
- Comparativa y análisis de la durabilidad de los morteros fabricados con árido siderúrgico con sus homólogos de referencia.
- Estudio de la viabilidad económica de los morteros que incluyen escorias en su composición.

Se pretenden desarrollar soluciones innovadoras con una relación coste-efectividad energéticamente rentables y medioambientalmente amigables en el proceso de extracción en el campo de las materias primas, y que, además, sean económicamente aceptables, según el Plan Horizonte 2020, donde en el documento “*Supply of raw materials: Resource Efficiency and Climate Action*”, se indica este objetivo como uno de los prioritarios del sector.

Así mismo, y atendiendo a lo que especifica el Programa Horizonte 2020 en el mismo documento, de los resultados de la investigación de esta Tesis Doctoral se pretenden conseguir los siguientes objetivos:

- Aumentar la disponibilidad de materias primas, en este caso áridos naturales, encontrando alternativas a las materias primas fundamentales, cumpliendo la premisa, ya que se propone el empleo de materiales de desecho existentes en gran cantidad, como son las escorias siderúrgicas.
- Emplear los residuos obtenidos de la fabricación del acero, escoria negra EAF y escoria blanca LF, como árido siderúrgico en la preparación de morteros de cemento, con buenas prestaciones resistentes y de durabilidad.
- Valorizar los residuos de la industria siderometalúrgica y aportar una salida comercial a los mismos, elaborando un producto con capacidades aptas para su uso en construcción.
- Reducir el impacto ambiental producido por la acumulación de escorias en vertederos y a la vez evitar la explotación de canteras de árido natural.
- Promocionar una economía circular de las materias primas, buscando cerrar los ciclos de consumo con un reaprovechamiento, y no basándonos en una economía lineal de obtención – fabricación – consumo – desecho.

Capítulo III

Procedimiento experimental

3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

A continuación se describen los ensayos realizados para la caracterización de los morteros y materias primas empleadas en la Tesis Doctoral, así como los ensayos de durabilidad de los morteros.

3.1. INTRODUCCIÓN

Los morteros presentan diferentes características dependiendo del estado físico en que se encuentren. Se pueden distinguir dos etapas perfectamente diferenciadas en las que, tanto la manipulación como la puesta en obra del material, están condicionadas por las propiedades que presenta antes y después del fraguado del cemento²⁶.

- **Etapa 1: mortero fresco:** corresponde a la fase una vez que se produce la mezcla y amasado de los componentes. Su duración varía en el tiempo en función de las características y dosificaciones de sus componentes, así como por otros factores, tales como la humedad, temperatura, etc.
- **Etapa 2: mortero endurecido:** cuando se supera la primera fase, el cemento fragua y se inicia el proceso de endurecimiento y consolidación.

Establecida la diferencia, se puede afirmar que tanto el “estado fresco” como el “estado endurecido” de los morteros son dos realidades de un mismo material, con propiedades que deben ser estudiadas por separado para establecer las condiciones de preparación y puesta en obra de las mezclas. Al mismo tiempo, las propiedades del mortero fresco van a influir en gran medida en las prestaciones finales del material endurecido, así como en su rendimiento y en su calidad de ejecución¹⁰².

3.2. PROPIEDADES DEL MORTERO FRESCO

3.2.1. Consistencia del mortero fresco

La consistencia de un mortero se determina mediante la mesa de sacudidas, tomando como referencia el procedimiento experimental desarrollado en la norma UNE-EN 1015-3¹³⁴.

²⁶ Rodríguez Sáiz, A. (2008). "Fabricación de morteros de albañilería con escoria blanca de horno cuchara y su utilización en construcción" Tesis doctoral, Universidad de Burgos.

¹⁰² Valdehita Rosello, M. T. (1976). "Morteros de cemento para albañilería". Madrid, Patronato Juan de la Cierva de Investigación Técnica. Instituto Eduardo Torroja de la Construcción y del Cemento. Consejo Superior de Investigaciones Científicas.

¹³⁴ AENOR (2000). "UNE-EN 1015-3 Métodos de ensayo de los morteros de albañilería. Parte 3: Determinación de la consistencia del mortero fresco (por la mesa de sacudidas)", Madrid, Aenor.

Una vez amasado el mortero, éste se introduce en un molde troncocónico dispuesto sobre la mesa de sacudidas (Figura 3.1), rellenándolo en dos tongadas que se compactan con un pisón, mediante 10 golpes consecutivos.

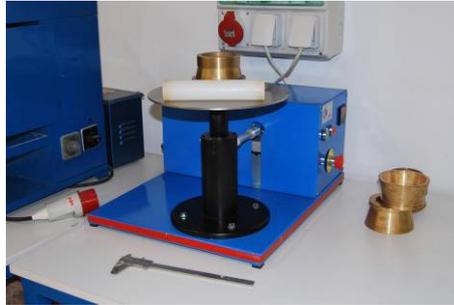


Figura 3.1 Mesa de sacudidas

Una vez preparada la muestra de mortero, ésta se somete a 15 sacudidas consecutivas mediante elevación y caída de la mesa, lo que produce su escurrimiento (Figura 3.2). Se miden dos diámetros perpendiculares en la torta de mortero, siendo el valor del escurrimiento del mortero la media aritmética de ambas medidas en milímetros.

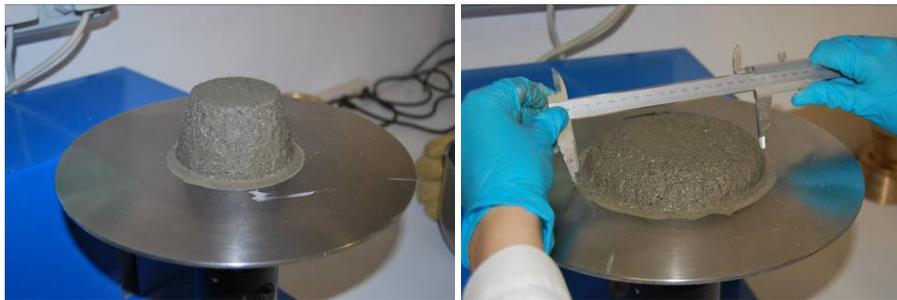


Figura 3.2 Determinación de la consistencia

Existen tres tipos de consistencia, en función del valor de escurrimiento en la mesa de sacudidas: seca, plástica y fluida. (Tabla 3.1).

Consistencia de utilización	Valor del escurrimiento (mm)	Designación
Mortero seco	< 140	S
Mortero plástico	140 a 200	P
Mortero fluido	> 200	F

Tabla 3.1 Tipos de consistencia en función del escurrimiento

Además, en función de la densidad del mortero fresco, la norma establece unos valores de escurrimiento determinados. En la Tabla 3.2. se recogen sus referencias.

Densidad aparente del mortero fresco (Kg/m ³)	Valor del escurrimiento (mm)
$\rho_m > 1200$	175 ± 10
$600 < \rho_m < 1200$	160 ± 10
$300 < \rho_m < 600$	140 ± 10
$\rho_m < 300$	120 ± 10

Tabla 3.2 Valor de escurrimiento definido para diferentes tipos de mortero relacionado con la densidad aparente del mortero fresco

El valor de la consistencia de un mortero está íntimamente relacionado con la relación agua/cemento, dosificación de la mezcla (cemento/árido) y granulometría del árido.

Cuando la consistencia es seca, el mortero es menos trabajable, pues se produce un excesivo rozamiento entre las partículas del árido y la pasta conglomerante no rellena todos los huecos.

En los morteros de consistencia fluida los áridos tienden a segregarse, ya que no existe una correcta cohesión y trabazón entre el árido y la pasta conglomerante.

En el estudio que nos ocupa, la curva granulométrica del árido es constante, así como la relación en peso cemento/árido (1/6), por lo que se busca una relación agua/cemento tal que se obtenga un escurrimiento en la mesa de sacudidas de 175 mm ± 10 mm, es decir, una consistencia plástica.

3.2.2. Trabajabilidad

La norma UNE-EN 1015-9. "Métodos de ensayo de los morteros de albañilería. Parte 9: Determinación del periodo de trabajabilidad y del tiempo abierto del mortero fresco"¹³⁵ define la trabajabilidad como "el tiempo durante el cual un mortero puede ser manipulado sin añadir posteriormente agua".

El periodo de trabajabilidad del mortero fresco se determina midiendo el tiempo, en minutos, a partir del cual alcanza un límite definido de resistencia a la penetración de una sonda normalizada. Durante este tiempo las características del mortero en estado fresco deben mantenerse.

Para la realización de este ensayo se necesitan moldes con un diámetro interior de, al menos, 75 mm y una altura comprendida entre 50 y 100 mm (Figura 3.3). Cada molde se llena, aproximadamente, en 10 etapas, después de cada adición de mortero el molde se golpea cuatro veces sobre la mesa de trabajo.

¹³⁵ AENOR (2000). "UNE-EN 1015-9 Métodos de ensayo de los morteros de albañilería. Parte9: Determinación del periodo de trabajabilidad y del tiempo abierto del mortero fresco", Madrid, Aenor.

Los moldes llenos se conservan en un ambiente a una temperatura de $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ y a una humedad relativa de, al menos, el 95%.

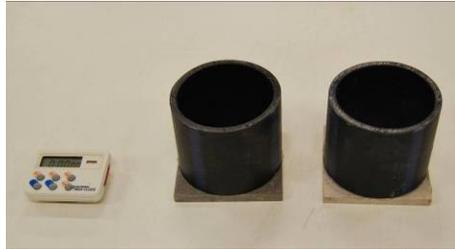


Figura 3.3 Moldes para el ensayo de trabajabilidad

El molde se coloca sobre la balanza, debajo de la sonda de penetración, de tal modo que la zona de la superficie de muestra situada inmediatamente debajo de la sonda se sitúe al menos a 20 mm del borde del molde o del emplazamiento de una penetración anterior. La sonda de penetración se baja lentamente, introduciéndola en la muestra hasta que la arandela de referencia roce la superficie. (Figura 3.4)



Figura 3.4 Balanza de ensayo Trabajabilidad

El periodo de trabajabilidad se determina a partir del momento en el que se añade agua a los componentes secos o la adición del cemento a una mezcla, hasta alcanzar una resistencia a la penetración de $0,5 \text{ N/mm}^2$.

Una buena trabajabilidad se consigue con consistencias plásticas, en las que los áridos se encuentran rodeados de una película de pasta de conglomerante, que permite que deslicen los unos sobre los otros con facilidad y con ausencia de tensiones producidas por el rozamiento de sus aristas, y sin perder cohesión en su conjunto.

3.2.3. Retención de agua

La norma experimental UNE 83-816-93 EX "Morteros. Métodos de ensayo. Morteros frescos. Determinación de la capacidad de retención de

agua"¹³⁶ recoge el procedimiento operatorio para determinar la retención de agua de los morteros frescos.

Para la realización de este ensayo se necesita un molde rígido de 100mm, como mínimo, de diámetro interior y 25mm de altura; un vidrio plano de 5mm de espesor; una pesa con una masa de 2kg; dos gasas de algodón y ocho discos de papel de filtro de 180-220 gr/m² y 100mm de diámetro tipo Whatman nº3. (Figura 3.5)



Figura 3.5 Útiles necesarios ensayo retención agua

La muestra se ensayará no antes de 10 min. ni después de 30 min. a partir del amasado, y sin realizar ningún amasado adicional antes del ensayo.

Se anotan los pesos del molde seco más el vidrio y los ocho discos de papel de filtro. Se llena el molde con unas 10 tomas y se enrasa la parte superior. Se registra el peso del molde más el vidrio más el mortero. La masa de agua inicialmente presente en el molde se calcula a partir de la masa de mortero en el molde más el contenido de agua del mortero, que se conoce a partir de su composición.

Se cubre la superficie del mortero con las dos gasas de algodón y los ocho discos de filtro. Se coloca otro vidrio encima y se invierte el molde, se retira el vidrio superior y se carga el mortero con una pesa de 2 kg durante 5 min. (Figura 3.6) Transcurridos los 5 min se quita la pesa y se toma el peso de los 8 discos de papel de filtro.



Figura 3.6 Ensayo retención de agua

¹³⁶ AENOR (1993). "UNE 83-816-93 EX Morteros. Métodos de ensayo. Morteros frescos. Determinación de la capacidad de retención de agua", Madrid, Aenor.

Se calcula la cantidad de agua retenida en cada muestra de mortero como la relación entre la cantidad de agua original presente en el molde, menos el agua absorbida por el papel de filtro, expresándola en tanto por ciento con relación a la cantidad de agua original presente en el molde, mediante la siguiente expresión:

$$R_a = \frac{A_{inicial} - A_{absorbida}}{A_{inicial}} \times 100$$

Donde,

R_a capacidad de retención de agua del mortero fresco (%)

A_i agua inicial presente el molde (l)

A_a agua absorbida por los filtros (l)

3.2.4. Densidad aparente del mortero fresco

La densidad aparente del mortero fresco se determina de acuerdo con la Norma UNE-EN 1015-6 "Métodos de ensayo de los morteros de albañilería. Parte 6: Determinación de la densidad aparente del mortero fresco"¹³⁷.

En función del valor del escurrimiento en la mesa de sacudidas (Tabla 3.1, página 66), la norma establece un procedimiento específico para su cálculo.

En los morteros de consistencia plástica se procede a llenar un recipiente metálico cilíndrico tipo (Figura 3.7), con una capacidad de 1 litro, en dos tongadas, compactadas mediante basculación del recipiente de un lado a otro, desde una altura de aproximadamente 30mm y se deja caer 10 veces sobre una placa sólida y rígida. La última tongada se enrasa y nivela con el borde superior hasta conseguir una superficie plana. Este recipiente se pesa, obteniendo el valor m_2 . (Figura 3.8).



Figura 3.7 Molde densidad aparente

¹³⁷ AENOR (1999). "UNE-EN 1015-6 Métodos de ensayo de los morteros de albañilería. Parte 6: Determinación de la densidad aparente del mortero fresco", Madrid, Aenor.



Figura 3.8 Determinación de la densidad aparente del mortero fresco

El valor de la densidad del mortero se calcula de acuerdo con la siguiente expresión:

$$\rho_m = \frac{m_2 - m_1}{V_v}$$

Donde,

ρ_m es la densidad del mortero fresco (kg/m^3)

m_1 es el peso del molde vacío (g)

m_2 es el peso del molde lleno de mortero (g)

V_v es el volumen del molde (1 litro según norma)

3.2.5. Contenido de aire ocluido

La norma de referencia para el estudio del aire ocluido es la Norma UNE-EN 1015-7 "Métodos de ensayo de los morteros de albañilería. Parte 7: Determinación del contenido de aire en el mortero fresco"¹³⁸, en la que se describe el método de estudio y su procedimiento de análisis.

Para la realización de este ensayo se precisa de un molde metálico cilíndrico tipo (Figura 3.9), con una capacidad de aproximadamente 1 litro, provisto de una tapa estanca. También dispone de una cámara de aire estanca que se rellena con aire mediante una pequeña bomba manual y se equilibra a una presión conocida.

El aparato (Figura 3.10) está equipado también con un manómetro de lectura, una purga de aire, una válvula de purga del agua y un conducto por el que introducimos el agua que penetra en el interior de la cámara situada sobre el mortero.

¹³⁸ AENOR (1998). "UNE-EN 1015-7 Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 7: Determinación del contenido de aire en el mortero fresco", Madrid, Aenor.



Figura 3.9 Molde metálico cilíndrico

Se aplica una presión específica, en el aparato cerrado, por medio de una bomba manual. El principio operatorio de este dispositivo de medida consiste en equilibrar un volumen determinado de aire, a presión conocida, contenido en la cámara de aire, con el volumen desconocido de aire del mortero contenido en el recipiente de muestra. Ambas cámaras están conectadas por una válvula de aireación. La disminución de la presión del aire en la cámara de aire refleja el contenido en aire de la muestra de mortero, que puede leerse en el dial del manómetro calibrado, en tanto por ciento de aire, para la presión observada de equilibrio.



Figura 3.10 Determinación del aire ocluido

3.3. PROPIEDADES DEL MORTERO ENDURECIDO

3.3.1. Densidad aparente en seco mortero endurecido

Para la determinación de la densidad aparente seca del mortero endurecido se toma como referencia la Norma UNE EN 1015-10 "Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 10: Determinación de la densidad aparente en seco del mortero endurecido"¹³⁹. Esta norma recoge el procedimiento de estudio de la densidad, a partir de la relación entre la masa de mortero de una probeta normalizada y el volumen aparente que ocupa.

¹³⁹ AENOR (2000). "UNE-EN 1015-10 Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 10: Determinación de la densidad aparente en seco del mortero endurecido", Madrid, Aenor.

Las probetas se secan en estufa a una temperatura de $70^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, hasta que alcance masa constante ($m_{s,sec}$). Posteriormente, las piezas se saturan en agua a $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ hasta que no se observe aumento alguno en la masa aparente ($m_{s,sat}$). (Figura 3.11)



Figura 3.11 Saturación progresiva de las probetas hasta saturación

El volumen aparente de la probeta se determina en una balanza hidrostática (Figura 3.12) por desplazamiento volumétrico, cuyo fundamento se encuentra en la aplicación directa del Teorema de Arquímedes. El volumen, en m^3 , se calcula por medio de la siguiente expresión:

$$V_s = \frac{m_{s,sat} - m_{s,i}}{\rho_w}$$

Donde,

V_s es el volumen aparente de la probeta (m^3)

$m_{s,sat}$ es la masa de la probeta saturada del mortero endurecido (Kg)

$m_{s,i}$ es la masa aparente de la probeta saturada del mortero endurecido sumergido en agua (Kg)

ρ_w es la densidad del agua (Kg/m^3)

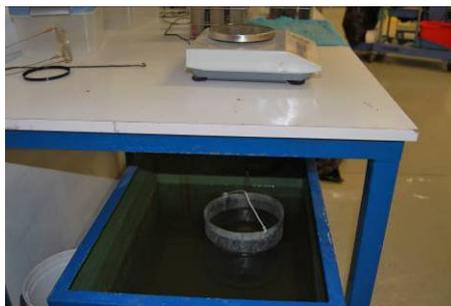


Figura 3.12 Balanza hidrostática

La densidad aparente en seco se calcula dividiendo la masa de la probeta secada en estufa, $m_{s,sec}$, (Kg), por el volumen de la probeta del mortero endurecido, V_s , (m^3)

3.3.2. Resistencia mecánica a flexión y a compresión

El método de análisis para determinar la resistencia mecánica de los morteros se lleva a cabo según la norma UNE-EN 1015-11 "Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 11: Determinación de la resistencia a flexión y a compresión del mortero endurecido"¹⁴⁰.

Una vez fraguado y endurecido el mortero se procede a la rotura de las probetas en una prensa hidráulica marca Supercar, modelo MEM-101/SDC de 200 kN, diseñada a tal efecto (Figura 3.13). Las probetas se ensayan hasta rotura a los 7 y 28 días, tanto a esfuerzos mecánicos de flexión como de compresión.



Figura 3.13 Prensa para realizar ensayos de flexión y compresión.

Las probetas necesarias para realizar los ensayos son prismáticas, con unas dimensiones normalizadas de $(40 \times 40 \times 160) \text{ mm}^3$.

Para determinar la resistencia a flexión de un mortero se aplica una carga centrada en el vano de las probetas de mortero endurecido, hasta su rotura. La separación entre apoyos es de 100 mm.

La carga se aplica sin aceleraciones bruscas, a una velocidad uniforme comprendida entre 10 N/s y 50 N/s, de tal modo que la rotura se produzca entre 30 y 90 s, y se registra el valor de la carga máxima aplicada F (expresada en N)

¹⁴⁰ AENOR (2000). "UNE-EN 1015-11 Métodos de ensayo de los morteros de albañilería. Parte 11: Determinación de la resistencia a flexión y a compresión del mortero endurecido", Madrid, Aenor.

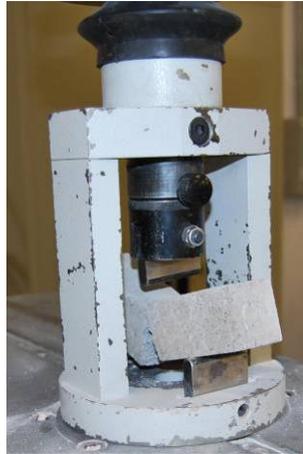


Figura 3.14 Detalle rotura a flexión

La resistencia a flexión f , en N/mm^2 se calcula por medio de la siguiente expresión:

$$f = 1,5 \frac{Fl}{bd^2}$$

Donde,

- F es la carga máxima aplicada (N)
- l es la distancia entre apoyos (mm)
- b es el ancho de la probeta (mm)
- d es el grosor de la probeta (mm)

Los dos fragmentos resultantes de la rotura a flexión se ensayan a compresión sobre una superficie de $(40 \times 40) \text{ mm}^2$, aplicando una carga constante y sin aceleraciones hasta su rotura, registrando sendos valores de la carga máxima (N) para obtener la media.



Figura 3.15 Detalle rotura a compresión

La resistencia a compresión σ_c , en N/mm^2 , se calcula mediante la siguiente expresión:

$$\sigma_c = \frac{Q}{S}$$

Donde,

Q es la carga máxima (N)

S sección transversal de la probeta (mm^2)

En la Figura 3.16 se observa el aspecto final de las probetas sometidas al ensayo de compresión.



Figura 3.16 Probetas sometidas al ensayo de compresión

3.3.3. Absorción de agua

Se puede determinar la absorción de agua de dos maneras diferentes:

3.3.3.1. Absorción de agua por capilaridad

El coeficiente de absorción de agua por capilaridad de morteros endurecidos se especifica en la norma UNE-EN 1015-18 "Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 18: Determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad del mortero endurecido"¹⁴¹.

Se preparan tres probetas prismáticas normalizadas de dimensiones $160 \times 40 \times 40 \text{ mm}^3$, se coloca un papel de filtro absorbente en el fondo del molde y en su parte superior. (Figura 3.17)

¹⁴¹ AENOR (2003). "UNE-EN 1015-18 Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 18: Determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad del mortero endurecido", Madrid, Aenor.



Figura 3.17 Preparación probetas

Una vez curadas a los 28 días, las probetas se secan en una estufa con ventilación a la temperatura de $60^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ hasta conseguir masa constante. Posteriormente se sellan las cuatro caras longitudinales con parafina y se rompen a flexión. Las piezas se colocan con las caras rotas (superficie de rotura) de los prismas vueltas hacia abajo, de tal manera que no toquen el fondo de la bandeja, y se sumergen en agua hasta una altura de 5 mm a 10 mm (Figura 3.18).



Figura 3.18 Inmersión probetas parafinadas en agua

El coeficiente de absorción de agua es, por definición, igual a la pendiente de la recta que une los puntos representativos de las medidas tomadas después de 10 min y después de 90 min, y se calcula por medio de la siguiente expresión:

$$C = 0,1(M_2 - M_1)$$

Donde,

C coeficiente de absorción de agua ($\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0,5})$)

M_2 masa de la probeta después de una inmersión durante 90 min (gr)

M_1 masa de la probeta después de una inmersión durante 10 min (gr)

Inmediatamente después, se divide cada probeta a lo largo de su longitud (Figura 3.19) y se mide la altura de la penetración del agua en el centro de la probeta. (Figura 3.20)



Figura 3.19 Rotura de probetas longitudinalmente

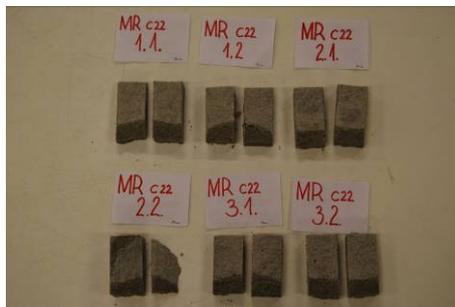


Figura 3.20 Altura de penetración del agua ensayo absorción agua capilaridad

3.3.3.2. Absorción de agua a presión atmosférica

La absorción de agua a presión atmosférica se determina según la norma UNE EN 13755 "Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la absorción de agua a presión atmosférica"¹⁴².

Las probetas se secan hasta masa constante a una temperatura de $70^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ (m_d). Posteriormente se colocan en el tanque y se va añadiendo agua a 20°C hasta la mitad de la altura de las probetas durante $60 \text{ min} \pm 5 \text{ min}$. A continuación, se añade agua hasta alcanzar las $3/4$ partes de la altura de las probetas otros $60 \text{ min} \pm 5 \text{ min}$. Finalmente, vuelve a añadirse agua hasta que las probetas queden totalmente sumergidas bajo una lámina de agua de $25 \pm 5 \text{ mm}$ de espesor. Las muestras se dejan sumergidas en agua hasta alcanzar la masa constante saturada (m_s). (Figura 3.21)

¹⁴² AENOR (2008). "UNE EN 13755 Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la absorción de agua a presión atmosférica", Madrid, Aenor.



Figura 3.21 Saturación de probetas

La absorción de agua a presión atmosférica de cada probeta se calcula por medio de la ecuación:

$$A_b = \frac{m_s - m_d}{m_d} 100$$

Donde,

A_b es la absorción de agua a presión atmosférica (%)

m_s es la masa de la probeta saturada (gr)

m_d es la masa de la probeta seca (gr)

3.3.4. Adherencia del mortero endurecido

La resistencia a la adhesión de los morteros está recogida en la norma UNE-EN 1015-12 "Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 12: Determinación de la resistencia a la adhesión de los morteros para revoco y enlucido endurecidos aplicados sobre soportes"¹⁴³.

Dicha norma define la resistencia a la adhesión (resistencia a la unión) como "*la tracción máxima al arrancamiento por carga directa perpendicular a la superficie del mortero para revoco o enlucido que se ha aplicado sobre un soporte*".

El procedimiento operatorio se debe realizar entre 10 min y 30 min después del amasado.

El mortero fresco se aplica sobre el soporte especificado con un espesor de 10 mm. En la capa de mortero, en estado fresco, se realizan superficies circulares cuyo diámetro es aproximadamente 50 mm. (Figura 3.22)

Las probetas se guardan en bolsas de polietileno herméticas al aire y selladas, conservándose durante 7 días a una temperatura de $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$. A continuación, las piezas se retiran y se conservan al aire otros 21 días.

¹⁴³ AENOR (2000). "UNE-EN 1015-12 Métodos de ensayo de los morteros de albañilería. Parte 12: Determinación de la resistencia a la adhesión de los morteros para revoco y enlucido endurecidos aplicados sobre soporte", Madrid, Aenor.



Figura 3.22 Realización de pastillas circulares de 50 mm de diámetro

Transcurridos 28 días, las pastillas para tracción se pegan con adhesivo en el centro de la superficie de las probetas. Por medio del equipo de tracción se aplica la carga de tracción perpendicularmente a las áreas de ensayo a través de las pastillas. La carga se debe aplicar sin sacudidas y a una velocidad uniforme. (Figura 3.23)



Figura 3.23 Ensayo adhesión

La resistencia individual a la adhesión (resistencia de unión f_u en N/mm^2) se calcula por medio de la siguiente expresión:

$$f_u > \frac{F_u}{A}$$

Donde,

F_u carga de rotura (N)

A área de la superficie de ensayo (mm^2)

En función del tipo de rotura la norma distingue dos opciones: rotura adhesiva, cuando la rotura se producen en la interfase entre el mortero y el soporte (el valor del ensayo es igual a la resistencia a la adhesión) y rotura cohesiva, cuando la rotura se produce en el propio mortero o cuando se produce en el soporte (en estos casos la resistencia a la adhesión es mayor que el valor del ensayo).

3.3.5. Permeabilidad al vapor de agua

La norma UNE-EN 1015-19 “Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 19: Determinación de la permeabilidad al vapor de agua

de los morteros de revoco y enlucido”¹⁴⁴ describe el método de ensayo para determinar la permeabilidad al vapor de agua de los morteros.

La norma define permeanza al vapor de agua o coeficiente de difusión del vapor de agua Λ ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}$) como “*el flujo de vapor de agua que atraviesa una unidad de área bajo condiciones de equilibrio, por diferencia unitaria de la presión de vapor entre las dos caras del material*”.

La permeabilidad al vapor de agua W_{vp} ($\text{kg/m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}$) es la permeanza al vapor de agua multiplicada por el espesor de la probeta.

Se elaboran las probetas cilíndricas aplicando el mortero sobre un soporte de hormigón celular, colocando previamente dos capas de algodón sobre el soporte antes de su aplicación. (Figura 3.24)

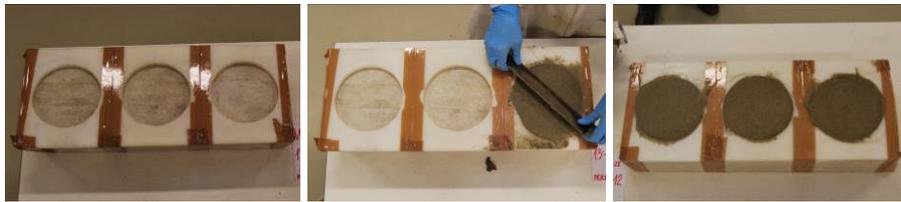


Figura 3.24 Elaboración probetas cilíndricas de 16 mm de espesor

Se colocan las probetas en los recipientes de ensayo con una disolución de nitrato de potasio (KNO_3) (Figura 3.25) y se sellan los bordes con una junta de estanqueidad (Figura 3.26). Se deja una pequeña lámina de aire de $10 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$ entre la probeta y la superficie de la disolución. Esta disolución proporciona una humedad relativa del 93,2% a una temperatura de 20°C en el interior del molde. La diferencia de presión entre el interior y el exterior de la probeta provoca que el agua de la disolución salina atraviese la probeta, lo que conduce a una evaporación progresiva de agua con el tiempo.

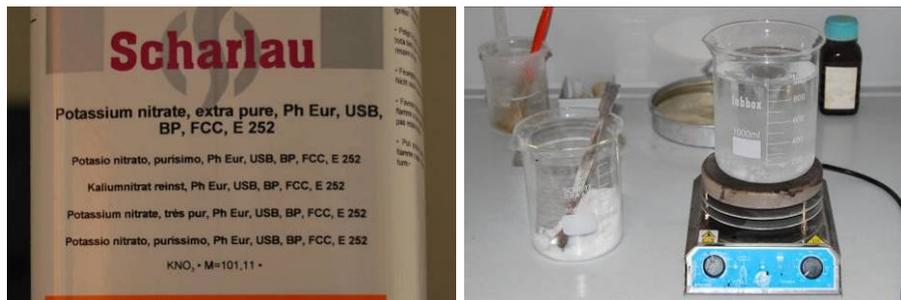


Figura 3.25 Disolución de Nitrato de Potasio (KNO_3)

Se pesan los recipientes de ensayo a intervalos de tiempo apropiados y se determina el flujo de vapor de agua EG/Et (kg/s). (Figura 3.26)

¹⁴⁴ AENOR (1999). "UNE-EN 1015-19 Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 19: Determinación de la permeabilidad al vapor de agua de los morteros de revoco y enlucido", Madrid, Aenor.



Figura 3.26 Sellado de probetas y pesado de las mismas

Se calcula la permeanza al vapor de agua Λ ($\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}$) mediante la siguiente expresión:

$$\Lambda = \frac{1}{\frac{A\Delta_p}{(EG/Et)} - R_A}$$

Donde,

- A superficie de embocadura del recinto de ensayo (m^2)
- Δ_p diferencia de vapor de agua en pascales (Pa) entre el aire ambiente y la disolución salina
- EG/Et flujo de vapor de agua (kg/s)
- R_A resistencia a la difusión del vapor de agua de la lámina de aire que existe entre la probeta y la disolución salina ($0,048 \cdot 10^9 \text{ Pa} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}/\text{kg}$ por 10 mm de lámina de aire)

Se calcula la permeabilidad al vapor de agua W_{vp} ($\text{kg}/\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}$) a partir del valor medio de la permeanza multiplicando este valor por el espesor de la probeta.

$$W_{vp} = \Lambda \cdot t$$

Donde,

- Λ permeanza al vapor de agua ($\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}$)
- t espesor medio de la probeta (m)

3.4. CARACTERIZACIÓN QUÍMICA Y MICROSCÓPICA

3.4.1. Microscopía electrónica de barrido (MEB)

Esta técnica se utiliza para examinar la estructura microscópica de las mezclas de morteros, así como para la caracterización de las materias primas.

El equipo empleado (Figura 3.27), es un microscopio electrónico de barrido JEOL JSM-6460LV con sistema INCA de análisis elemental de Rayos X.

El microscopio electrónico de barrido es aquel que utiliza un haz de electrones en lugar de un haz de luz para formar la imagen.



Figura 3.27 Microscopio electrónico de barrido

Antes de introducir las muestras al microscopio se recubren con oro (Figura 3.28), para configurar una superficie conductora y, de esta forma, favorecer que los electrones que inciden sobre la probeta sean capaces de moverse por dicha superficie y generar la imagen de estudio.



Figura 3.28 Preparación de muestras

La muestra es barrida con los electrones acelerados que viajan a través del cañón (Figura 3.29). Un detector mide la cantidad de electrones enviados que arroja la intensidad de la zona de muestra, siendo capaz de mostrar figuras en tres dimensiones, proyectadas en una imagen digital.



Figura 3.29 Ubicación de las muestras dentro del microscopio

3.4.2. Composición elemental por energía dispersa de rayos X

A la vez que se toman las imágenes en el microscopio electrónico de barrido, el sistema INCA permite, mediante un detector de Rayos X, obtener el análisis semicuantitativo de la composición química elemental de los materiales analizados.

3.4.3. Difracción de rayos X (DRX)

La difracción de rayos-X (DRX) de muestras en polvo es una técnica de caracterización básica de todo tipo de material con estructura cristalina (no amorfo): metales, minerales, polímeros, catalizadores, plásticos, productos farmacéuticos, recubrimientos de capa fina, cerámicas, semiconductores e incluso fluidos.

Un compuesto cristalino puede considerarse una agrupación periódica y ordenada de átomos. Cuando es alcanzado por un haz de radiación, cuya longitud de onda es de similar magnitud a la distancia interatómica, éste se difunde dando lugar a diferentes tipos de interferencias, que son constructivas en unas direcciones privilegiadas.

Así, la intensidad del haz difractado depende de la disposición geométrica de los átomos y de la clase de átomos presentes. Esto hace que cada sustancia cristalina presente su propio espectro de difracción y éste sea una auténtica “huella dactilar” del mismo, permitiendo su identificación en cualquier mezcla donde esté presente.

3.4.4. 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 portamuestras.

3.4.5. Análisis termogravimétrico (TGA)

Este ensayo se emplea para analizar el proceso de deshidratación y deterioro de los materiales con la temperatura. Se mide el cambio de la masa de una muestra mientras se va calentando hasta los 900°C, con incremento de t° constante de 10°C/min.

3.4.6. Tomografía axial computerizada (TAC)

La tomografía axial computerizada (TAC) se emplea para determinar cuantitativamente la macroporosidad de los morteros, es decir, los poros de tamaño mayor a 170 μm . El ensayo se realiza para ver el aire ocluido de las muestras cuando incluimos aditivos, así como la distribución del árido.

Es un equipo de rayos X (Figura 3.30), que consta de un tubo Yxlon de 225 Kv/30mA. Se compone de una cabina metálica de acero-plomo-acero, de forma que operando con una radiación máxima de 225Kv/30mA dentro de la cabina, la dosis máxima de radiación a una distancia de 100 mm de su superficie externa no exceda de 2,5 $\mu\text{Sv/h}$.

Esta técnica se ha empleado en los morteros sin aditivos y en los morteros con una sustitución de árido del 50%, es decir, el tipo MEB con los aditivos empleados.



Figura 3.30 Equipo TAC

3.4.7. Porosimetría de intrusión de mercurio (MIP)

Esta técnica se emplea para determinar la medida del porcentaje de tamaño y volumen de los microporos de los morteros.

El equipo empleado fue un Micrometrics Autopore IV 9500, que alcanza presiones de hasta 32.000 Psi, lo que equivale a la determinación de tamaños de poro de hasta 0,0067 μm .

El procedimiento operatorio se basa en la introducción de mercurio a altas presiones en los poros del material.

3.5. DURABILIDAD DE MORTEROS

3.5.1. Heladicidad

Los efectos de ciclos hielo/deshielo sobre el mortero se evalúan de acuerdo con lo especificado en la norma UNE-EN 12371 "Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la resistencia a la Heladicidad"¹⁴⁵, pues no existe norma UNE sobre el método de este ensayo para morteros.

Se ensayan probetas normalizadas de dimensiones (40x40x160) mm^3 . Las piezas se secan a una temperatura de $70^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ hasta masa constante. Una vez secas, las probetas se saturan en agua a $20^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ y deben quedar completamente sumergidas durante (48 ± 2) h.



Figura 3.31 Probetas en cámara frigorífica

Las probetas se colocan vertical u horizontalmente en la cámara de manera que no entren en contacto unas con otras o con los laterales de la cámara. Se colocan entre sí a un mínimo de 10mm y al menos 20mm de los laterales.

Se someten a 56 ciclos hielo/deshielo. Cada ciclo consiste en un período de congelación al aire de seis horas (6h) con una temperatura comprendida entre los -8°C y los -12°C , seguido de un período de descongelación en el que las probetas se sumergen en agua a temperatura entre 5°C y 20°C .

Si el análisis tiene que interrumpirse en un momento dado, las probetas deben quedar sumergidas en agua a $20^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$.

¹⁴⁵ AENOR (2011). "UNE-EN 12371 Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la resistencia a la heladicidad", Madrid, Aenor.

Después de los ciclos hielo/deshielo se realizará una inspección visual y se examinarán todas las caras y aristas de las probetas y su estado se evalúa de acuerdo con la siguiente escala:

- 0 Probeta intacta.
- 1 Daños mínimos (redondeo mínimo de esquinas y aristas) que no comprometen la integridad de la probeta.
- 2 Una o varias grietas pequeñas ($\leq 0,1$ mm de ancho) o rotura de pequeños fragmentos (≤ 30 mm², por fragmento).
- 3 Una o varias grietas, agujeros o rotura de fragmentos de mayor tamaño que el definido en el punto 2, o la probeta muestra signos importantes de desfragmentación o disolución.
- 4 Probeta con grandes grietas o rota en dos o más trozos o desintegrada.

Además, se ensayarán las probetas a flexión y compresión y se compararán los resultados con los obtenidos a los 90 días de curado.

3.5.2. Choque térmico

De la misma manera que para la heladicidad, no existe norma UNE específica para evaluar las posibles modificaciones de los morteros bajo el efecto de repentinos cambios de temperatura (choque térmico), por lo que se utiliza la norma UNE-EN 14066 "Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la resistencia al envejecimiento por choque térmico"¹⁴⁶.

Se emplean probetas normalizadas de dimensiones (40x40x160) mm³.

Las probetas secas se someten a cambios de temperatura de acuerdo con el siguiente procedimiento: (18±1)h en un horno ventilado a (105±5)°C (Figura 3.32); a continuación le siguen (6±1)h completamente sumergidas en agua destilada, cuya temperatura antes de la inmersión es de (20±5)°C (Figura 3.33).



Figura 3.32 Horno a 105°C

¹⁴⁶ AENOR (2003). "UNE-EN 14066 Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la resistencia al envejecimiento por choque térmico", Madrid, Aenor.

El procedimiento descrito constituye un ciclo. Si el ensayo tiene que interrumpirse en un momento dado, las probetas se dejarán sumergidas en agua a $(20\pm 5)^\circ\text{C}$.

Se realizarán un total de 20 ciclos humedad-sequedad.



Figura 3.33 Inmersión de probetas en agua destilada a 20°C

Tanto en el horno como en el depósito de agua, las probetas se colocan sobre apoyos, separadas entre sí y de la pared, como mínimo 50 mm. En el depósito de agua, las probetas se colocarán sobre apoyos dispuestos en el fondo del depósito, que se ha llenado con agua destilada hasta una profundidad tal que el nivel del agua por encima de las probetas sea de (60 ± 10) mm (Figura 3.34).



Figura 3.34 Detalle de separación de probetas sumergidas

Después de los 20 ciclos, se secan las probetas hasta masa constante a $(105\pm 5)^\circ\text{C}$ y se pesan (m_f). A continuación se inspeccionan visualmente y se comparan con la probeta de referencia.

Se calcula la variación de masa (Δm) en porcentaje de la probeta después del ensayo mediante la siguiente expresión:

$$\Delta m\% = \frac{m_f - m_o}{m_o} \times 100$$

Donde,

m_f masa de la probeta seca después del ensayo (gr)

m_o masa de la probeta seca antes del ensayo (gr)

Además, se ensayarán las probetas a flexión y compresión y se compararán los resultados con los obtenidos a los 90 días de curado.

3.5.3. Agua salina

El envejecimiento acelerado en agua salina es un ensayo que permite determinar la expansión de volumen de los morteros que contienen componentes sensibles a la hidratación y aumento de volumen, tales como el calcio libre y óxidos de magnesio, contenidos en algunos subproductos industriales, como es el caso de las escorias.

La norma de referencia en la que se describe el proceso de ensayo es la norma americana D 4792 "Standard test method for potential expansion of aggregates from hydration reactions"¹⁴⁷. Aunque este ensayo este orientado al estudio de los conglomerados de hormigón fabricados con escorias, se puede considerar su aplicación a los morteros con escoria de esta Tesis Doctoral.

Se emplean probetas normalizadas de dimensiones (40x40x160) mm³.

Se secan las probetas hasta masa constante en una estufa a 70°C, anotándose previamente su peso y dimensiones. Posteriormente, se sumergen completamente en recipientes con agua salina a una temperatura de (70 ± 3)°C durante un mínimo de 7 días. Para este estudio se han mantenido las probetas en agua salina durante 32 días. (Figura 3.35)



Figura 3.35 Probetas en agua salina

Una vez transcurrido el tiempo indicado se secan las probetas y se comprueban las variaciones de peso y dimensiones.

Además se ensayarán a flexión y compresión para conocer la evolución de sus resistencias mecánicas.

¹⁴⁷ ASTM (2000). "D 4792 Standard test method for potential expansion of aggregates from hydration reactions", American Society for Testing and Materials. Philadelphia, PA. Annual Book of ASTM Standard.

3.5.4. Cristalización de sales

No existe una norma UNE de morteros específica para el estudio del comportamiento de los mismos frente a la cristalización de sales, por lo que se emplea, por analogía entre el comportamiento de una piedra natural y el mortero de cemento, la norma UNE-EN 12370 "Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la resistencia a la cristalización de las sales"¹⁴⁸.

Se emplean probetas normalizadas de dimensiones (40x40x160) mm³.

Las probetas tienen que secarse en un horno a una temperatura de (105±5)°C hasta masa constante. Se anota el peso y dimensiones de las probetas.

El procedimiento requiere la utilización de una solución de sulfato sódico decahidratado al 14% (Figura 3.36).

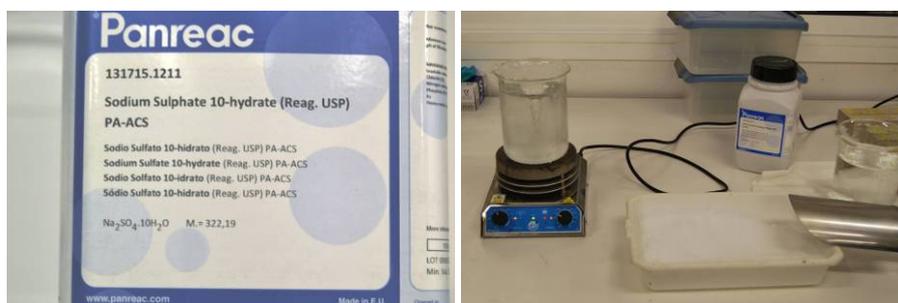


Figura 3.36 Solución de sulfato de sodio decahidratado al 14%

Se sumergen las probetas secas en un contenedor y se las cubre con la solución de sulfato de sodio, hasta que el nivel sobrepase en (8±2) mm la parte superior de la probeta. A continuación, el contenedor se cubre para reducir la evaporación. Las probetas se dejan así sumergidas durante 2 h a (20±0,5)°C (Figura 3.37).



Figura 3.37 Probetas sumergidas en solución salina

Después de la inmersión, las probetas se retiran de la solución y se secan en un horno a (105±5)°C durante un período mínimo de 16 h, y a

¹⁴⁸ AENOR (1999). "UNE-EN 12370 Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la resistencia a la cristalización de sales", Madrid, Aenor.

continuación se retiran y se dejan enfriar a temperatura ambiente durante $(2,0\pm 0,5)$ h (Figura 3.38) antes de volver a sumergirlas en la disolución de sulfato de sodio.



Figura 3.38 Período de enfriamiento de probetas

Este ciclo de operaciones se repite 15 veces en total, excepto si las probetas se rompen antes. Después del 15º ciclo, las probetas se retiran del horno y se conservan durante (24 ± 1) h en agua a (23 ± 5) °C. Finalmente, se lavan cuidadosamente con agua corriente. Las probetas se pesan, después de secarlas hasta masa constante, si su estado de cohesión lo permite. Si el ensayo tiene que interrumpirse en algún momento, las probetas tienen que dejarse en el horno a (105 ± 5) °C.

La diferencia de masa relativa ΔM en porcentaje con respecto a la masa seca inicial M_d se calcula según la siguiente expresión:

$$\Delta M = \frac{M_f - M_d}{M_d} \times 100$$

Donde,

M_f es la masa de la probeta seca después de 15 ciclos (gr)

M_d es la masa de la probeta seca antes del primer ciclo (gr)

3.5.5. Atmósfera industrial. Ensayo Kesternich

Para el estudio del comportamiento de los morteros expuestos a la acción de agentes agresivos producidos por atmósferas industriales se ha seguido el procedimiento contemplado en la norma UNE-EN 6988 "Recubrimientos metálicos y otros recubrimientos no orgánicos. Ensayo al dióxido de azufre con condensación general de la humedad"¹⁴⁹. Esta norma coincide con la norma Alemana DIN 50018 "Ensayos de corrosión en atmósferas húmedas saturadas con adicción de dióxido de azufre"¹⁵⁰.

¹⁴⁹ AENOR (1996). "UNE-EN 6988 Recubrimientos metálicos y otros recubrimientos no orgánicos. Ensayo al dióxido de azufre con condensación general de la humedad", Madrid, Aenor.

¹⁵⁰ DIN (1997). "DIN 50018 Sulfur dioxide corrosion testing in a saturated atmosphere", Berlin, Deutsches Institut für Normung.

Se emplean probetas normalizadas de dimensiones (40x40x160) mm³.

Las probetas se exponen en el interior de la cámara (Figura 3.39) durante 8 h y a una temperatura de 40°C ± 3°C, donde se ha introducido previamente 0,2 dm³ de dióxido de azufre. Posteriormente, la puerta de la cámara se abre automáticamente y se dejan las probetas a temperatura y atmósfera ambiente durante 16 h. El ciclo completo dura 24 h.



Figura 3.39 Cámara de ensayo

El ensayo concluye cuando se observa un deterioro evidente de las piezas o bien se alcanzan los ciclos estimados para el mismo, en este caso 15 ciclos.



Figura 3.40 Probetas de mortero sometidas a ensayo Kesternich

Capítulo IV

Caracterización de materias primas

4. CARACTERIZACIÓN DE MATERIAS PRIMAS

Para la elaboración de los morteros se ha empleado un único tipo de cemento, arena de sílice proveniente de canteras ubicadas en la provincia de Burgos y dos tipos distintos de áridos siderúrgicos, escoria negra de horno eléctrico de arco (EAF) y escoria blanca de horno cuchara (LF).

4.1. CONGLOMERANTE

El cemento utilizado ha sido cemento Portland tipo CEM I 42,5R, fabricado por la empresa Cementos Alfa S.A., del grupo Portland Valderribas, en su factoría de Mataporquera (Cantabria).



Figura 4.1 Cemento empleado CEM I 42,5 R

La Instrucción para la Recepción de Cementos RC-08 recoge en el Anejo 8. “Recomendaciones de uso. A8.5”, los cementos recomendados para su uso en la fabricación de morteros de albañilería aceptando cualquier cemento común, excepto los tipos CEM I y CEM II/A.

Es recomendable la utilización de cementos con una resistencia inicial normal no superior a $32,5 \text{ N/mm}^2$. Esta elección se justifica para evitar las tensiones producidas durante el fraguado en las primeras edades, debidas a los altos calores de hidratación.

Ha sido imposible encontrar cementos con esta característica resistente y que no posean ningún tipo de adición activa en el clinker que pudiera producir interferencias y reacciones con el árido siderúrgico empleado, por lo que se decide la utilización del CEM I 42,5 R.

El Certificado de Características Técnicas, expedido por la fábrica de Mataporquera para su cemento CEM I 42,5 R, se resume en la Tabla 4.1 y en la Tabla 4.2.

Características Técnicas CEM I 42,5 R			
Ensayos		Resultados Valor Promedio	Especificación Norma EN/EUNE
Características Químicas			
Pérdida por Calcinación/ Pérdida al fuego	%	1,6	< 5,0
Residuo Insoluble	%	0,5	< 5,0
Sulfatos (SO ₃)	%	3,3	< 4,0
Cloruros	%	0,00	< 0,10
Características Físicas y Mecánicas			
Agua de Consistencia Normal	%	30,9	
Principio de fraguado	min	169	> 60
Final de fraguado	min	226	< 720
Expansión Le Chatelier	mm	0,2	< 10
Superficie específica (Blaine)	cm ² /g	3934	
Resistencia mecánica a compresión a 2 días	MPa	36,0	> 20,0
Resistencia mecánica a compresión a 28 días	MPa	57,1	42,5 – 62,5

Tabla 4.1 Certificado de características técnicas CEM I 42,5 R
 Certificado ER: ER-0572/1998. Fábrica Mataporquera (Cantabria)

Componentes CEM I 42,5 R			
		Resultados Valor Promedio	Especificación Norma EN/EUNE
Clinker (K)	%	95	95-100
Caliza (L)	%	5	-
Ceniza Volante (V)	%	-	-
Puzolana (P)	%	-	-
Escoria siderúrgica (S)	%	-	-
Regulador de fraguado	%	5	-

Tabla 4.2 Componentes del cemento referidos al núcleo del cemento, excluido el regulador de fraguado
 Fábrica Mataporquera (Cantabria)

Además de la caracterización proporcionada por la empresa, se ha calculado la densidad real del cemento, siendo esta 3.150 kg/m³.

El análisis químico de los cementos se ha completado con la determinación de fases por fluorescencia de rayos X. (Tabla 4.3)

Análisis químico del cemento CEM I 42,5 R Fluorescencia de Rayos X	
Elementos	%
SiO ₂	21,3
Fe ₂ O ₃	4,0
Al ₂ O ₃	6,1
CaO	60,4
MgO	1,5
K ₂ O	1,3
Na ₂ O	0,4
P ₂ O ₅	-
MnO	-
TiO ₂	-
Otros	3,0
Pérdida al fuego	2,0

Tabla 4.3 Análisis químico del cemento FRX

4.2. AGUA

El agua empleada es el agua potable suministrada por la Empresa Sociedad Municipal de Aguas de Burgos, S.A.U. Este agua está destinada al consumo y está perfectamente tratada y libre de cualquier impureza.

No incorpora productos alcalinos o sales que puedan interferir en los procesos de fraguado y endurecimiento del mortero o en la posible aparición de eflorescencias. El análisis del agua empleada se refleja en la Tabla 4.4.

Análisis del agua potable de la Ciudad de Burgos	
Parámetro	Valor
Olor (Índice de dilución)	0,0
Sabor (Índice de dilución)	0,0
Color (mg/l Pt/Co)	< 1,0
pH	8,0
Turbidez (UNF)	0,2
Conductividad (μ S/cm)	111,8
Nitratos (mg/l)	0,7
Nitritos (mg/l)	< 0,05
Amonio (mg/l)	< 0,01
Cloro libre residual	0,5
Fluoruro (mg/l)	< 0,1
Sodio (mg/l)	2,2
Cloruro (mg/l)	3,9
Sulfato (mg/l)	5,5
Calcio (mg/l)	18,0
Dureza total (°F)	5,0
Bicarbonato (mg/l)	57,6
Hierro (mg/l)	0,02
Aluminio (mg/l)	0,03
Cobre (mg/l)	< 0,005
Suma de trihalometanos (mg/l)	< 0,02

Tabla 4.4 Análisis del agua potable de la ciudad de Burgos

4.3. ÁRIDO NATURAL

La arena utilizada en la elaboración de los morteros, tanto para el mortero de referencia (MR) como para los morteros con sustitución de escoria negra y blanca (MEA, MEB, MEC), es de naturaleza silícea, *“procedente de depósitos fluviales naturales, extraída con medios mecánicos y seleccionada mediante hidroclasificación, sin aporte de ningún proceso químico”*, de una cantera a cielo abierto que se ubica en la localidad de Montorio, provincia de Burgos, facilitada por la empresa Arenas Industriales Montorio, S.A., (AIMSA).

La arena llegó al Laboratorio de Materiales de Construcción en sacos de varios tamaños, 0/0,5; 0,5/1 y 1/2. Su análisis químico determina un contenido de $\text{SiO}_2 > 97\%$; se trata de *“piedra natural de aristas redondeadas,*

limpia de arcillas y materias orgánicas, compuesta por granos comprendidos entre los 0 y los 2 mm". La densidad de las partículas es de 2,6 gr/cm³, y la densidad aparente como árido de 1,6 gr/cm³.

El análisis químico realizado por fluorescencia de rayos X y proporcionado por AIMS A es el expuesto en la Tabla 4.5.

Análisis químico de la arena Fluorescencia de rayos X	
Elementos	%
SiO ₂	98,4
Fe ₂ O ₃	0,058
Al ₂ O ₃	0,87
CaO	0,027
K ₂ O	0,57
MnO	0,016
TiO ₂	0,022

Tabla 4.5 FRX Arena [AIMSA]

La composición cuantitativa de la arena y la distribución granulométrica del árido en cada uno de los tamices se muestra en la Tabla 4.6

Análisis granulométrico del árido natural						
Luz Tamiz	Retenido (gramos)		% Retenido		% Pasa	
	Parcial	Acumulado	Parcial	Acumulado	Parcial	Acumulado
4,000	0	0	0,0%	0,0%	100,0%	100,0%
2,000	0	0	0,0%	0,0%	100,0%	100,0%
1,000	410	410	41,0%	41,0%	59,0%	59,0%
0,500	290	700	29,0%	70,0%	71,0%	30,0%
0,250	172	872	17,2%	87,2%	82,8%	12,8%
0,125	73	945	7,3%	94,5%	92,7%	5,5%
0,063	30	975	3,0%	97,5%	97,0%	2,5%
<0,063	25	1000	2,5%	100,0%	97,5%	0,0%
			100,0%			
Módulo de finura (MF)		2,93%				

Tabla 4.6 Granulometría del árido natural.

La arena se tamiza y se separa por tamaños de grano, determinando la fracción de material en cada uno de los tamices, para que todos los morteros tengan la misma cantidad, en peso, de árido para cada tamaño.

En el Gráfico 4.1 está representada la curva granulométrica de la arena. Como se puede apreciar, es una arena sin exceso de fracciones gruesas o finas y sin presencia de discontinuidades en la distribución por tamaños. No se emplean tamaños de árido superiores a 2,00mm, pues los morteros comerciales normalmente no los utilizan.

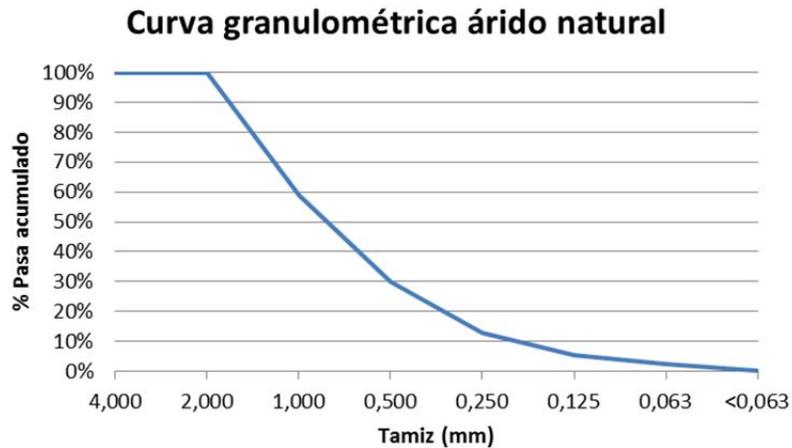


Gráfico 4.1 Curva granulométrica de la arena.

En el Gráfico 4.2 se refleja la curva granulométrica elegida junto con los límites inferiores y superiores fijados en la antigua Norma Básica de la Edificación NBE-FL-90, así como los determinados para el árido fino en la Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08.

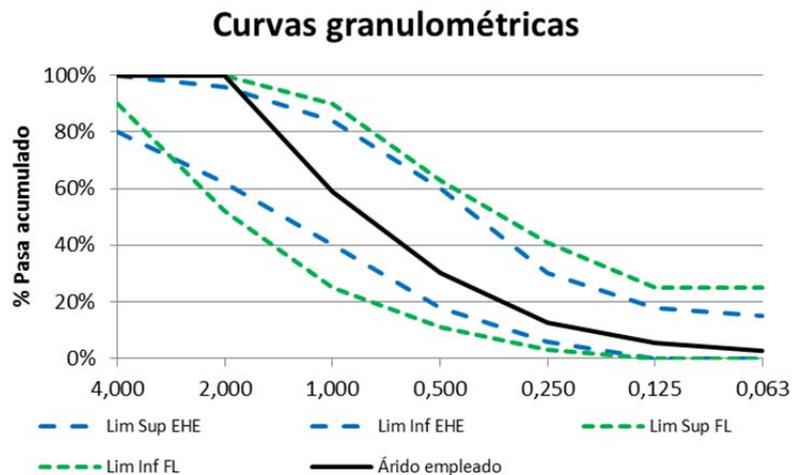


Gráfico 4.2 Curvas granulométricas de referencia

Como se puede observar, la arena elegida para la fabricación de los morteros no se sitúa entre los límites establecidos por Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08, ya que el tamaño máximo del árido elegido

para la fabricación de los morteros objeto de estudio en esta Tesis es de 2,00 mm.

De acuerdo con la distribución de la arena, su línea granulométrica se desplaza equidistante respecto de los límites superior e inferior de las referencias establecidas por la NBE-FL-90, ya que el ámbito de referencia es algo mayor que el que da la Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08.

El filler empleado como árido natural es de naturaleza caliza, compuesto principalmente por carbonato de calcio (CaCO_3) en forma de calcita. La densidad de las partículas es de $2,7 \text{ g/cm}^3$, siendo su densidad aparente de $0,83 \text{ g/cm}^3$.

La incorporación del filler calizo a las mezclas mejora la hidratación de las pastas, dándoles mayor trabajabilidad, evita la segregación de los componentes y reduce el rozamiento entre los mismos, mejorando la retención de agua. Presenta un efecto de "relleno de los huecos" debido a su fina granulometría, mejorando la distribución de tamaños de poros y la compacidad¹⁵¹. Acelera la hidratación del C_3S y C_3A y forma carboaluminatos de calcio, con efectos benéficos sobre la resistencia mecánica y química del mortero.

4.4. ESCORIA NEGRA DE HORNO ELÉCTRICO DE ARCO (EAF)

La escoria negra procede de la planta de áridos reciclados que la empresa HORMOR Áridos¹⁵², del grupo Hormigones y Morteros Agote SL, tiene en Zestoa (Guipúzcoa). Estos provienen de la acería Corrugados Azpeitia.

La empresa obtiene este "árido artificial siderúrgico [...] después de un proceso de enfriamiento, machaqueo, cribado y tamizado, así como separación magnética de los materiales férricos".



Figura 4.2 Escoria Negra

¹⁵¹ Vilanova Fernández, Á. (2009). "Influencia de la dosificación y empleo de diferentes tipos de cemento y adiciones en las propiedades mecánicas del hormigón autocompactante". Universidad Politécnica de Madrid.

¹⁵² Grupo-Etxeberria. "Hormor Áridos." from <http://www.grupoetxeberrria.com/>.

Las escorias recibidas vienen transportadas en sacas, diferenciadas por tamaños, grava, gravilla y arena. Para el presente trabajo de Tesis Doctoral sólo se ha utilizado el tamaño fino, es decir, la arena.

4.4.1. Caracterización física

Como se pretende realizar sustituciones parciales del árido natural por árido siderúrgico, la granulometría empleada en el árido siderúrgico es la misma que la utilizada en el árido natural. Ver Tabla 4.7 y Gráfico 4.3.

Análisis granulométrico del árido siderúrgico						
Luz Tamiz	Retenido (gramos)		% Retenido		% Pasa	
mm	Parcial	Acumulado	Parcial	Acumulado	Parcial	Acumulado
4,000	0	0	0,0%	0,0%	100,0%	100,0%
2,000	0	0	0,0%	0,0%	100,0%	100,0%
1,000	410	410	41,0%	41,0%	59,0%	59,0%
0,500	290	700	29,0%	70,0%	71,0%	30,0%
0,250	172	872	17,2%	87,2%	82,8%	12,8%
0,125	73	945	7,3%	94,5%	92,7%	5,5%
0,063	30	975	3,0%	97,5%	97,0%	2,5%
<0,063	25	1000	2,5%	100,0%	97,5%	0,0%
			100,0%			
Módulo de finura (MF)	2,93%					

Tabla 4.7 Granulometría del árido siderúrgico.

Se tamiza, lava y seca la escoria negra y se separa por tamaños, sustituyendo la arena silícica por ésta en las proporciones del 25, 50, 75 y 100%, en las distintas familias de estudio.

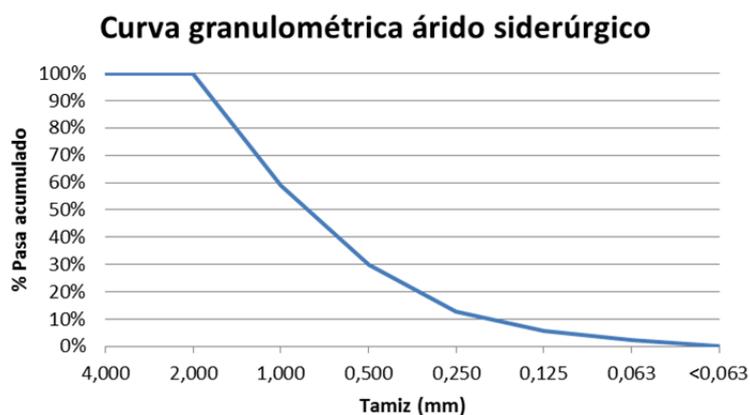


Gráfico 4.3 Curva granulométrica del árido siderúrgico.

Los datos de caracterización físico-mecánica del árido siderúrgico suministrado son los expuestos en la Tabla 4.8.

Caracterización físico- mecánica escoria negra EAF			
Propiedad	Norma	Límite	Árido siderúrgico
Densidad partículas (kg/m ³)	UNE-EN 1097-6	-	3.645
Densidad aparente árido (kg/m ³)	UNE-EN 1097-3	-	1.550
Absorción (%)	UNE EN 1097-6	≤ 5%	1,12%
Coefficiente de friabilidad (%)	UNE-EN 1097-1	≤ 40%	8%
Desgaste de los ángeles (%)	UNE-EN 1097-2	≤ 40%	23,87%
Índice de lascas	UNE-EN 933-3	< 35%	2,80%
Expansividad (%)	UNE-EN 1744-1	< 5%	0,2%
Plasticidad	UNE 103:1994 UNE 104:1994		No plástico
Angulosidad partículas trituradas	UNE-EN 933-3	100%	100%

Tabla 4.8 Caracterización física escoria negra EAF

4.4.2. Caracterización química

Los datos de caracterización química del árido siderúrgico suministrado son los reflejados en la Tabla 4.9.

Caracterización química escoria negra EAF			
Propiedad	Norma	Límite	Árido siderúrgico
Terrones de arcilla, materia orgánica	UNE-EN 103204	< 0,5%	0,04%
Material retenido por el tamiz 0,063 y que flota en un líquido de peso específico 2	UNE-EN 1744-1	< 0,50%	0,01%
Contenido en compuestos totales de azufre (%S)	UNE-EN 1744-1	≤ 1,00%	0,23%
Contenido de sulfatos solubles en ácido (%SO ₃)	UNE-EN 1744-1	≤ 0,80%	0,12%
Contenido en cloruros	UNE-EN 1744-1	≤ 0,03	0,012%
Contenido de óxido de magnesio	UNE-EN 192-2	< 5%	3,2%
Desintegración por el silicato bicálcico	UNE-EN 1744-1	-	Estable
Reactividad álcali- silicato	UNE-EN146509 EX		No reactivo
Pérdida de peso máxima experimentada por los áridos al ser sometidos a 5 ciclos de tratamiento SO ₄ Mg	UNE-EN 1367-2	≤ 15%	1,90%

Tabla 4.9 Caracterización química escoria negra EAF

4.4.3. Difracción de rayos X (DRX)

Las muestras de escoria negra empleadas se analizaron en el Laboratorio de Técnicas Instrumentales de la Universidad de Valladolid. Los datos obtenidos en el ensayo de difracción de rayos X (DRX) están recogidos en la Tabla 4.10.

Difracción de Rayos X (DRX). Escoria Negra EAF		
Gelenita	Ca ₂ Al (AlSiO ₇)	A
Magnetita	Fe ₃ O ₄	B-M
Westita	FeO	B
Concentración estimada: A= Alta; M= Media; B= Baja; I= Indicios		

Tabla 4.10 Difracción de Rayos X. Escoria negra.

4.4.4. Fluorescencia de rayos X (FRX)

Las muestras de escoria negra empleadas se analizaron en el Laboratorio de Técnicas Instrumentales de la Universidad de Valladolid. Los datos obtenidos en el ensayo de Fluorescencia de rayos X (FRX) se recogen en la Tabla 4.11.

Fluorescencia de Rayos X (FRX) Composición de óxidos mayoritarios de la escoria negra	
Fe ₂ O ₃	24,5 %
MnO	4,6 %
TiO ₂	0,68 %
CaO	26,7 %
K ₂ O	0,01 %
SiO ₂	20,9 %
Al ₂ O ₃	12,1 %
P ₂ O ₅	0,46 %
MgO	3,2 %
Na ₂ O	0,00 %
Pérdida fuego	0,00 %

Tabla 4.11 Fluorescencia de rayos X. Escoria negra.

La escoria negra empleada está compuesta mayoritariamente por óxidos de hierro, calcio y silicio, que constituyen alrededor del 72% de la composición total, mientras que la suma de óxidos de aluminio, magnesio y manganeso es aproximadamente del 20%.

4.4.5. Microscopía electrónica de barrido (MEB)

Se han analizado unas muestras de escoria negra EAF mediante la técnica de Microscopía Electrónica de Barrido (MEB), también denominada como Scanning Electron Microscope (SEM).

A continuación se muestran imágenes captadas por el microscopio a diferentes distancias de trabajo y en distintas ubicaciones o zonas (Figura 4.3, Figura 4.4, Figura 4.5), de las escorias negras 0/2.

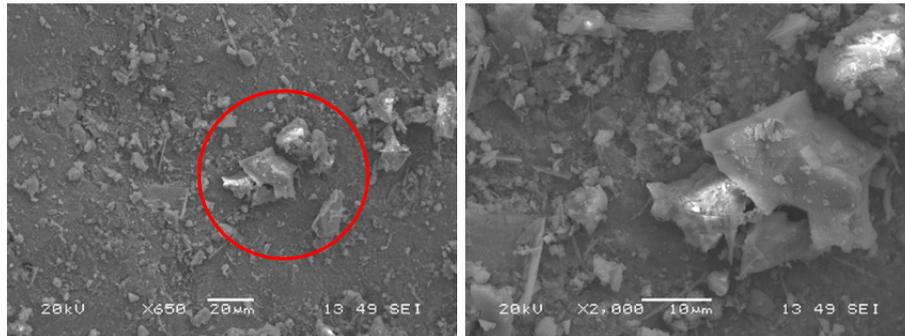


Figura 4.3 Microscopía electrónica de barrido EAF (zona 1)

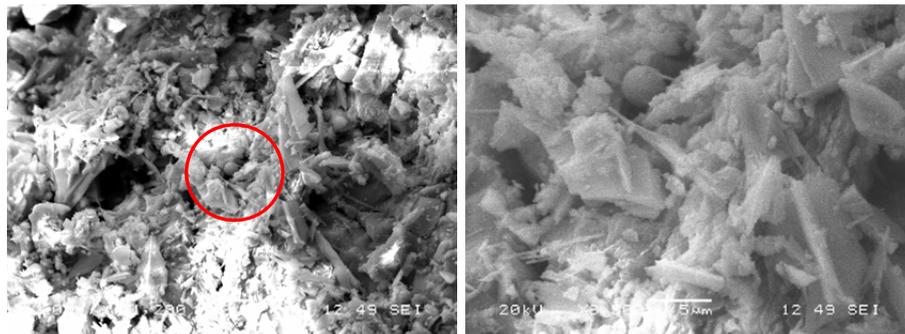


Figura 4.4 Microscopía electrónica de barrido EAF (zona 2)

La escoria negra analizada está formada por partículas comprendidas entre 2 y 20 μm . que contienen agregados cristalinos discontinuos formados por la hidratación a la intemperie de los silicatos bicálcicos y tricálcicos presentes en la escoria. Su aspecto es disgregado y con una importante porosidad superficial.

Si se analizan los compuestos presentes en la escoria negra estabilizada en el vertedero, con tamaños superiores a 10 μm ., se puede comprobar que todos los componentes cristalinos mayoritarios obtenidos en el análisis químico están presentes en su composición.

La presencia de óxidos de hierro predomina sobre las concentraciones de silicatos, siendo importantes los contenidos de calcio, alúmina y magnesio.

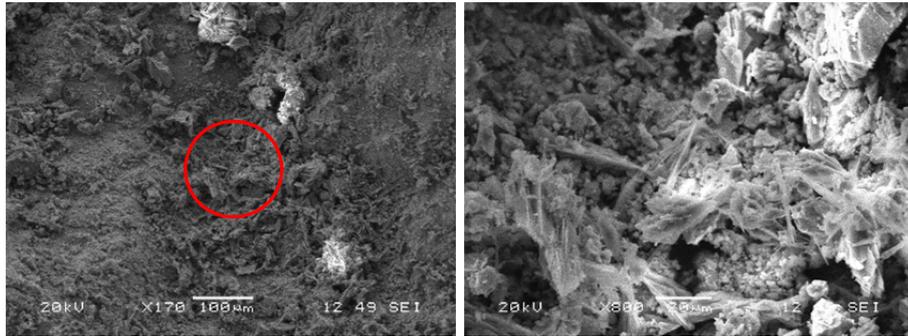
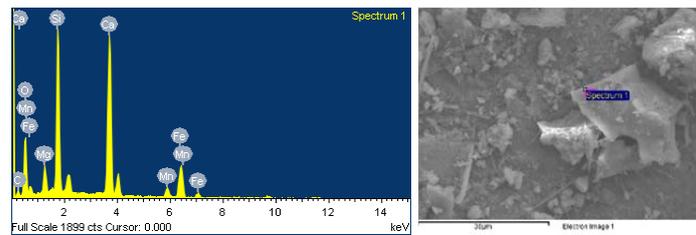


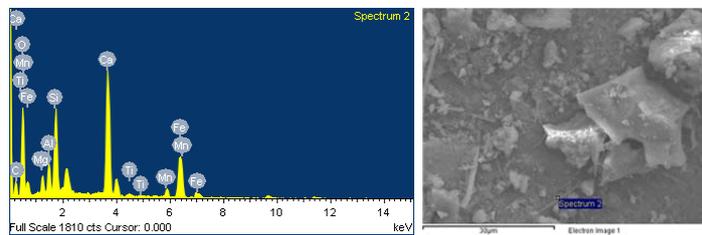
Figura 4.5 Microscopía electrónica de barrido EAF (zona 3)

4.4.6. Microanálisis por energía dispersa de rayos X

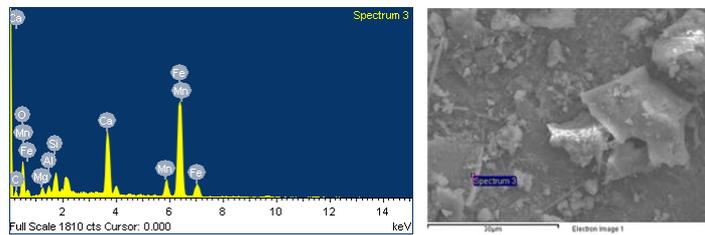
Los datos y las gráficas confeccionadas por el equipo de trabajo quedan reflejados en la Figura 4.6 y en la Tabla 4.12.



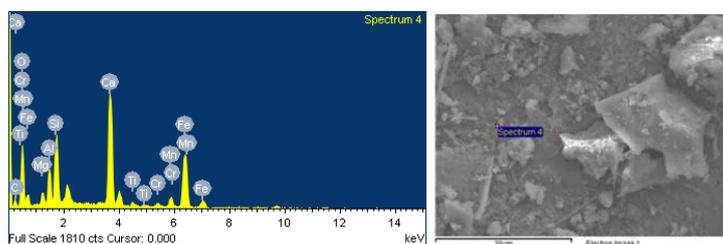
Spectrum 1 (zona1) EAF



Spectrum 2 (zona 1) EAF



Spectrum 3 (zona 1) EAF



Spectrum 4 (zona 1) EAF

Figura 4.6 Microanálisis por energía dispersa de rayos X EAF

Análisis semicuantitativo de composición química elemental por Energía dispersa de rayos X Escoria negra EAF (Peso %)							
	Spec 01	Spec 02	Spec 03	Spec 04	min.	Max	Media
C	5,57	10,61	6,08	7,28	5,57	10,61	7,39
O	34,81	40,21	18,82	31,13	18,82	40,21	31,24
Mg	3,36	2,32	1,57	1,97	1,57	3,36	2,31
Al	-	2,99	1,51	4,44	1,51	4,44	2,24
Si	16,27	7,92	3,13	8,58	3,13	16,27	8,98
Ca	23,75	17,32	12,17	18,20	12,17	23,75	17,86
Ti	-	0,49	-	0,71	0,49	0,71	0,30
Cr	-	-	-	0,81	0,81	0,81	0,20
Mn	3,19	2,55	6,65	3,40	2,55	6,65	3,95
Fe	13,05	15,59	50,07	23,48	13,05	50,07	25,55
Total	100 %	100 %	100 %	100 %			100 %

Tabla 4.12 Microanálisis por energía dispersa de rayos X EAF

Este análisis evidencia la presencia de gran cantidad de oxígeno, hierro y calcio, lo que unido a la existencia de silicio y aluminio hace pensar en la existencia de silicatos y de aluminatos junto a los compuestos químicos típicos de las escorias negras, como son los óxidos de calcio y magnesio.

4.4.7. Análisis termogravimétrico (TGA)

Los resultados obtenidos en el ensayo de la escoria negra se muestran en el Gráfico 4.4 y Gráfico 4.5.

En el Gráfico 4.4 se representa la disminución en porcentaje del peso de la escoria negra en función de la temperatura. Se comprueba que el árido siderúrgico, en su conjunto, apenas pierde un 1% de su masa.

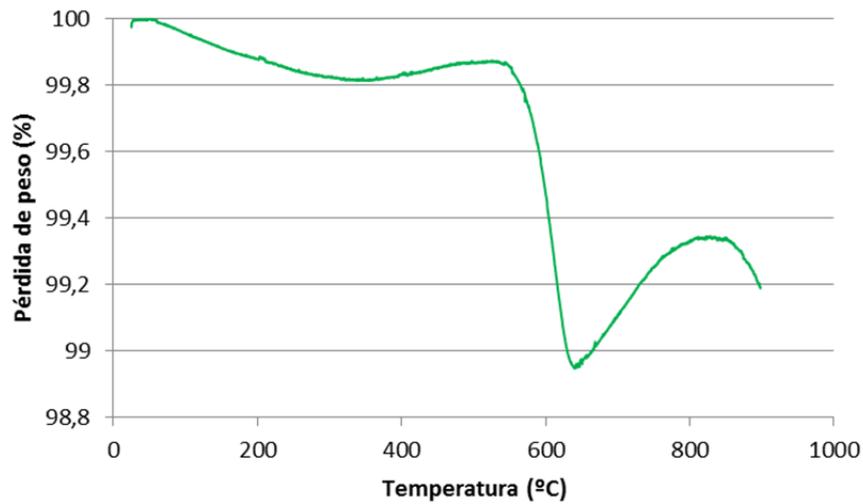


Gráfico 4.4 Degradación por temperatura en la escoria negra EAF

En el Gráfico 4.5 se representa la velocidad de pérdida de peso en función de la temperatura, obtenida mediante la derivada de la curva de pérdida de peso. En este gráfico se puede identificar con mayor claridad la temperatura a la que se produce la mayor reducción del peso. En el caso de la escoria negra EAF se produce con los 600°C, temperatura a la que los carbonatos presentes en la escoria inician los procesos de descomposición, especialmente la descarbonatación del carbonato cálcico, con el consiguiente desprendimiento de CO₂.

El incremento de masa en el pico endotérmico de los 850°C puede deberse a la captación de oxígeno por algún compuesto.

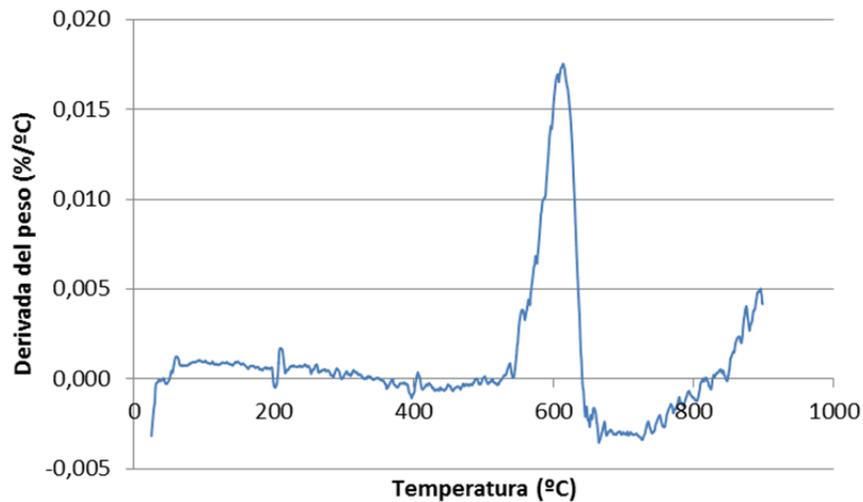


Gráfico 4.5 Curva derivada TGA de la escoria negra EAF

4.5. ESCORIA BLANCA DE HORNO CUCHARA (LF)

La escoria blanca utilizada en el Trabajo de Investigación proviene del proceso de fabricación de acero de la acería Tubos Reunidos Industrial, S.L.U., (Amurrio, Álava), dedicada a la fabricación de tuberías de acero sin soldadura, laminadas en caliente y estiradas en frío, de aceros al carbono y aleados hasta un 13% en Cr.

Los tubos tienen un diámetro exterior comprendido entre los 6 mm y los 180 mm, y un espesor de pared que oscila entre 1 mm y 20 mm, y se emplean en la industria de petróleo y gas, química y petroquímica, generación de energía, transferencia de calor, automoción, mecánica y construcción. [Fuente: <http://www.tubosreunidosindustrial.com>]



Figura 4.7 Escoria Blanca

Las escorias recibidas de la acería se disponen en recipientes tipo “pastera” durante seis años, tiempo que se estima suficiente para garantizar su envejecimiento y estabilización.

4.5.1. Caracterización física

La escoria blanca se emplea sustituyendo total o parcialmente la fracción del filler de la granulometría reflejada en la Tabla 4.7 (apartado 4.4.1, página 102), es decir, el pasa del tamiz 0,063 mm.

La escoria blanca LF utilizada en esta Tesis Doctoral, ha sido probada en otros Trabajos de Investigación: Rodríguez 2008²⁶ y Prieto 2012¹³³, obteniendo la siguiente caracterización física:

²⁶ Rodríguez Sáiz, A. (2008). "Fabricación de morteros de albañilería con escoria blanca de horno cuchara y su utilización en construcción" Tesis doctoral, Universidad de Burgos.

¹³³ Prieto Barrio, M. I. (2012). "Análisis del comportamiento a corrosión de armaduras embebidas en probetas de mortero, con sustitución parcial de áridos y cemento por escorias blancas de horno cuchara", Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica de Madrid.

Caracterización física escoria blanca LF	
Propiedad	Árido siderúrgico
Densidad real partículas	2,86 gr/cm ³
Densidad de conjunto como árido	1,25 gr/cm ³
Humedad natural	0,35%
Superficie específica Blaine	2654-3091 cm ² /gr
Equivalente de arena	50%
Plasticidad	No plástico
Hinchamiento	0,04%

Tabla 4.13 Caracterización física escoria blanca LF

4.5.2. Caracterización química

La caracterización química de la escoria blanca LF empleada está recogida en la Tabla 4.14.

Caracterización química 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 ₃)	0,32%
Sales solubles en agua	0,92%
Sales solubles sin yeso	0,80%
Contenido en yesos	0,00%
Materia orgánica	0%

Tabla 4.14 Caracterización química escoria blanca LF

4.5.3. Difracción de rayos X (DRX)

Para conocer la composición cristalina y mineralógica se empleó la técnica de análisis por Difracción de Rayos X. (Tabla 4.15)

La escoria blanca está compuesta principalmente por calcita y portlandita.

Difracción de Rayos X (DRX). Escoria blanca LF		
Calcio-olivino	Ca ₂ SiO ₄	M
Trialuminato pentacálcico y Mayenita	A ₃ C ₅	T
Calcita	CO ₃ Ca	A
Portlandita	Ca(OH) ₂	A
Periclusa	MgO	B
Concentración estimada: A= Alta; M= Media; B= Baja; T= Trazas		

Tabla 4.15 Difracción de rayos X (DRX) escoria blanca LF

4.5.4. Fluorescencia de rayos X (FRX)

El análisis químico de la escoria blanca se puede consultar en la Tabla 4.16, donde se recogen las proporciones de los componentes más importantes que la forman.

La escoria blanca analizada presenta una alta concentración de silicatos, aluminatos y magnesia combinados con óxido de cal. Las concentraciones de componentes minoritarios no son significativas y no resultan de importancia para los objetivos de esta Tesis Doctoral.

La presencia de componentes de naturaleza metálica potencialmente contaminantes, como el níquel, zinc, cadmio, arsénico, mercurio o plomo tampoco es importante.

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

Tabla 4.16 Composición química escoria blanca LF

4.5.5. Microscopía electrónica de barrido (MEB)

Del mismo modo que para la escoria negra, la escoria blanca LF se ha analizado mediante la técnica de Microscopía Electrónica de Barrido (MEB).

Las muestras de escoria analizadas están disgregadas en partículas con un tamaño comprendido entre 5 y 60 μm ., sin formación cristalina y contienen proporciones variables de silicatos y aluminatos cálcicos hidratados, con presencia de cal y periclasa totalmente hidratadas en forma de portlandita y brucita.

Si analizamos las partículas comprendidas entre 30 y 80 μm . se puede comprobar que su superficie es rugosa y aparecen agregados cristalinos.

Se observan cantidades importantes de portlandita, lo que indica el alto grado de hidratación de la cal libre, junto con concentraciones de silicatos cálcicos y, en menor cantidad, aluminatos cálcicos.

Las partículas comprendidas entre 2 y 120 μm se encuentran dispersas y constituyen una mezcla heterogénea de fragmentos muy finos junto con agregados muy simples en fase de formación. Estos pequeños agregados se disgregan con facilidad y pueden tener su origen en los procesos de formación de los silicatos y aluminatos cálcicos.

A continuación se muestran las imágenes obtenidas en el microscopio.

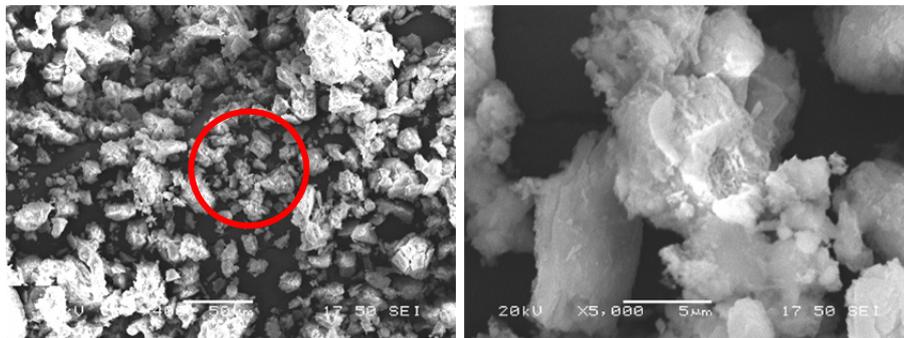


Figura 4.8 Microscopía electrónica de barrido LF (zona 1)

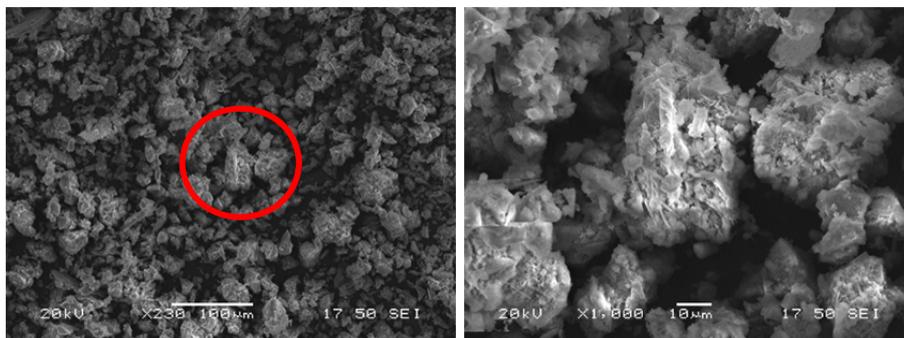


Figura 4.9 Microscopía electrónica de barrido LF (zona 2)

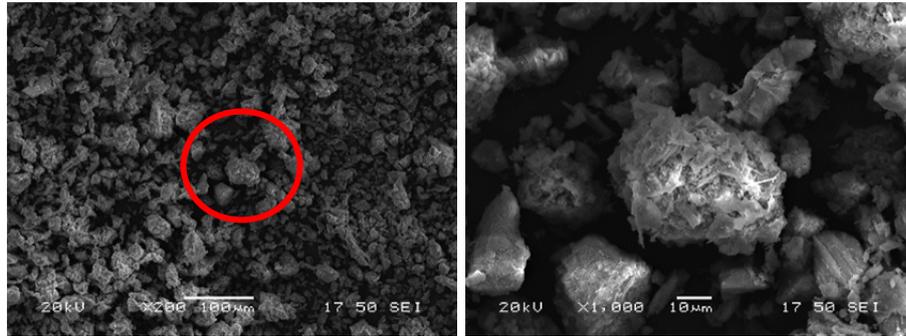


Figura 4.10 Microscopía electrónica de barrido LF (zona 3)

4.5.6. Microanálisis por energía dispersa de rayos X

A la vez que se realizan las fotografías en el microscopio electrónico de barrido, se obtiene el análisis semicuantitativo de la composición química elemental del árido siderúrgico estudiado mediante energía dispersa de rayos X. Los datos y las gráficas confeccionadas por el equipo de trabajo quedan reflejados en la Figura 4.11 y en la Tabla 4.17.

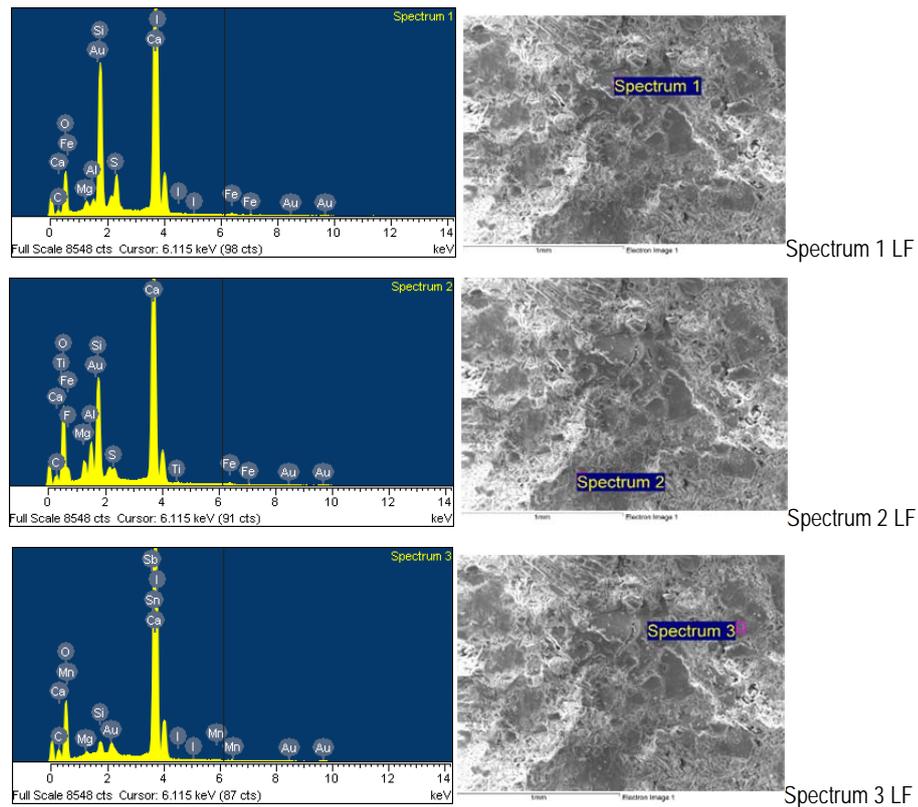


Figura 4.11 Microanálisis por energía dispersa de rayos X (LF)

Análisis semicuantitativo de composición química elemental por energía dispersa de rayos X Escoria blanca LF (Peso %)						
	Spec 01	Spec 02	Spec 03	min.	Max	Media
C	4,05	5,69	4,45	4,05	5,69	4,73
O	35,79	40,83	46,23	35,79	46,23	40,95
I	0,98	0,00	1,38	0,00	1,38	0,79
F	0,00	11,38	0,00	0,00	11,38	3,79
Mg	0,85	1,70	0,42	0,42	1,70	0,99
Al	0,67	2,70	0,00	0,00	2,70	1,12
Si	12,32	7,55	1,06	1,06	12,32	6,98
S	3,36	0,90	0,00	0,00	3,36	1,42
Ca	41,35	28,63	43,21	28,63	43,21	37,73
Mn	0,00	0,00	0,17	0,00	0,17	0,06
Sn	0,00	0,00	1,03	0,00	1,03	0,34
Sb	0,00	0,00	2,05	0,00	2,05	0,68
Ti	0,00	0,22	0,00	0,00	0,22	0,07
Fe	0,63	0,40	0,00	0,00	0,63	0,34
Total	100 %	100 %	100 %			100 %

Tabla 4.17 Microanálisis por energía dispersa de rayos X LF

Este análisis evidencia la presencia de gran cantidad de oxígeno y calcio, y en menor medida silicio y aluminio, lo que hace suponer la existencia de óxidos de calcio, silicatos y aluminatos, compuestos químicos típicos de las escorias blancas.

La escasa presencia de hierro indica que los óxidos de hierro presentes en la escoria blanca no serán significativos, ya que el proceso de afino de los caldos en el horno cuchara se realiza en un ambiente básico con altas concentraciones de cal. De igual forma, la concentración de componentes minoritarios es irrelevante.

4.5.7. Análisis termogravimétrico (TGA)

Los resultados obtenidos de la escoria blanca se muestran en el Gráfico 4.6 y Gráfico 4.7.

En el Gráfico 4.6 se representa la disminución en porcentaje del peso de la escoria blanca en función de la temperatura. Se comprueba que el árido siderúrgico pierde aproximadamente un 18% de su masa.

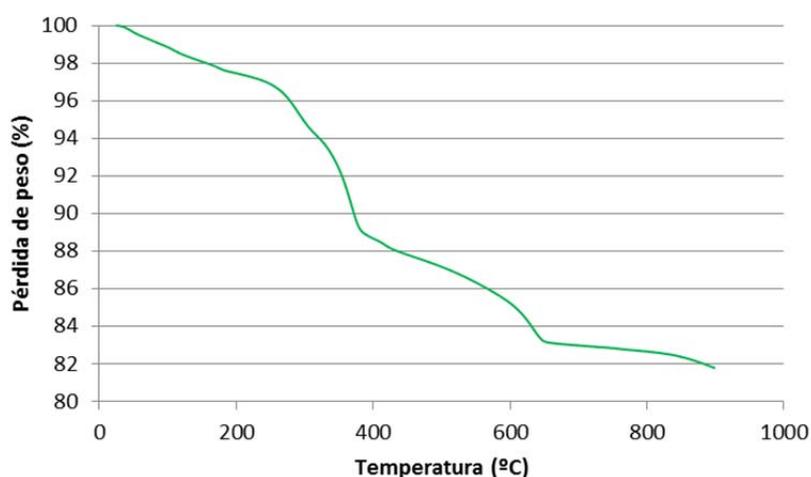


Gráfico 4.6 Degradación por temperatura en la escoria blanca LF

De la misma manera que con la escoria negra, si se deriva la curva de la pérdida de peso, se obtiene la velocidad de pérdida de peso en función de la temperatura. En el caso de la escoria blanca la temperatura en la que se produce la mayor reducción de peso es entre 375 y 400°C, justificado por la transformación de los hidróxidos cálcicos y magnésicos y la formación de brucita y lima, respectivamente, así como la descomposición de la calcita. De igual forma, el pico que aparece a los 650°C puede explicarse por la oxidación de alguno de los compuestos presentes en el material.

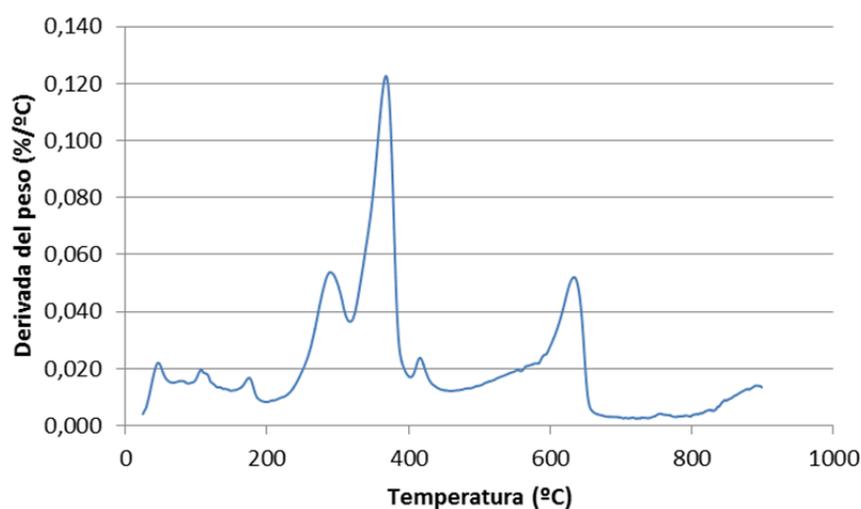


Gráfico 4.7 Curva derivada TGA de la escoria blanca LF

4.6. ADITIVOS

Los aditivos empleados en la elaboración de los morteros son algunos de los que se incluyen habitualmente en los morteros secos.

Los aditivos utilizados son de la casa COPSA[®], actualmente perteneciente a la firma comercial SIKA[®], y corresponden a la gama de retenedores y aireantes-plastificantes que comercializa. (Figura 4.12 y Tabla 4.18)



Figura 4.12 Aditivos empleados

La dosificación de los aditivos se efectúa según las indicaciones fijadas por el fabricante y según las conclusiones del estudio experimental previo. Ésta puede realizarse con una cantidad por kg de mortero seco, o bien con referencia a un % sobre el peso del cemento seco.

Tipo de aditivo	Nombre comercial del aditivo
Retenedor	Cimsil C22
Aireante- plastificante	Premorter Mix 201
Aireante- plastificante	Premorter Mix 202
Aireante	Premorter Mix 100
Aireante	Premorter Mix 112
Superplastificante	Preflow 1000 P

Tabla 4.18 Características de los aditivos empleados

4.6.1. Cimsil C22

Según la ficha técnica del producto el aditivo CIMSIL C22 es un “*aditivo en polvo, constituido por polímeros hidrosolubles y silicatos inorgánicos, de color tostado, con una densidad aparente de 0,48 kg/dm³ ±2%*”.

El aditivo CIMSIL C22, genera en la matriz del mortero una red tridimensional, modificando la reología del mismo. Su base inorgánica de gran superficie específica está recubierta además por un elevado número de centros activos, los cuales fijan las moléculas del componente orgánico del CIMSIL C22. Esta combinación entre ambos componentes aporta un gran poder de retención de agua y el carácter tixotrópico a la matriz, proporcionando al mortero capacidad autocurante.

Esta red mixta está formada por pequeñísimas partículas aciculares y cadenas poliméricas con gran número de hidróxilos, lo que favorece las uniones mortero-soporte-recubrimiento, dando lugar a transferencias por medio de microanclajes de carácter físico y químico.

4.6.2. PremorterMix 201

El PREMORTER MIX 201 es un “*aditivo en polvo, exento de cloruros, que actúa como retenedor del agua de amasado y, a su vez, como plastificante del mortero. Es de color blanco y tiene una densidad de 1,3 gr/cm³ ±0.03*”.

El aditivo mejora las características del mortero aumentando su cohesión y su trabajabilidad, reduciendo parte del agua del amasado y mejorando las propiedades del mortero, tanto en lo que se refiere a su resistencia mecánica como a su durabilidad, regula la retención de agua, evitando la pérdida por absorción del soporte o evaporación.

4.6.3. PremorterMix 202

El aditivo PREMORTER MIX 202 es un “*aditivo en polvo, exento de cloruros, que actúa como retenedor de agua de amasado y a su vez como*

plastificante del mortero, es de color marfil y tiene una densidad de 0,9 g/cm³ ±0.03”.

El aditivo aumenta la plasticidad y trabajabilidad del mortero, reduce la segregación y el riesgo de exudación, así mismo aumenta el contenido de aire, por lo mejora las propiedades del mortero en los ciclos hielo- deshielo.

4.6.4. PremorterMix 100

El aditivo PREMORTER MIX 100 es un aditivo aireante en polvo, exento de cloruros, de color beige y con una densidad aparente de 1,15 gr/cm³ ± 0,03.

Aporta las siguientes propiedades al mortero: actúa como plastificante-aireante, mejorando la trabajabilidad del mortero, sobre todo si las arenas son ásperas o de mala calidad. De igual forma, permite reducir el agua de amasado y, debido a la oclusión limitada de aire, aumenta la resistencia del mortero endurecido a las heladas y a la intemperie.

4.6.5. PremorterMix 112

El aditivo PREMORTER MIX 112 es un aditivo aireante, plastificante y reductor de agua de alta eficacia para el mortero seco. Está exento de cloruros, es de color beige y tiene una densidad de 0,70 gr/cm³ ± 0,03.

Según su ficha de características, permite fabricar morteros de gran docilidad, facilitando y agilizando la puesta en obra, además es un gran reductor de agua de amasado, mejorando la durabilidad y calidad de los morteros e incrementando su resistencia a los ciclos hielo-deshielo.

4.6.6. Preflow 1000

El PREFLOW 1000 es un superplastificante en polvo de base polimérica, exento de cloruros, se presenta también en polvo. Es de color marrón claro y tiene una densidad aparente de 0,93 kg/dm³ ± 2%.

Este aditivo mejora considerablemente la tixotropía, cohesividad y trabajabilidad de la masa en estado fresco, contribuyendo a incrementar la cohesión y homogeneidad del mortero. También facilita la dispersión de partículas de cemento y, por tanto, su rendimiento. Es eficaz en el incremento de las resistencias mecánicas y contribuye a la estabilidad dimensional del mortero endurecido.

Capítulo V

Fabricación y dosificación

5. FABRICACIÓN Y DOSIFICACIÓN

5.1. ELABORACIÓN DE LOS MORTEROS

5.1.1. Equipos de laboratorio utilizados en los ensayos

Los equipos de laboratorio utilizados en la Tesis Doctoral son los descritos en la Normativa correspondiente y pertenecen a la dotación técnica del Laboratorio de Materiales de Construcción del Departamento de Construcciones Arquitectónicas e Ingeniería de la Construcción y del Terreno de la Escuela Politécnica Superior de la Universidad de Burgos. En la Tabla 5.1 se recogen las características de los mismos.

Ensayo	Equipo	Norma	Características
Preparación de mortero	Amasadora	EN 196-1	Marca PROETI, S.A. modelo C0087
Preparación de probetas	Molde	UNE-EN 1015-11	
Curado de probetas	Cámara húmeda	UNE-EN 1015-11	Tª 20°C Humedad 95%
Resistencias mecánicas	Prensa	UNE-EN 1015-11	Marca Supecar modelo MEM-101/SDC de 200 kN
Consistencia	Mesa de sacudidas y molde	UNE-EN 1015-3	Marca Proeti, S.A., modelo C00220
Densidad	Molde	UNE-EN 1015-4	
Aire ocluido	Molde y equipo	UNE-EN 1015-7	Aerómetro de 1l capacidad Marca Testing Nr 9930

Tabla 5.1 Equipos utilizados para la realización de ensayos

5.1.2. Procedimiento operatorio

A continuación se recoge el procedimiento seguido para el amasado y elaboración de probetas necesarias para caracterizar los morteros, tanto para los morteros de referencia sin aditivos, como los morteros con árido siderúrgico.

5.1.2.1. Preparación de los materiales

Los materiales utilizados para la preparación de las diferentes dosificaciones se pesan en la báscula por separado.

En primer lugar, se pesan los áridos (arena, filler calizo, escoria negra y escoria blanca), utilizando para ello una báscula con una precisión de 0,1 gr

(Figura 5.1), y se mezclan manualmente, hasta conseguir una mezcla homogénea. Posteriormente se pesan el cemento y el agua.



Figura 5.1 Determinación cantidad de cemento, arena y escoria



Figura 5.2 Preparación árido mortero con escorias

5.1.2.2. Amasado del mortero

Para la preparación de las mezclas se emplea una amasadora Marca Proeti, S.A., modelo C0087 (Figura 5.3). Este equipo dispone de un programa operativo que secuencía los movimientos de rotación de la pala y añade el árido al recipiente, de acuerdo con los tiempos determinados en la norma.

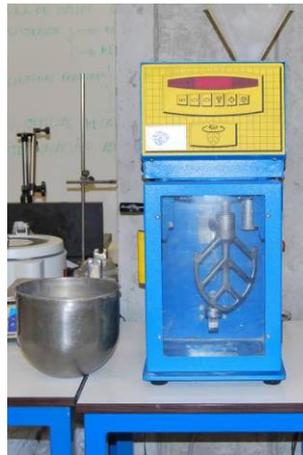


Figura 5.3 Amasadora mecánica programable.

Tanto el tiempo de amasado como frecuencia de giro de la pala están programados de acuerdo con lo establecido en la norma UNE-EN 1015-2

“Métodos de ensayo de morteros para albañilería. Parte 2: Toma de muestra total de morteros y preparación de morteros para ensayo”¹⁵³.

5.1.2.3. Preparación de las probetas

Los moldes utilizados para la preparación de las probetas son de acero calibrado. Una vez limpios y lubricados con aceite en sus caras interiores, se llenan con mortero fresco en dos capas aproximadamente iguales, compactando cada una de ellas con 25 golpes de pisón.

En la Figura 5.4 se observa el molde empleado, el pisón para la compactación y la regla de enrase.



Figura 5.4 Molde para elaboración probetas

El exceso de mortero se elimina con la regla metálica, enrasándolo a nivel del borde superior del molde y consiguiendo una superficie lisa y plana.



Figura 5.5 Elaboración de probetas

A continuación, el molde se introduce en una cámara húmeda y se mantiene durante 24 horas a una temperatura constante de 20°C y una humedad relativa del 95%. Transcurrido este tiempo, se desmoldan las probetas y se identifican, devolviéndolas nuevamente a la cámara hasta completar el proceso de curado y endurecimiento hasta los 28 días.

¹⁵³ AENOR (1999). "UNE-EN 1015-2 Métodos de ensayo de los morteros de albañilería. Parte 2: Toma de muestra total de morteros y preparación de los morteros para ensayo", Madrid, Aenor.

En la Figura 5.6 se muestra la cámara húmeda donde han permanecido las probetas hasta completar su curado, antes de ser sometidas a los ensayos para su caracterización.



Figura 5.6 Cámara húmeda

En la Figura 5.7 se observan algunas de las probetas realizadas, debidamente identificadas.



Figura 5.7 Probetas de mortero

5.2. DOSIFICACIONES EXPERIMENTALES

Las dosificaciones de los morteros se han diseñado de acuerdo con las prescripciones establecidas en los manuales de operación de las empresas fabricantes. En la Tabla 5.2 se muestran las recomendaciones de la relación de componentes en peso (cemento/árido) recogidas en la práctica habitual.

Morteros de cemento							
Relación de cemento/árido en peso							
Albañilería			1/3	1/4	1/6	1/7	
Mampostería				1/4	1/6	1/7	
Revestimiento	1/1	1/2	1/3	1/4	1/6		1/8

Tabla 5.2 Relaciones en peso de morteros para construcción.

La antigua Norma Básica NBE FL-90 Muros de Resistentes de Fábrica de Ladrillo, referencia distintas dosificaciones para morteros de albañilería, señalando expresamente la influencia que tiene en la resistencia final la arena utilizada.

Por otra parte, la norma indica que para obtener un mortero M-40a (Kg/cm^2), actualmente M-5a (N/mm^2), la dosificación orientativa es 1/6, por lo que se toma como relación de trabajo en la Tesis para la dosificación de los morteros objeto de estudio.

El Trabajo de Investigación se ha orientado para estudiar la utilización conjunta de escoria negra y escoria blanca en la fabricación de morteros de albañilería en sustitución del árido natural.

En la Tabla 5.3 se refleja el tanto por ciento de sustitución del árido natural por árido siderúrgico (escoria negra en fracciones 0,063-1,00 y escoria blanca por el filler calizo), obteniendo de esta forma cinco “familias tipo” de estudio.

Familia		Tipo de árido	
		Árido Natural	Árido Siderúrgico
		Arena+ Filler Calizo	Escoria Negra (EAF) + Escoria Blanca (LF)
Mortero de Referencia	MR	100 %	-
Mortero con Escorias A	MEA	75 %	25 %
Mortero con Escorias B	MEB	50 %	50 %
Mortero con Escorias C	MEC	25 %	75 %
Mortero con Escorias D	MED	-	100 %

Tabla 5.3 Distribución del árido en las familias de ensayo

Se establece un programa de trabajo para conseguir las dosificaciones idóneas siguiendo los siguientes pasos:

- Se diseñan morteros con consistencias plásticas y asiento en la mesa de sacudidas de 175 ± 10 mm. de escurrimiento, conforme a lo establecido en la Norma Europea UNE-EN 1015-2.
- Se incluyen aditivos en las mezclas para conseguir resistencias mecánicas a compresión de, al menos, 5 N/mm^2 a los 28 días, referencia mecánica de la mayor parte de los morteros elaborados en planta, todo ello conforme a lo establecido en las normas UNE-EN 998-1 y UNE-EN 998-2.

En la Figura 5.8 se pueden observar los áridos utilizados en la elaboración de las distintas familias de mortero estudiadas en la Tesis Doctoral.

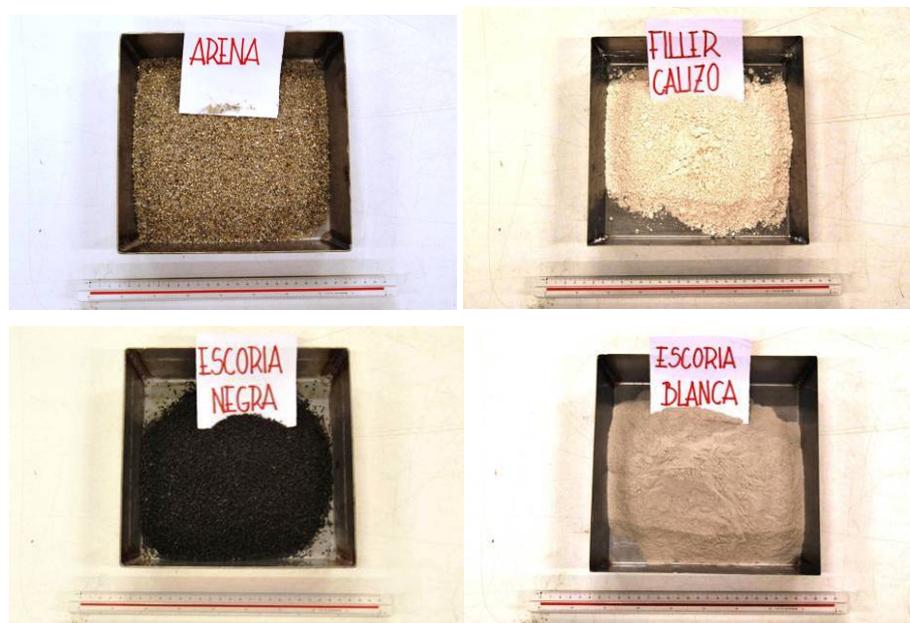


Figura 5.8 Áridos empleados

5.2.1. Estudio previo de dosificación

Como se ha comentado anteriormente, la dosificación en peso de los morteros se establece en una relación 1/6 para todas las familias de estudio (MR, MEA, MEB, MEC y MED), es decir, 1 parte de cemento y 6 de árido, sea éste natural o siderúrgico.

Los aditivos ensayados son del grupo “Copsa” (COMERCIAL DE PRERESA S.A.), ahora perteneciente a la empresa SIKA, SAU., todos ellos se presentan en polvo, condición necesaria para poder elaborar un mortero seco industrial. (Tabla 5.4)

Tipo de aditivo	Nombre comercial del aditivo
Retenedor de agua	Cimsil C22
Aireante- plastificante	Premorter Mix 201
Aireante- plastificante (en pruebas)	Premorter Mix 202
Aireante	Premorter Mix 100
Aireante	Premorter Mix 112
Superplastificante	Preflow 1000

Tabla 5.4 Aditivos ensayados

El estudio preliminar para la elección de aditivos se realiza únicamente en la familia de ensayo MED (Tabla 5.5), pues es la mezcla que más pesa, la que muestra una baja trabajabilidad, más rozamiento entre los diferentes tamaños de los áridos y la que más agua exuda en reposo.

El objetivo de esta fase preliminar es encontrar aditivos idóneos a la mezcla, de tal manera que se obtengan unas resistencias a compresión a 28 días iguales o superiores a 5 N/mm². Al mismo tiempo, también se quiere conseguir una reducción de la exudación del agua de dosificación, favoreciendo la retención del agua de amasado, así como mezclas menos pesadas, reduciendo la densidad del mortero.

Se han ensayado diferentes dosificaciones de aditivos según las recomendaciones del fabricante, obteniendo los resultados expresados en la Tabla 5.5

Mezclas experimentales de trabajo		Aire ocluido	Densidad	R. Comp N/mm ²	
Tipo de aditivo	Dosif	%	Kg/m ³	7 días	
1	MED (sin aditivos)		8,3	2.426,00	13,29
2	MED-Premorter Mix 201	0,30 %	21,0	2.283,83	10,31
3	MED-Premorter Mix 201	0,60 %	22,0	2.200,70	9,25
4	MED-Premorter Mix 201	0,75 %	23,0	2.158,60	8,75
5	MED-Premorter Mix 201	0,90 %	23,5	2.133,70	8,36
6	MED-Premorter Mix 202	0,60 %	38,0	1.731,40	2,66
7	MED-Premorter Mix 202	0,30 %	35,0	1.829,70	2,92
8	MED-Premorter Mix 202	0,10 %	27,5	2.040,90	3,85
9	MED-Premorter Mix 202	0,20%	29,0	1.992,10	3,15
10	MED-Premorter Mix 202	0,15%	28,0	2.006,50	3,76
11	MED-Preflow 1000P	1,50%			Desechada
12	MED-Premorter Mix 112	0,30 %	26,0	2.075,60	7,01
13	MED-Premorter Mix 112	0,60 %	26,5	2.105,60	6,95
14	MED-Premorter Mix 112	0,90 %	27,0	2.123,10	6,83
15	MED-Premorter Mix 100	0,30 %	24,5	2.114,50	7,84
16	MED-Premorter Mix 100	0,60 %	25,0	2.131,30	6,57
17	MED-Cimsil C22	2 gr/kg	31,0	1.865,80	6,33
18	MED-Cimsil C22	1,5 gr/kg	27,0	2.041,10	6,96
19	MED-Cimsil C22	1 gr/kg	24,0	2.102,86	7,94
20	MED-Cimsil C22	1,25 gr/kg	25	2.116,00	7,15

Tabla 5.5 Relación de dosificaciones estudiadas para la familia MED

Tal y como se observa en el Gráfico 5.1, la inclusión de los aditivos produce una reducción de la resistencia mecánica a compresión, en

comparación con los morteros de referencia sin aditivos. De acuerdo con lo recogido en la Tabla 5.5, los aditivos infieren una mayor cantidad de aire ocluido en las mezclas, lo que produce una reducción de su densidad en estado fresco y también de su peso.

Dosificaciones experimentales

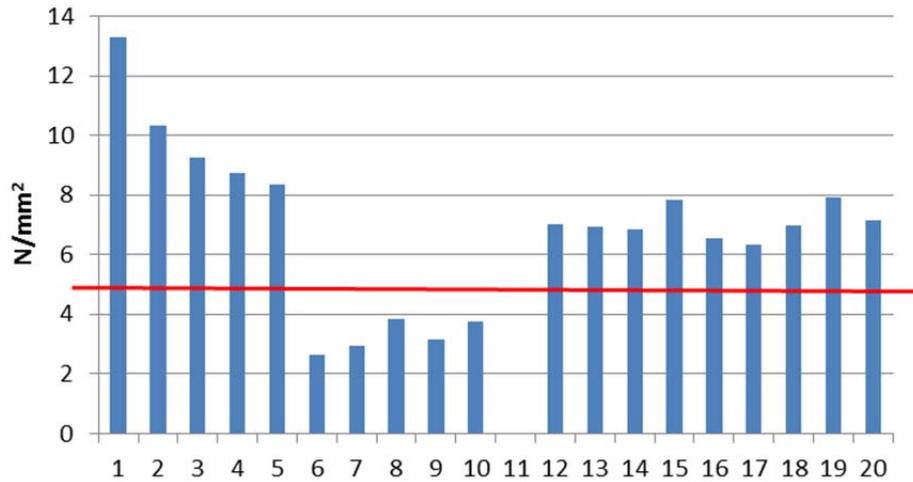


Gráfico 5.1 Resistencia a compresión 7D dosificaciones experimentales

Como la mezcla del agua de dosificación y el árido siderúrgico presenta dificultades, la reducción de la exudación del agua de amasado es uno de los objetivos que condiciona la elección del aditivo.

De los aditivos ensayados, los que favorecen la retención del agua en las mezclas son el Cimsil C22 (C22), Premorter Mix 201 (PM201) y Premorter Mix 202 (PM202).

Por el contrario, los aditivos Premorter Mix 100 (PM100) y Premorter Mix 112 (PM112) no consiguen reducir la exudación del agua en ninguna de las dosificaciones estudiadas. A pesar de haber obtenido consistencias plásticas en la mesa de sacudidas, con deslizamientos medios de 175 ± 10 mm, las mezclas son muy secas y difíciles de amasar por falta de lechada para facilitar el deslizamiento de los áridos.

La dosificación con Preflow 1000 (P1000) presenta un aspecto más seco que las dosificaciones con PM100 y PM112 y no se consigue alcanzar la consistencia plástica deseada.

5.2.1.1. Elección de aditivos

Excepto en los morteros dosificados con aditivo PM202, todas las mezclas alcanzan una resistencia a compresión a los 7 días de 5 N/mm^2 .

En condiciones normales, la resistencia a compresión de un mortero a los 7 días alcanza entorno al 75-80% del valor nominal a los 28 días. De

acuerdo con esta premisa, la mayor parte de las mezclas muestran una previsión de resistencia de, al menos, 5 N/mm² a los 28 días, cumpliendo las expectativas de resistencia media establecidas en los objetivos de diseño.

No obstante, aunque los morteros dosificados con PM202 muestran una evolución de la resistencia menor, por ser un aditivo “*en pruebas*” recomendado expresamente por el fabricante para conseguir mezclas muy trabajables, se decide utilizarlo en la investigación.

Por el contrario, el aditivo P1000 se desecha por su mal comportamiento a la retención de agua, no evitar la exudación de las mezclas y dar consistencias excesivamente secas.

De igual forma, los aditivos plastificantes PM100 y PM112 también se desechan por el aspecto seco de los morteros obtenidos y por no reducir la exudación del agua en ninguna de las dosificaciones experimentales.

Las diferentes dosis de los aditivos ensayados modifican la cantidad de aire ocluido de los morteros, su densidad y la resistencia mecánica, por lo que las dosificaciones se han elegido no sólo por criterios físico-mecánicos, sino también teniendo en cuenta su propiedades organolépticas.

En la Tabla 5.6 están reflejados los aditivos seleccionados y su dosificación.

Tipo de aditivo	Nombre comercial del aditivo	Dosificación
Retenedor de agua	Cimsil C22	1 gr/kg mortero seco
Aireante- plastificante	Premorter Mix 201	0,60% s/cemento
Aireante- plastificante (en pruebas)	Premorter Mix 202	0,15% s/cemento

Tabla 5.6 Aditivos seleccionados

5.2.2. Conclusiones del estudio previo de dosificación

De los ensayos realizados a los morteros con las diferentes dosificaciones de aditivos podemos concluir:

1. El empleo de aditivos en las mezclas ensayadas da lugar a una disminución de la resistencia mecánica de los morteros en todos los casos.
2. De igual forma, los aditivos dosificados incrementan la cantidad de aire ocluido, obteniendo morteros ligeros de menor densidad.
3. Tanto el aditivo retenedor de agua como el aditivo plastificante incluso de aire, en las proporciones establecidas por el fabricante, influyen sustancialmente en el comportamiento mecánico de los morteros. Se han elegido aquellas dosificaciones que, además de cumplir con el objetivo de

resistencia mecánica, tengan una adecuada retención del agua de dosificación.

4. El “estudio preliminar” desarrollado para la elección de los aditivos idóneos incrementa el número de morteros objeto de la investigación. A las cinco “*familias tipo*” determinadas por el grado de sustitución del árido natural por árido siderúrgico (Tabla 5.3, página 125), se añaden otras quince dosificaciones inferidas por la inclusión de los aditivos: retenedor (Cimsil C22) y aireantes- plastificantes (Premorter Mix 201 y Premorter Mix 202). (Tabla 5.7)

Designación de los Morteros de Ensayo						
 Estudio Transversal	Sin aditivos	MR	MEA	MEB	MEC	MED
	Retenedor C22	MR-C22	MEA-C22	MEB-C22	MEC-C22	MED-C22
	Aireante-Plastificante PM201	MR-201	MEA-201	MEB-201	MEC-201	MED-201
	Aireante-Plastificante PM 202	MR-202	MEA-202	MEB-202	MEC-202	MED-202
	Estudio Longitudinal 					

Tabla 5.7 Designación de los morteros ensayados

Se realiza un estudio en sentido longitudinal de los morteros, comparando el mortero de referencia dosificado con árido natural con los morteros en los que se sustituye progresivamente el árido natural por árido siderúrgico. Además, se podrá realizar una comparativa transversal de los morteros con y sin aditivos, también en función del grado de sustitución del árido natural por árido siderúrgico.

Capítulo VI

**Caracterización de los
morteros fabricados con
árido siderúrgico**

6. CARACTERIZACIÓN DE LOS MORTEROS FABRICADOS CON ÁRIDO SIDERÚRGICO

6.1. INTRODUCCIÓN

En la Tabla 6.1 se muestra la relación de componentes para cada una de las familias de morteros objeto de estudio, teniendo en cuenta las premisas establecidas en los objetivos de diseño, es decir, consistencia plástica y resistencias mecánicas a compresión mínimas de 5 N/mm².

Dosificaciones de los morteros									
Mortero	Cem (gr)	Agua (gr)	Árido (gr)				Aditivo (gr)		
			Arena	Filler	EAF	LF	C22	PM201	PM202
MR	300	286,2	1.755	45	-	-	-	-	-
MEA	300	289,1	1.316,25	33,75	438,75	11,25	-	-	-
MEB	300	292,5	877,50	22,50	877,50	22,50	-	-	-
MEC	300	294,7	438,75	11,25	1.316,25	33,75	-	-	-
MED	300	324,0	-	-	1.755	45	-	-	-
MR-C22	300	299,7	1.755	45	-	-	2,1	-	-
MEA-C22	300	296,6	1.316,25	33,75	438,75	11,25	2,1	-	-
MEB-C22	300	293,7	877,50	22,50	877,50	22,50	2,1	-	-
MEC-C22	300	290,7	438,75	11,25	1.316,25	33,75	2,1	-	-
MED-C22	300	286,2	-	-	1.755	45	2,1	-	-
MR-201	300	239,4	1.755	45	-	-	-	1,8	-
MEA-201	300	241,8	1.316,25	33,75	438,75	11,25	-	1,8	-
MEB-201	300	243,9	877,50	22,50	877,50	22,50	-	1,8	-
MEC-201	300	245,2	438,75	11,25	1.316,25	33,75	-	1,8	-
MED-201	300	249,2	-	-	1.755	45	-	1,8	-
MR-202	300	211,6	1.755	45	-	-	-	-	0,45
MEA-202	300	216,7	1.316,25	33,75	438,75	11,25	-	-	0,45
MEB-202	300	219,7	877,50	22,50	877,50	22,50	-	-	0,45
MEC-202	300	223,1	438,75	11,25	1.316,25	33,75	-	-	0,45
MED-202	300	232,0	-	-	1.755	45	-	-	0,45

Tabla 6.1 Dosificaciones de los morteros

Como se ha explicado con anterioridad, la relación de componentes adoptada ha sido la del peso, por la facilidad de preparación de las cantidades necesarias en el laboratorio para la elaboración de las mezclas. Para evitar cualquier alteración en las dosificaciones se ha procedido a un secado exhaustivo del árido antes de su utilización, evitando los efectos de la humedad y del esponjamiento.

Como se puede observar, la relación en peso entre los componentes de los morteros dosificados no varía y es siempre 1 parte de cemento y 6 partes de árido, mientras que la cantidad de agua es la necesaria para conseguir la consistencia plástica en las mezclas, condicionante establecido como criterio de diseño.

6.2. CARACTERIZACIÓN DEL MORTERO FRESCO

6.2.1. Consistencia del mortero y relación agua/cemento

De acuerdo con las premisas de estudio establecidas en la metodología, tanto el mortero de referencia (MR) como las familias de mortero con escorias se dosifican con una relación de componentes en peso (1/6/W), siendo la cantidad de agua añadida la necesaria en cada caso para conseguir la consistencia plástica establecida como parámetro de diseño, con un escurrimiento en la mesa de sacudidas de 175 ± 10 mm.

La Tabla 6.2 recoge la relación agua/cemento de las mezclas.

Relación agua/cemento morteros					
MORTERO	MR	MEA	MEB	MEC	MED
Agua/cemento	0,954	0,964	0,975	0,982	1,080
Variación		+ 1,0 %	+ 2,2 %	+ 3,0 %	+ 13,2 %
MORTERO	MR-C22	MEA-C22	MEB-C22	MEC-C22	MED-C22
Agua/cemento	0,999	0,989	0,979	0,969	0,954
Variación		- 1,0 %	- 2,0 %	- 3,0 %	- 4,5 %
MORTERO	MR-201	MEA-201	MEB-201	MEC-201	MED-201
Agua/cemento	0,798	0,806	0,813	0,817	0,831
Variación		+ 1,0 %	+ 1,9 %	+ 2,4 %	+ 4,1 %
MORTERO	MR-202	MEA-202	MEB-202	MEC-202	MED-202
Agua/cemento	0,705	0,722	0,732	0,744	0,773
Variación		+ 2,4 %	+ 3,8 %	+ 5,4 %	+ 9,7 %

Tabla 6.2 Relación agua/cemento de los morteros estudiados.

Como se puede observar en la Tabla 6.2 los morteros sin aditivos presentan una relación agua/cemento mayor cuanto más escoria se añade a las mezclas.

Al determinar la consistencia de los morteros con escoria que no emplean aditivos, se observa que exudan el agua de amasado. Está fluye hacia fuera y se sitúa en los bordes de la torta de mortero, comprobando al manipularlos el rozamiento que se produce entre los áridos y un mayor apelmazamiento de la masa.

En el caso concreto del mortero cuyo árido está formado sólo por escoria (MED), se precisa un 13% más de agua que en el mortero de referencia dosificado exclusivamente con árido natural (MR), para conseguir la consistencia plástica de diseño. No obstante, aunque presenta consistencia plástica, se amasa con dificultad y se constata la necesidad de incorporar aditivos que mejoren el comportamiento de los morteros.

Al incorporar aditivos en las mezclas se reduce la exudación de los morteros y se consigue una mejor manejabilidad de la masa, reduciendo la tensión superficial entre sus componentes.

El estudio transversal de los morteros en función del aditivo empleado se recoge en la Tabla 6.3.

Comparativo relación agua/cemento (MR)			Comparativo relación agua/cemento (MEA)		
	Agua/ cemento	Variación respecto MR		Agua/ cemento	Variación respecto MEA
MR	0,954		MEA	0,964	
MR-C22	0,999	+ 4,7 %	MEA-C22	0,989	+ 2,6 %
MR-201	0,798	- 16,3%	MEA-201	0,806	- 16,4%
MR-202	0,705	- 26,1 %	MEA-202	0,722	- 25,1 %

Comparativo relación agua/cemento (MEB)			Comparativo relación agua/cemento (MEC)		
	Agua/ cemento	Variación respecto MEB		Agua/ cemento	Variación respecto MEC
MEB	0,975		MEC	0,982	
MEB-C22	0,979	+ 0,4 %	MEC-C22	0,969	- 1,4 %
MEB-201	0,813	- 16,6 %	MEC-201	0,817	- 16,8 %
MEB-202	0,732	- 24,9 %	MEC-202	0,744	- 24,3 %

Comparativo relación agua/cemento (MED)		
	Agua/ cemento	Variación respecto MED
MED	1,080	
MED-C22	0,954	- 11,7 %
MED-201	0,831	- 23,1 %
MED-202	0,773	- 28,4 %

Tabla 6.3 Comparativa relación agua/cemento (w/c)

Al incorporar aditivos aireantes-plasticantes (PM201 y PM202), se reduce considerablemente la cantidad de agua de amasado respecto a sus análogos de referencia sin aditivos; aproximadamente un 16% menos con PM201 y un 25% con PM202.

Se observa que al dosificar con estos aditivos, la naturaleza del árido influye poco o muy poco en la cantidad de agua de amasado, siendo más significativo el efecto del aditivo en sí, que las características del árido.

Cuando el aditivo empleado es retenedor de agua (Cimsil C22), la cantidad de agua a añadir en las mezclas para conseguir morteros de consistencia plástica es prácticamente la misma que la de aquellos que no emplean aditivos.

Del mismo modo, se constata que las cualidades del aditivo retenedor atenúan la existencia de exudación independientemente del árido empleado.

La relación agua/cemento de los morteros queda reflejada en el Gráfico 6.1.

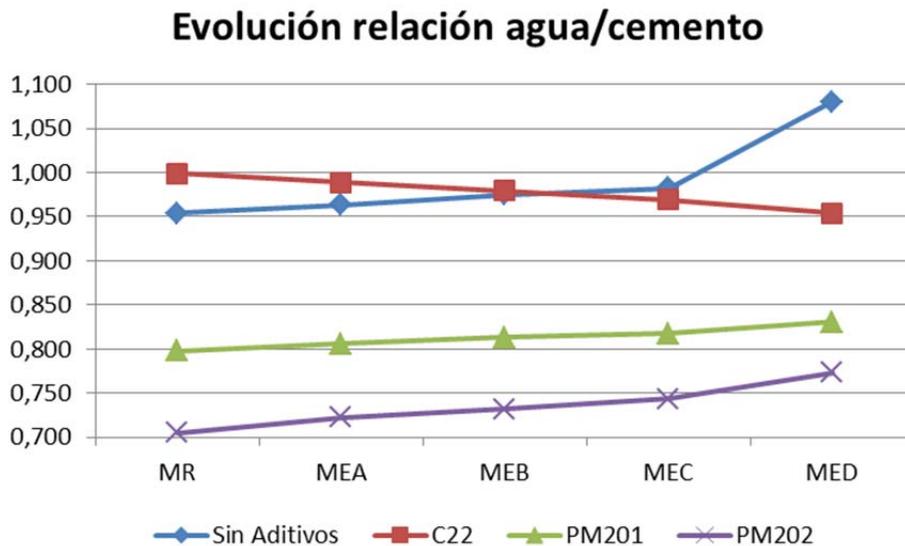


Gráfico 6.1 Evolución relación agua/cemento

Por lo tanto, se puede concluir que para obtener morteros con escorias manejables, con una buena docilidad y que retengan el agua de amasado se hace necesario incorporar aditivos a las mezclas.

En los apartados siguientes se estudia el comportamiento de los morteros cuando incorporan aditivos.

6.2.2. Densidad aparente del mortero fresco

La densidad es una característica directamente relacionada con la naturaleza de los materiales que forman parte del mortero, así como con el contenido de aire ocluido presente en su interior.

La Tabla 6.4 recoge las densidades aparentes del mortero en estado fresco de cada familia de morteros objeto de estudio, donde se observa como aumenta progresivamente el valor de la densidad en función de la sustitución de arena por escoria.

Los resultados indican que la presencia de la escoria en el mortero es determinante en el incremento de la densidad de las mezclas. En efecto, las densidades mayores se corresponden con una mayor sustitución de la arena silícica y del filler por la escoria negra y blanca, respectivamente, por lo que su presencia va a afectar en la trabajabilidad y puesta en obra del mortero en estado fresco.

La explicación a este comportamiento se encuentra si se compara la densidad de la escoria negra, $3,65 \text{ g/cm}^3$ y de la escoria blanca, $2,86 \text{ g/cm}^3$, con la de la arena utilizada $2,6 \text{ g/cm}^3$, mucho menor que las anteriores.

Densidad del mortero fresco					
MORTERO	MR	MEA	MEB	MEC	MED
Densidad kg/m^3	2.092	2.175	2.254	2.344	2.426
Variación		+ 3,9 %	+ 7,7 %	+ 12,0 %	+16,0 %
MORTERO	MR-C22	MEA-C22	MEB-C22	MEC-C22	MED-C22
Densidad kg/m^3	1.827	1.867	1.912	1.980	2.103
Variación		+ 2,2 %	+ 4,7 %	+ 8,4 %	+ 15,1 %
MORTERO	MR-201	MEA-201	MEB-201	MEC-201	MED-201
Densidad kg/m^3	1.823	1.928	2.008	2.107	2.201
Variación		+ 5,7 %	+ 10,1 %	+ 15,5 %	+ 20,7 %
MORTERO	MR-202	MEA-202	MEB-202	MEC-202	MED-202
Densidad kg/m^3	1.607	1.732	1.819	1.941	2.006
Variación		+ 7,8 %	+ 13,2 %	+ 20,8 %	+ 24,8 %

Tabla 6.4 Densidad del mortero fresco

Si el estudio se realiza de manera transversal (Tabla 6.5), se observa que la inclusión de aditivos aireantes-plasticantes a las mezclas reduce la densidad y peso de los morteros. Al incorporar PM201 el valor de la densidad baja del orden del 10%, mientras que con el PM202 disminuye aproximadamente un 20%.

Al incluir un aditivo retenedor de agua, C22, se incrementa el aire ocluido de la mezcla y, como consecuencia, se reduce la densidad aparente del mortero. La densidad se reduce alrededor del 14% respecto de sus homólogos sin aditivos.

Comparativo densidad aparente mortero fresco (MR)		
	kg/m³	Variación respecto MR
MR	2.092	
MR-C22	1.827	- 12,7 %
MR-201	1.823	- 12,8 %
MR-202	1.607	- 23,2 %

Comparativo densidad aparente mortero fresco (MEA)		
	kg/m³	Variación respecto MEA
MEA	2.175	
MEA-C22	1.867	- 14,2 %
MEA-201	1.928	- 11,4 %
MEA-202	1.732	- 20,4 %

Comparativo densidad aparente mortero fresco (MEB)		
	kg/m³	Variación respecto MEB
MEB	2.254	
MEB-C22	1.912	- 15,2 %
MEB-201	2.008	- 10,9 %
MEB-202	1.819	- 19,3 %

Comparativo densidad aparente mortero fresco (MEC)		
	kg/m³	Variación respecto MEC
MEC	2.344	
MEC-C22	1.980	- 15,5 %
MEC-201	2.107	- 10,1%
MEC-202	1.941	- 17,2 %

Comparativo densidad aparente mortero fresco (MED)		
	kg/m³	Variación respecto MED
MED	2.426	
MED-C22	2.103	- 13,3 %
MED-201	2.201	- 9,3 %
MED-202	2.006	- 17,3 %

Tabla 6.5 Comparativa densidad aparente mortero fresco

En el caso del estudio de la densidad aparente influye tanto la naturaleza del árido empleado en las mezclas como las características de los aditivos dosificados.

En el Gráfico 6.2 puede observarse la evolución de la densidad aparente del mortero fresco de los morteros objeto de estudio.

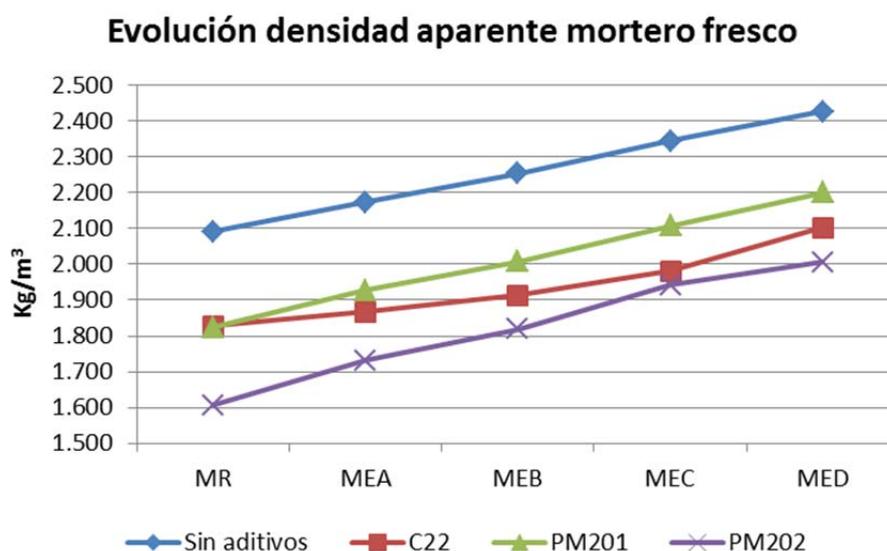


Gráfico 6.2 Evolución densidad aparente mortero fresco

6.2.3. Contenido de aire ocluido

El aire ocluido favorece la manipulación y trabajabilidad de las mezclas en estado fresco y es un factor determinante en el comportamiento de los morteros frente al hielo, la permeabilidad al vapor o la capacidad de succión cuando está expuesto a los agentes meteorológicos.

Es evidente que la dosificación de morteros con aditivos plastificantes inclusores de aire va a producir un incremento importante de la porosidad interna en las mezclas pero, de acuerdo con los objetivos de esta Tesis, se pueden estudiar comparativamente los morteros de referencia con los fabricados con escorias, por si éstas pudieran influir en su comportamiento.

Los resultados obtenidos del ensayo de aire ocluido se reflejan en la Tabla 6.6.

Los morteros sin aditivos presentan un contenido de aire ocluido muy similar, independientemente del árido utilizado, oscilando alrededor del 8,5%. Esto indica una correcta dosificación de la fracción de escoria negra y blanca sustituida en cada uno de los morteros objeto de estudio, ya que la compacidad de las líneas granulométricas se mantiene análoga y muy homogénea en todos los casos, lo que confirma las premisas de diseño establecidas en los objetivos de esta Tesis.

Contenido de aire ocluido en el mortero					
MORTERO	MR	MEA	MEB	MEC	MED
Aire ocluido %	8,5	8,3	8,7	8,9	8,3
Variación		- 2,4 %	+ 2,4 %	+ 4,7 %	- 2,4 %
MORTERO	MR-C22	MEA-C22	MEB-C22	MEC-C22	MED-C22
Aire ocluido %	20,5	22,0	22,5	23,5	24,0
Variación		+ 7,3 %	+ 9,8 %	+ 14,6 %	+ 17,1 %
MORTERO	MR-201	MEA-201	MEB-201	MEC-201	MED-201
Aire ocluido %	21,0	20,5	21,0	21,5	22,0
Variación		- 2,4 %	=	+ 2,4 %	+ 4,8 %
MORTERO	MR-202	MEA-202	MEB-202	MEC-202	MED-202
Aire ocluido %	31,0	29,5	29,0	29,0	28,0
Variación		- 4,8 %	- 6,5 %	- 6,5 %	- 9,7 %

Tabla 6.6 Contenido de aire ocluido en el mortero

El estudio transversal del contenido de aire ocluido de los morteros en función del aditivo incorporado en las mezclas, queda expuesto en la Tabla 6.7.

Tal y como se ha señalado anteriormente, los morteros dosificados con aditivos aireantes-plastificantes contienen una mayor concentración de aire ocluido en comparación con sus análogos sin aditivos.

Así, los morteros con PM 201 tienen un contenido de aire ocluido aproximadamente 2,5 veces superior que el de los morteros sin aditivo, mientras que las mezclas con PM 202 alcanzan un contenido de aire en torno a 3,5 veces más que sus afines sin aditivos.

La presencia de mayor cantidad de aire incide directamente en la facilidad de manipulación, deslizando los componentes unos sobre otros con comodidad sin perder cohesión. Además, reduce considerablemente las necesidades de agua de amasado, según se refleja en el apartado correspondiente de estudio.

En las mezclas con retenedor de agua C22, se observa también un incremento del aire ocluido en el mortero, muy similar a las mezclas dosificadas con PM201, aunque, como se estudió en el apartado anterior, no presentan una reducción en el agua de amasado.

Caracterización de los morteros fabricados con árido siderúrgico

Comparativo contenido aire ocluido (MR)		
	%	Variación respecto MR
MR	8,5	
MR-C22	20,5	+ 141,2 %
MR-201	21,0	+ 147,1 %
MR-202	31,0	+ 264,7 %

Comparativo contenido aire ocluido (MEA)		
	%	Variación respecto MEA
MEA	8,3	
MEA-C22	22,0	+ 165,1 %
MEA-201	20,5	+ 147,0 %
MEA-202	29,5	+ 255,4 %

Comparativo contenido aire ocluido (MEB)		
	%	Variación respecto MEB
MEB	8,7	
MEB-C22	22,5	+ 158,6 %
MEB-201	21,0	+ 141,4 %
MEB-202	29,0	+ 233,3 %

Comparativo contenido aire ocluido (MEC)		
	%	Variación respecto MEC
MEC	8,9	
MEC-C22	23,5	+ 164,0 %
MEC-201	21,5	+ 141,6 %
MEC-202	29,0	+ 225,8 %

Comparativo contenido aire ocluido (MED)		
	%	Variación respecto MED
MED	8,3	
MED-C22	24,0	+ 189,2 %
MED-201	22,0	+ 165,1 %
MED-202	28,0	+ 237,3 %

Tabla 6.7 Comparativa contenido aire ocluido

En el Gráfico 6.3 puede observarse la evolución del contenido de aire ocluido de los morteros objeto de estudio, donde se muestra que la inclusión de aditivo aireante-plasticante y retenedor de agua es determinante en el estudio del aire ocluido de las mezclas, incrementando en todos los casos respecto a las mezclas sin aditivos.

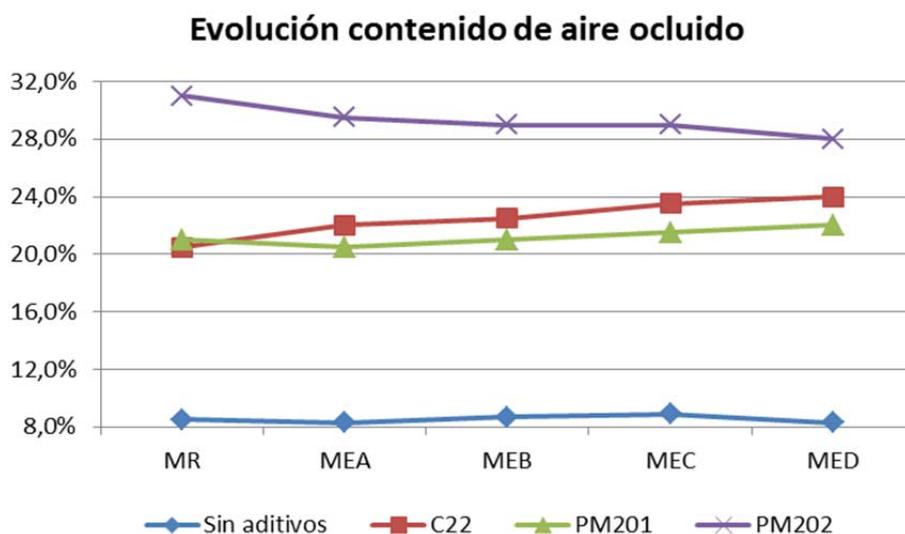


Gráfico 6.3 Evolución contenido de aire ocluido

6.2.4. Tiempo de utilización o de trabajabilidad del mortero fresco

Como ya se ha expresado con anterioridad, el tiempo de utilización de un mortero se define según la norma UNE-EN 1015-9 como el tiempo en minutos, a partir del cual alcanza un límite definido de rigidez y trabajabilidad. En la Tabla 6.8 se recogen los valores medios de cada muestra de mortero ensayado.

Tiempo de utilización o de trabajabilidad del mortero					
MORTERO	MR	MEA	MEB	MEC	MED
Tiempo (min)	310	243	221	185	86
Variación		- 21,6 %	- 28,7 %	- 40,3 %	- 72,3 %
MORTERO	MR-C22	MEA-C22	MEB-C22	MEC-C22	MED-C22
Tiempo (min)	755	563	547	454	451
Variación		- 25,4 %	- 27,5 %	- 39,9 %	- 40,3 %
MORTERO	MR-201	MEA-201	MEB-201	MEC-201	MED-201
Tiempo (min)	258	263	248	250	213
Variación		+ 1,9 %	- 3,9 %	- 3,1	- 17,4 %
MORTERO	MR-202	MEA-202	MEB-202	MEC-202	MED-202
Tiempo (min)	303	299	302	310	276
Variación		- 1,3 %	- 0,3 %	+ 2,3 %	- 8,9 %

Tabla 6.8 Tiempo de utilización o de trabajabilidad de los morteros

El tiempo de utilización o de trabajabilidad de los morteros sin aditivos disminuye en función del grado de sustitución del árido natural por árido siderúrgico, alcanzando un tiempo mínimo el mortero tipo MED (86 min).

La Tabla 6.9 refleja un estudio transversal de los morteros de cada familia de estudio en función del aditivo empleado.

Comparativo tiempo de utilización (MR)		
	Tiempo (min)	Variación respecto MR
MR	310	
MR-C22	755	+ 143,5 %
MR-201	258	- 16,8 %
MR-202	303	- 2,3 %

Comparativo tiempo de utilización (MEA)		
	Tiempo (min)	Variación respecto MEA
MEA	243	
MEA-C22	563	+ 131,7 %
MEA-201	263	+ 8,2 %
MEA-202	299	+ 23,0 %

Comparativo tiempo de utilización (MEB)		
	Tiempo (min)	Variación respecto MEB
MEB	221	
MEB-C22	547	+ 147,5 %
MEB-201	248	+ 12,2 %
MEB-202	302	+ 36,7 %

Comparativo tiempo de utilización (MEC)		
	Tiempo (min)	Variación respecto MEC
MEC	185	
MEC-C22	454	+ 145,4 %
MEC-201	250	+ 35,1 %
MEC-202	310	+ 67,6 %

Comparativo tiempo de utilización (MED)		
	Tiempo (min)	Variación respecto MED
MED	86	
MED-C22	451	+ 424,4 %
MED-201	213	+ 147,7 %
MED-202	276	+ 220,9 %

Tabla 6.9 Comparativa tiempo de utilización o trabajabilidad

Los morteros fabricados únicamente con árido siderúrgico presentan un tiempo de utilización menor en cada serie de estudio. El rozamiento de los áridos de escoria negra y la eliminación total del filler calizo por escoria blanca, provocan masas con un fraguado más rápido que las mezclas correspondientes dentro de la misma familia de estudio.

Estos datos se pueden justificar debido al comportamiento hidráulico de la escoria blanca descrito en la bibliografía^{26,90}.

En los Gráfico 6.4 al Gráfico 6.7 puede verse que la tendencia en el tiempo de utilización de los morteros fabricados sin aditivos sigue un fraguado lineal, mientras que con el empleo de aditivos el fraguado se produce a una velocidad más lenta en las primeras horas, siguiendo con posterioridad una tendencia exponencial.

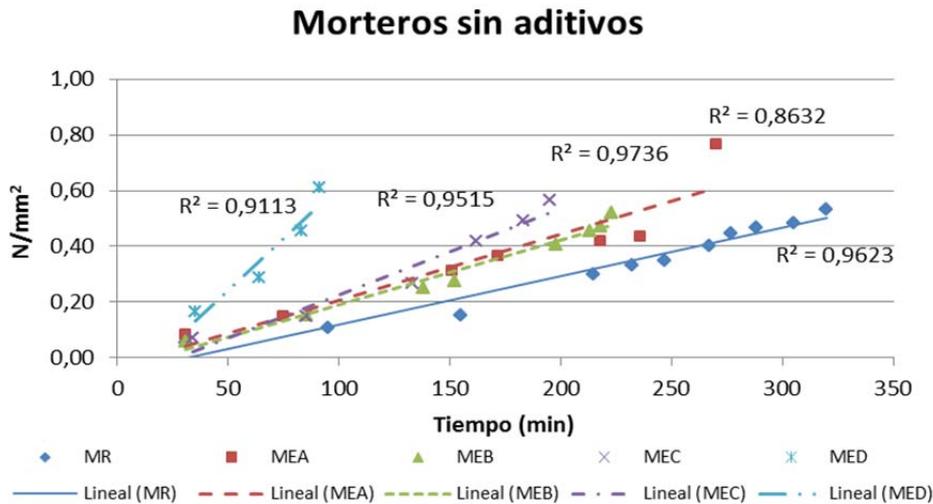


Gráfico 6.4 Tiempo de utilización morteros sin aditivos

El aditivo con el que más incrementa el periodo de utilización es el retenedor de agua Cimsil C22, aumentando 2,5 veces respecto a su análogo sin aditivos.

La primera etapa de fraguado del mortero dosificado con C22, hasta aproximadamente los 200-250 min, mantiene una tendencia horizontal, según se aprecia en el Gráfico 6.5, debido a la presencia del aditivo retenedor de agua. Este aditivo provoca un efecto similar a los retardadores de fraguado, inhibiendo el mismo en las primeras edades del mortero.

A partir de ese momento el fraguado de los morteros incrementa de manera exponencial. Con este tipo de aditivo la naturaleza del árido es determinante, pues los morteros con escoria tienen un periodo de utilización de 451 min, mientras que en los elaborados con árido natural es de 755 min.

Una consecuencia directa del empleo de este aditivo se constata en que las probetas elaboradas con él no se puedan desmoldar a las 24 h de amasado, debiendo esperar al menos 48 h.

²⁶ Rodríguez Sáiz, A. (2008). "Fabricación de morteros de albañilería con escoria blanca de horno cuchara y su utilización en construcción" Tesis doctoral, Universidad de Burgos.

⁹⁰ Papayianni, I. and E. Anastasiou (2012). "Effect of granulometry on cementitious properties of ladle furnace slag." *Cement & Concrete Composites* 34(3): p.400-407.

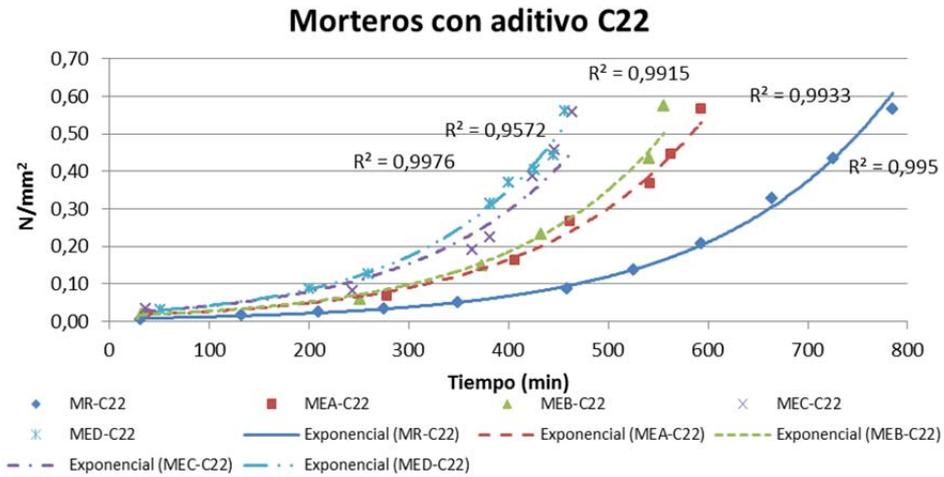


Gráfico 6.5 Tiempo de utilización morteros con Cimsil C22

Cuando las mezclas incorporan aditivo aireante- plastificante PM 202, se observa que, al igual que con el aditivo C22, el fraguado del mortero sigue una tendencia exponencial. Sin embargo, el tiempo de utilización es muy similar en todas las familias, independientemente del árido empleado, por lo que la naturaleza del árido no es determinante cuando se emplea PM202.

El periodo de trabajabilidad de estos morteros es muy similar al alcanzado por el mortero de referencia MR, alrededor de los 300 min.

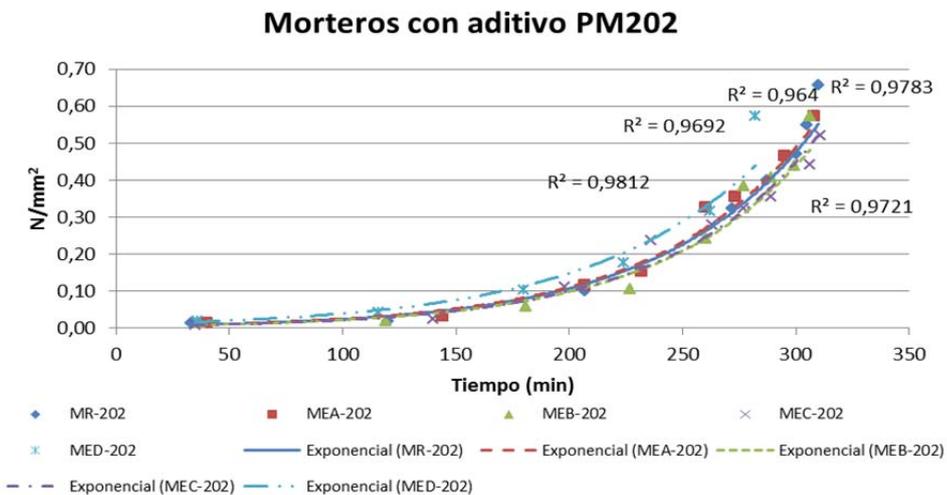


Gráfico 6.6 Tiempo de utilización morteros con PM 202

Cuando el aditivo dosificado es PM201, vuelve a observarse la tendencia exponencial en el fraguado del mortero (Gráfico 6.7). Las características del árido empleado influyen en el tiempo de utilización, pero no de manera tan pronunciada como al no utilizar aditivos o dosificar en las mezclas el aditivo C22.

El tiempo abierto de las mezclas elaboradas con PM 201 está comprendido en el intervalo de los 200-250 min.

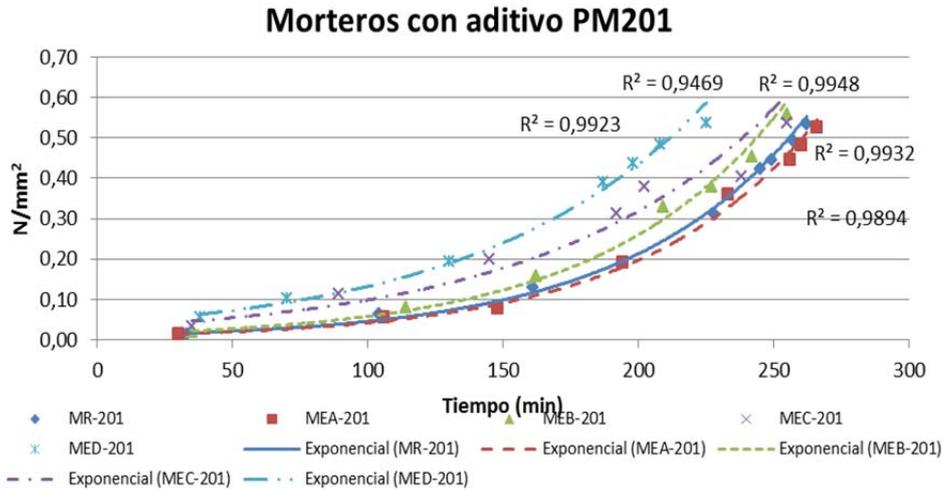


Gráfico 6.7 Tiempo de utilización morteros con PM201

6.2.5. Retención de agua del mortero fresco

El tiempo de utilización o trabajabilidad de los morteros depende de la capacidad de retención de agua.

La retención de agua se haya íntimamente relacionada con la superficie específica de las partículas de árido fino, así como del conglomerante y, en general, con la viscosidad de la pasta. Un mortero tiende a conservar el agua precisa para hidratar la superficie de las partículas del conglomerante y árido, así como las burbujas del aire ocluido que contiene. El agua que tenga en exceso la cederá fácilmente por succión del soporte sobre el que se aplica⁹⁸.

La capacidad de retención de agua en estado fresco de los morteros amasados se ha realizado según el método recogido en la norma experimental UNE 83-816-93, y los resultados quedan reflejados en la Tabla 6.10.

Los valores de retención de agua obtenidos en los morteros sin aditivos son los esperados, pues ya durante la preparación de estas mezclas se podía observar una excesiva exudación del agua de amasado, comprobando a simple vista la separación física del árido y del cemento.

Es probable que este comportamiento se justifique porque en los morteros con escoria se generen tensiones superficiales que impidan que el agua se mantenga adherida a su superficie.

⁹⁸ Rodríguez-Mora, O. (2003). "Morteros: guía general", AFAM, Asociación Nacional de Fabricantes de Mortero.

Retención de agua de los morteros					
MORTERO	MR	MEA	MEB	MEC	MED
%	66,45	67,40	66,40	67,23	67,04
Variación		+ 1,4 %	-0,1 %	+ 1,2%	+ 0,9%
MORTERO	MR-C22	MEA-C22	MEB-C22	MEC-C22	MED-C22
%	88,94	85,92	86,05	86,05	88,42
Variación		- 3,4 %	-3,2 %	- 3,2 %	- 0,6 %
MORTERO	MR-201	MEA-201	MEB-201	MEC-201	MED-201
%	78,77	78,03	80,79	79,65	79,02
Variación		- 0,9 %	+ 2,6 %	+ 1,1 %	+ 0,3 %
MORTERO	MR-202	MEA-202	MEB-202	MEC-202	MED-202
%	80,67	81,95	80,65	79,69	79,72
Variación		+ 1,6 %	+ 0,0 %	- 1,2 %	- 1,2 %

Tabla 6.10 Retención de agua de los morteros

El estudio transversal de los morteros puede verse en la Tabla 6.11.

Como era de esperar, las mezclas que más agua de amasado retienen son aquellas que incorporan aditivo retenedor de agua C22, aun estando dosificadas con más relación agua/cemento que las que incorporan PM201 y PM202.

Al emplear Cimsil C22 el valor de retención de agua alcanza el 85-90%, un 30 % superior que los morteros análogos sin aditivos.

Las familias que emplean aditivos plastificantes-aireantes, PM201 y PM202, también aumentan la capacidad de retención de agua de los morteros, registrando valores próximos al 80%, valor medio empleado por los fabricantes de mortero.

Comparativo retención de agua (MR)		
	%	Variación respecto MR
MR	66,45	
MR-C22	88,94	+ 33,8 %
MR-201	78,77	+ 18,5 %
MR-202	80,67	+ 21,4 %

Comparativo retención de agua (MEA)		
	%	Variación respecto MEA
MEA	67,40	
MEA-C22	85,92	+ 27,5 %
MEA-201	78,03	+ 15,8 %
MEA-202	81,95	+ 21,6 %

Comparativo retención de agua (MEB)			Comparativo retención de agua (MEC)		
	%	Variación respecto MEB		%	Variación respecto MEC
MEB	66,40		MEC	67,23	
MEB-C22	86,05	+ 29,6 %	MEC-C22	86,05	+ 28,0 %
MEB-201	80,79	+ 21,7 %	MEC-201	79,65	+ 18,5 %
MEB-202	80,65	+ 21,5 %	MEC-202	79,69	+ 18,5 %

Comparativo retención de agua (MED)		
	%	Variación respecto MED
MED	67,04	
MED-C22	88,42	+ 31,9 %
MED-201	79,02	+ 17,9 %
MED-202	79,72	+ 18,9 %

Tabla 6.11 Comparativo retención de agua de los morteros

El Gráfico 6.8 recoge la evolución de la retención de agua de los morteros objeto de estudio.

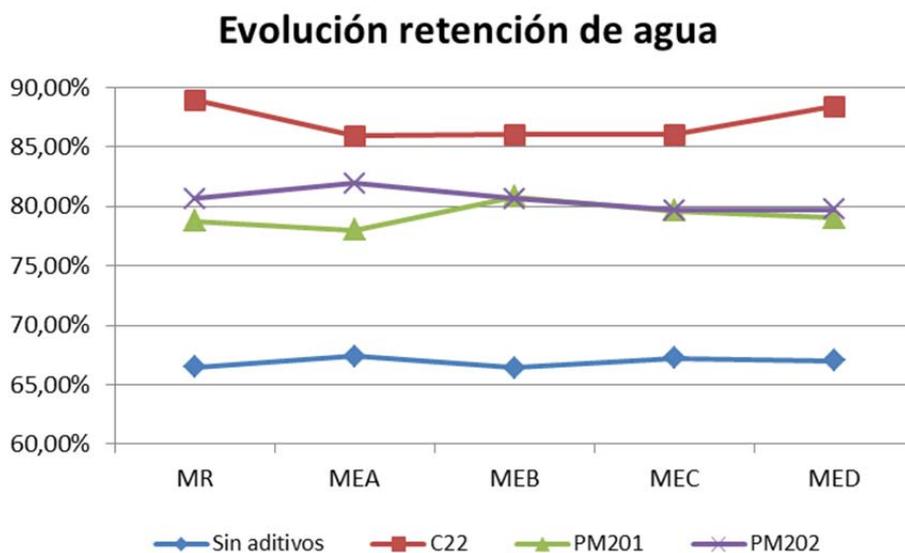


Gráfico 6.8 Evolución Retención de agua de los morteros

6.3. CARACTERIZACIÓN DEL MORTERO ENDURECIDO

6.3.1. Densidad aparente seca del mortero endurecido

La densidad del mortero depende de las propiedades y naturaleza de los materiales que lo conforman, como el tipo de conglomerante utilizado, la naturaleza del árido, su granulometría o los aditivos añadidos para modificar su comportamiento.

El agua de dosificación es un factor determinante en la densidad de un mortero, ya que un exceso de agua en la dosificación inferirá un mayor volumen de poros en la masa del mortero, como consecuencia de su evaporación durante el proceso de fraguado y endurecimiento. Una mayor porosidad da lugar a morteros de menor densidad.

La naturaleza de los áridos también influye en la densidad del mortero endurecido, ya que áridos muy compactos darán lugar a morteros de mayor densidad.

Los valores de densidad aparente en seco del mortero endurecido determinados según el procedimiento establecido en la norma UNE EN 1015-10, están recogidos en la Tabla 6.12.

Densidad aparente seca del mortero endurecido					
MORTERO	MR	MEA	MEB	MEC	MED
Densidad kg/m ³	2.005	2.078	2.143	2.240	2.303
Variación		+ 3,6 %	+ 6,9 %	+11,7 %	+ 14,9 %
MORTERO	MR-C22	MEA-C22	MEB-C22	MEC-C22	MED-C22
Densidad kg/m ³	1.694	1.768	1.847	1.864	1.982
Variación		+ 4,3 %	+ 9,0 %	+ 10,0 %	+ 17 %
MORTERO	MR-201	MEA-201	MEB-201	MEC-201	MED-201
Densidad kg/m ³	1.745	1.817	1.882	1.978	2.080
Variación		+ 4,1 %	+ 7,8 %	+ 13,3 %	+ 19,2 %
MORTERO	MR-202	MEA-202	MEB-202	MEC-202	MED-202
Densidad kg/m ³	1.556	1.603	1.686	1.769	1.834
Variación		+ 3,0 %	+8,4 %	+ 13,7 %	+17,8 %

Tabla 6.12 Densidad aparente en seco del mortero endurecido

Desde un punto de vista físico, los morteros incrementan su peso según van incorporando la escoria a su composición, circunstancia que se justifica por la mayor densidad del residuo siderúrgico frente a la arena silícica utilizada en el estudio.

La Tabla 6.13 recoge el análisis comparativo de la disminución del valor de la densidad aparente seca del mortero endurecido en función del aditivo empleado en las mezclas.

Comparativo densidad aparente seca mortero endurecido (MR)			Comparativo densidad aparente seca mortero endurecido (MEA)		
	kg/m ³	Variación respecto MR		kg/m ³	Variación respecto MEA
MR	2.005		MEA	2.078	
MR-C22	1.694	- 15,5 %	MEA-C22	1.768	- 14,9 %
MR-201	1.745	- 13,0 %	MEA-201	1.817	- 12,6 %
MR-202	1.556	- 22,4 %	MEA-202	1.603	- 22,9 %

Comparativo densidad aparente seca mortero endurecido (MEB)			Comparativo densidad aparente seca mortero endurecido (MEC)		
	kg/m ³	Variación respecto MEB		kg/m ³	Variación respecto MEC
MEB	2.143		MEC	2.240	
MEB-C22	1.847	- 13,8 %	MEC-C22	1.864	- 16,8 %
MEB-201	1.882	- 12,2 %	MEC-201	1.978	- 11,7 %
MEB-202	1.686	- 21,3 %	MEC-202	1.769	- 21,0 %

Comparativo densidad aparente seca mortero endurecido (MED)		
	kg/m ³	Variación respecto MED
MED	2.303	
MED-C22	1.982	- 14,0 %
MED-201	2.080	- 9,7 %
MED-202	1.834	- 20,4 %

Tabla 6.13 Comparativo densidad aparente seca mortero endurecido

Cuando se emplea aditivo retenedor de agua C22 (recordemos que el aire ocluido de las mezclas varía del 20,5% el MR-C22 hasta el 24% el mortero MED-C22) el valor de la densidad disminuye aproximadamente un 15 % respecto a su mortero análogo sin aditivo.

Si se utiliza el aditivo PM201, donde el contenido de aire ocluido de los morteros varía desde el 21% del MR-201 hasta el 22% del MED-201, la densidad se reduce una media del 11,80%.

Por último, cuando el aditivo que se emplea es aireante-plastificante PM202 (cuyo contenido de aire ocluido oscila entre 31% MR-202 y el 28% MED-202), la densidad decrece del orden del 21,60%.

En el Gráfico 6.9 puede observarse el aumento progresivo de la densidad en función del grado de sustitución de árido natural por árido siderúrgico en cada familia de estudio, así como la disminución del valor de la densidad cuando las mezclas incluyen aditivos, donde el descenso más acusado se produce cuando se emplea el aditivo PM 202.

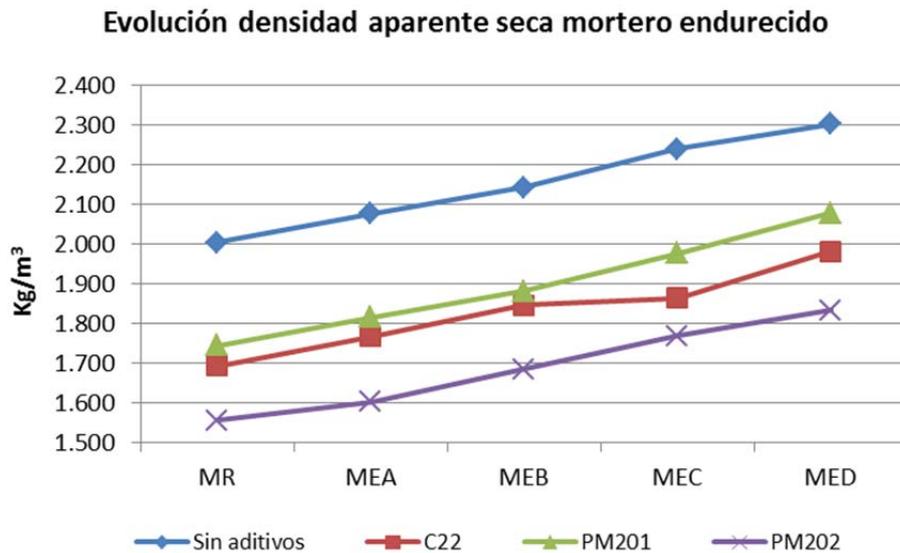


Gráfico 6.9 Evolución densidad aparente seca mortero endurecido

Se puede concluir que en el estudio de la densidad aparente seca del mortero endurecido es determinante tanto el árido empleado en las mezclas como el aditivo dosificado.

6.3.2. Resistencias a flexión y compresión

El mortero como material tiene la función de unir otros materiales entre sí o a un soporte o a una base y garantizar la durabilidad de la unión en el tiempo.

Para garantizar la estabilidad del conjunto, el mortero debe ser capaz de soportar los esfuerzos mecánicos a los que está sometida la unidad de obra de la forma parte, por lo que deberá resistir iguales sollicitaciones mecánicas a compresión, flexión o tracción que las fábricas en las que está dispuesto^{98,102,117}.

La resistencia a compresión es generalmente el criterio más empleado para identificar y prescribir un mortero¹¹⁷.

El método de análisis para determinar la resistencia mecánica de los morteros se lleva a cabo según el procedimiento descrito en la norma UNE-EN 1015-11.

En la Tabla 6.14 hasta la Tabla 6.33 se recogen los valores correspondientes de los resultados unitarios, tanto a flexión como a compresión, de cada una de las amasadas, así como las resistencias a flexión y compresión a 7, 28 y 90 días de curado.

Resistencias mecánicas mortero MR						
Ensayo	7 días	Media	28 días	Media	90 días	Media
Flexión N/mm ²	3,63	3,48	3,89	3,82	4,43	4,36
	3,54		3,82		4,45	
	3,28		3,75		4,20	
Compresión N/mm ²	12,09	12,59	14,66	15,11	16,69	16,47
	12,96		15,12		16,59	
	12,75		15,61		15,91	
	12,69		15,51		17,10	
	12,13		14,75		16,06	
	12,93		15,03		16,44	

Tabla 6.14 Resistencias mecánicas flexión y compresión MR

Resistencias mecánicas mortero MEA						
Ensayo	7 días	Media	28 días	Media	90 días	Media
Flexión N/mm ²	3,35	3,52	4,95	4,74	5,13	4,95
	3,54		4,48		4,88	
	3,68		4,80		4,83	
Compresión N/mm ²	12,93	12,46	18,21	17,60	19,14	20,42
	12,28		17,44		20,46	
	12,18		17,86		20,03	
	12,41		18,07		21,09	
	12,51		17,91		21,21	
	12,48		16,13		20,59	

Tabla 6.15 Resistencias mecánicas flexión y compresión MEA

⁹⁸ Rodríguez-Mora, O. (2003). "Morteros: guía general", AFAM, Asociación Nacional de Fabricantes de Mortero.

¹⁰² Valdehita Rosello, M. T. (1976). "Morteros de cemento para albañilería". Madrid, Patronato Juan de la Cierva de Investigación Técnica. Instituto Eduardo Torroja de la Construcción y del Cemento. Consejo Superior de Investigaciones Científicas.

¹¹⁷ AFAM (2004). "Morteros para fábricas". Madrid, Asociación Nacional de Fabricantes de Mortero.

Caracterización de los morteros fabricados con árido siderúrgico

Resistencias mecánicas mortero MEB						
Ensayo	7 días	Media	28 días	Media	90 días	Media
Flexión N/mm ²	3,98	3,88	4,90	4,95	4,57	5,07
	3,80		4,88		5,27	
	3,84		5,09		5,37	
Compresión N/mm ²	11,94	11,79	17,78	17,66	19,58	20,53
	11,81		17,81		20,36	
	11,96		16,69		20,94	
	11,28		17,76		20,21	
	12,18		17,64		20,61	
	11,61		18,29		21,46	

Tabla 6.16 Resistencias mecánicas flexión y compresión MEB

Resistencias mecánicas mortero MEC						
Ensayo	7 días	Media	28 días	Media	90 días	Media
Flexión N/mm ²	3,59	3,66	5,09	4,95	5,02	5,04
	3,61		4,80		5,06	
	3,77		4,97		5,04	
Compresión N/mm ²	12,09	11,94	16,95	17,66	23,24	22,04
	12,33		18,14		21,11	
	11,78		17,33		21,06	
	12,13		18,10		21,46	
	10,80		17,88		23,01	
	12,48		17,56		22,34	

Tabla 6.17 Resistencias mecánicas flexión y compresión MEC

Resistencias mecánicas mortero MED						
Ensayo	7 días	Media	28 días	Media	90 días	Media
Flexión N/mm ²	4,10	3,80	5,02	5,09	5,20	5,27
	3,54		4,95		5,34	
	3,77		5,30		5,27	
Compresión N/mm ²	12,81	13,29	17,65	17,84	21,82	22,15
	13,38		17,52		23,31	
	13,22		18,04		22,29	
	13,52		18,09		21,36	
	13,21		17,68		22,42	
	13,60		18,09		21,69	

Tabla 6.18 Resistencias mecánicas flexión y compresión MED

De los ensayos mecánicos realizados, puede comprobarse que los morteros dosificados sin aditivos desarrollan a los 7 días resistencias equivalentes al 75% de las que se alcanzan en el periodo normalizado de referencia de 28 días, incrementándose ligeramente a los 90 días las resistencias a flexión, y algo más las de compresión.

La utilización de un cemento Portland CEM I puede explicar este comportamiento, ya que con este tipo de cemento se consiguen desarrollar altas resistencias mecánicas en las primeras edades (7 días), registrándose pocas variaciones a los 28 días, referencia de tiempo para los valores característicos normalizados.

De la misma forma, cuando las mezclas incorporan aditivo retenedor de agua Cimsil C22 las resistencias a los 7 días, aunque inferiores que las de las mezclas sin aditivos, consiguen alcanzar valores del orden del 75% de las resistencias normalizadas a los 28 días, tanto a flexión como a compresión.

Resistencias mecánicas mortero MR-C22						
Ensayo	7 días	Media	28 días	Media	90 días	Media
Flexión N/mm ²	2,11	1,99	2,44	2,47	5,67	4,92
	1,88		2,51		4,17	
	1,99		2,46		4,92	
Compresión N/mm ²	7,88	7,84	9,84	9,70	11,21	11,99
	7,59		9,01		12,08	
	7,93		10,74		11,98	
	7,96		9,20		12,68	
	7,81		9,66		11,94	
	7,86		9,74		12,04	

Tabla 6.19 Resistencias mecánicas flexión y compresión MR-C22

Resistencias mecánicas mortero MEA-C22						
Ensayo	7 días	Media	28 días	Media	90 días	Media
Flexión N/mm ²	2,02	2,12	2,81	2,71	5,20	4,69
	2,23		2,60		4,17	
	2,11		2,72		4,69	
Compresión N/mm ²	7,96	7,35	10,19	10,02	11,55	11,43
	7,09		9,09		12,28	
	8,20		10,83		11,48	
	6,13		9,97		10,43	
	7,28		9,99		11,38	
	7,41		10,06		11,49	

Tabla 6.20 Resistencias mecánicas flexión y compresión MEA-C22

Caracterización de los morteros fabricados con árido siderúrgico

Resistencias mecánicas mortero MEB-C22						
Ensayo	7 días	Media	28 días	Media	90 días	Media
Flexión N/mm ²	1,71	1,84	2,88	2,71	3,84	3,96
	1,97		2,53		4,08	
	1,83		2,72		3,96	
Compresión N/mm ²	7,65	7,45	11,47	10,60	12,11	12,27
	7,44		10,81		11,61	
	7,74		9,88		12,87	
	6,98		10,23		12,49	
	7,39		10,57		12,19	
	7,51		10,63		12,32	

Tabla 6.21 Resistencias mecánicas flexión y compresión MEB-C22

Resistencias mecánicas mortero MEC-C22						
Ensayo	7 días	Media	28 días	Media	90 días	Media
Flexión N/mm ²	1,76	1,98	2,74	2,80	4,69	4,32
	2,20		2,86		3,96	
	1,99		2,81		4,31	
Compresión N/mm ²	7,92	7,78	10,28	10,35	12,56	12,22
	8,07		10,64		12,07	
	7,36		10,19		12,30	
	7,77		10,26		11,95	
	7,74		10,33		12,19	
	7,83		10,38		12,25	

Tabla 6.22 Resistencias mecánicas flexión y compresión MEC-C22

Resistencias mecánicas mortero MED-C22						
Ensayo	7 días	Media	28 días	Media	90 días	Media
Flexión N/mm ²	2,53	2,23	2,70	2,79	4,20	4,14
	1,95		2,88		4,08	
	2,23		2,79		4,15	
Compresión N/mm ²	8,01	7,94	10,71	10,62	12,03	12,29
	8,73		10,71		12,12	
	7,45		10,51		12,54	
	7,57		10,55		12,49	
	7,91		10,56		12,28	
	7,97		10,69		12,31	

Tabla 6.23 Resistencias mecánicas flexión y compresión MED-C22

Resistencias mecánicas mortero MR-201						
Ensayo	7 días	Media	28 días	Media	90 días	Media
Flexión N/mm ²	2,32	2,37	3,14	3,10	4,20	3,84
	2,51		3,16		3,38	
	2,27		3,00		3,94	
Compresión N/mm ²	8,51	8,28	10,43	10,61	13,50	12,94
	7,99		11,20		12,86	
	7,96		10,32		12,94	
	8,34		10,47		13,08	
	8,90		10,67		11,81	
	7,98		10,60		13,49	

Tabla 6.24 Resistencias mecánicas flexión y compresión MR-201

Resistencias mecánicas mortero MEA-201						
Ensayo	7 días	Media	28 días	Media	90 días	Media
Flexión N/mm ²	2,46	2,45	3,02	3,06	3,59	3,50
	2,46		3,14		3,35	
	2,44		3,02		3,56	
Compresión N/mm ²	8,60	8,21	11,10	10,94	14,01	13,76
	8,33		11,11		13,60	
	7,75		10,91		12,41	
	7,95		11,22		14,18	
	8,23		10,58		13,71	
	8,39		10,76		14,63	

Tabla 6.25 Resistencias mecánicas flexión y compresión MEA-201

Resistencias mecánicas mortero MEB-201						
Ensayo	7 días	Media	28 días	Media	90 días	Media
Flexión N/mm ²	2,67	2,57	2,79	3,13	3,19	3,37
	2,46		3,54		3,26	
	2,58		3,07		3,66	
Compresión N/mm ²	7,86	8,08	10,12	9,80	13,21	13,27
	8,38		9,66		13,19	
	7,67		9,99		12,67	
	7,65		9,47		12,98	
	8,42		9,98		13,66	
	8,53		9,55		13,91	

Tabla 6.26 Resistencias mecánicas flexión y compresión MEB-201

Caracterización de los morteros fabricados con árido siderúrgico

Resistencias mecánicas mortero MEC-201						
Ensayo	7 días	Media	28 días	Media	90 días	Media
Flexión N/mm ²	2,18	2,30	3,19	3,23	3,30	3,24
	2,39		3,28		3,14	
	2,34		3,21		3,28	
Compresión N/mm ²	8,49	8,11	10,11	10,49	14,07	13,88
	8,68		10,30		13,03	
	7,91		10,82		13,88	
	8,03		10,38		13,78	
	7,55		10,41		14,38	
	7,99		10,90		14,16	

Tabla 6.27 Resistencias mecánicas flexión y compresión MEC-201

Resistencias mecánicas mortero MED-201						
Ensayo	7 días	Media	28 días	Media	90 días	Media
Flexión N/mm ²	2,63	2,42	3,82	3,63	3,61	3,74
	2,32		3,54		3,87	
	2,32		3,52		3,75	
Compresión N/mm ²	9,25	9,25	12,48	11,47	14,46	14,82
	9,34		11,60		15,41	
	9,10		11,29		13,72	
	9,39		11,34		15,86	
	9,30		11,36		14,11	
	9,15		10,74		15,34	

Tabla 6.28 Resistencias mecánicas flexión y compresión MED-201

Cuando el aditivo empleado en las mezclas es aireante-plasticante PM201, las resistencias alcanzadas son inferiores a las de los morteros sin aditivos, pero similares a las obtenidas con el aditivo retenedor C22. De igual forma, a los 7 días se alcanza el 75% de los valores conseguidos a los 28 días. A los 90 días las resistencias a flexión se incrementan en un 10%, siendo las de compresión superiores en un 29% a las del valor medio.

Resistencias mecánicas mortero MR-202						
Ensayo	7 días	Media	28 días	Media	90 días	Media
Flexión N/mm ²	1,62	1,70	2,18	2,12	2,70	2,43
	1,64		2,09		2,20	
	1,83		2,09		2,39	
Compresión N/mm ²	4,53	4,45	5,90	5,66	7,67	7,41
	4,26		5,19		7,19	
	4,64		5,59		7,41	
	4,43		5,40		7,37	
	3,81		5,77		7,78	
	5,01		6,11		7,08	

Tabla 6.29 Resistencias mecánicas flexión y compresión MR-202

Resistencias mecánicas mortero MEA-202						
Ensayo	7 días	Media	28 días	Media	90 días	Media
Flexión N/mm ²	1,64	1,61	1,71	1,80	2,46	2,26
	1,57		1,95		2,06	
	1,62		1,76		2,25	
Compresión N/mm ²	3,67	3,78	5,98	5,24	6,67	6,50
	4,13		5,46		6,61	
	3,18		5,20		6,56	
	3,93		5,11		6,01	
	3,59		4,93		6,63	
	4,21		4,80		6,52	

Tabla 6.30 Resistencias mecánicas flexión y compresión MEA-202

Resistencias mecánicas mortero MEB-202						
Ensayo	7 días	Media	28 días	Media	90 días	Media
Flexión N/mm ²	1,41	1,55	1,76	1,89	2,16	2,00
	1,85		1,85		1,78	
	1,41		2,06		2,06	
Compresión N/mm ²	3,48	3,54	5,18	5,05	4,88	5,75
	3,99		4,93		5,83	
	3,46		4,66		5,90	
	3,90		5,36		5,71	
	3,01		4,71		6,03	
	3,43		5,48		6,13	

Tabla 6.31 Resistencias mecánicas flexión y compresión MEB-202

Caracterización de los morteros fabricados con árido siderúrgico

Resistencias mecánicas mortero MEC-202						
Ensayo	7 días	Media	28 días	Media	90 días	Media
Flexión N/mm ²	1,38	1,40	1,90	1,88	2,11	2,12
	1,41		2,02		1,95	
	1,41		1,71		2,30	
Compresión N/mm ²	3,24	3,69	4,52	5,12	6,69	5,96
	3,81		4,96		5,49	
	3,81		4,97		5,96	
	4,03		5,14		5,74	
	3,38		5,62		5,59	
	3,83		5,51		6,28	

Tabla 6.32 Resistencias mecánicas flexión y compresión MEC-202

Resistencias mecánicas mortero MED-202						
Ensayo	7 días	Media	28 días	Media	90 días	Media
Flexión N/mm ²	1,52	1,46	1,76	1,83	2,09	2,04
	1,38		1,95		1,99	
	1,48		1,78		2,04	
Compresión N/mm ²	3,50	3,76	5,24	5,04	6,43	6,02
	3,63		5,12		6,00	
	3,55		4,87		5,98	
	3,74		5,42		5,74	
	3,69		4,78		5,97	
	4,44		4,83		6,02	

Tabla 6.33 Resistencias mecánicas flexión y compresión MED-202

Cuando se utiliza el aditivo aireante-plastificante PM202 en las mezclas, las resistencias mecánicas de los morteros disminuyen si las comparamos con las obtenidas en los morteros dosificados sin aditivo, si bien se mantiene la tendencia de alcanzar el 75% del valor normalizado de resistencia a los 7 días. Por otra parte, a los 90 días de curado las resistencias a flexión aumentan una media del 14% y las de compresión un 20%.

En las siguientes tablas (Tabla 6.34 a Tabla 6.37) quedan reflejados de forma resumida los valores de las resistencias mecánicas de los morteros estudiados. En gráficos posteriores (Gráfico 6.10 al Gráfico 6.17) se comparan los datos obtenidos cuando se sustituye el árido natural por escorias.

En el primero de los gráficos se observa la evolución de resistencias en un mismo mortero a edades de curado de 7, 28 y 90 días, y en el segundo

se comparan las resistencias obtenidas en una fecha concreta de curado de todos los morteros.

Resistencias mecánicas morteros sin aditivos (N/mm ²)						
MORTERO	Flexión			Compresión		
	7 días	28 días	90 días	7 días	28 días	90 días
MR	3,48	3,82	4,36	12,59	15,11	16,47
MEA	3,52	4,74	4,95	12,46	17,60	20,42
MEB	3,88	4,95	5,07	11,79	17,66	20,53
MEC	3,66	4,95	5,04	11,94	17,66	22,04
MED	3,80	5,09	5,27	13,29	17,84	22,15

Tabla 6.34 Resumen resistencias morteros sin aditivos

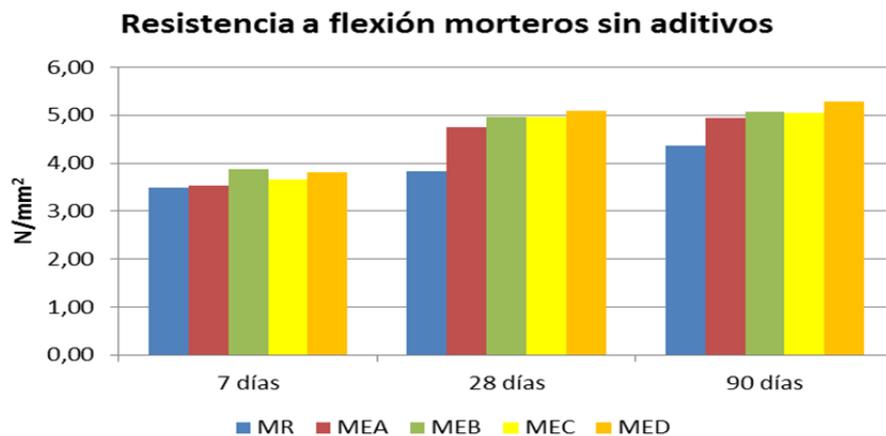
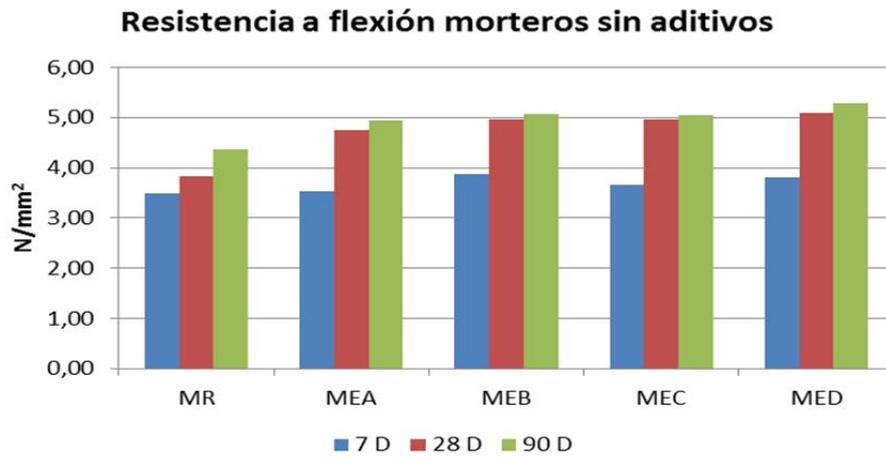


Gráfico 6.10 Resistencias a flexión morteros sin aditivos

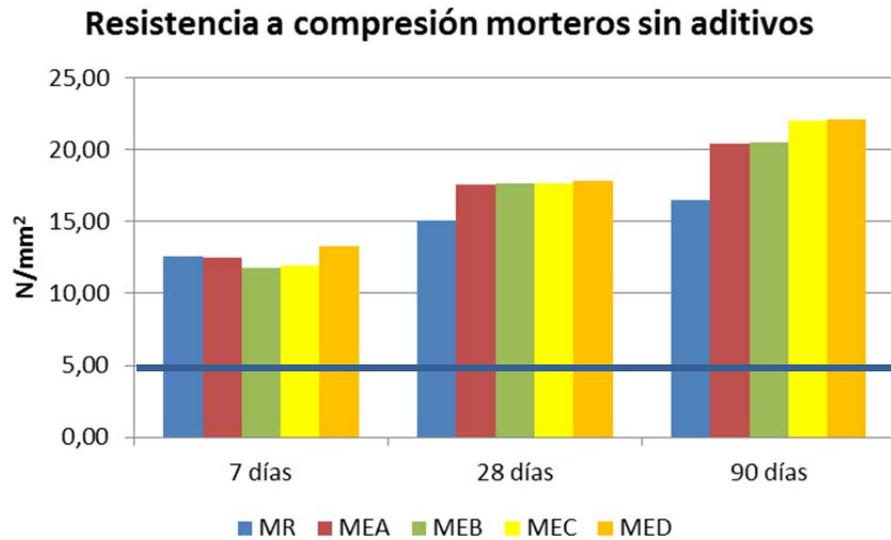
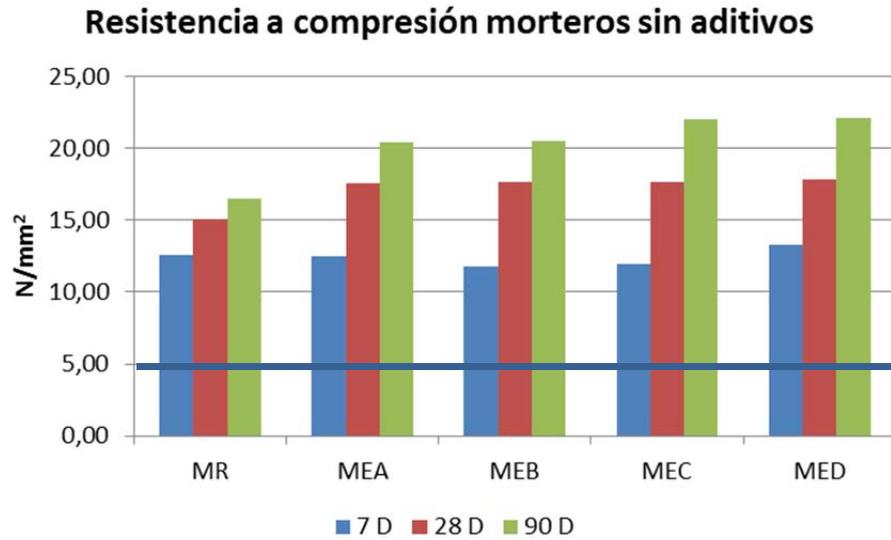


Gráfico 6.11 Resistencias a compresión morteros sin aditivos

Como puede observarse el valor de la resistencia a compresión objeto de diseño (5 N/mm^2), se alcanza a la edad de 7 días en todas las familias.

A la vista de estos datos, se puede concluir que, cuando no se emplean aditivos en las mezclas, hay una clara tendencia de aumento de las resistencias a flexión y compresión en función del grado de sustitución del árido natural por el árido siderúrgico, siendo un factor determinante en la resistencia la naturaleza del árido empleado.

Resistencias mecánicas morteros C22 (N/mm ²)						
MORTERO	Flexión			Compresión		
	7 días	28 días	90 días	7 días	28 días	90 días
MR-C22	1,99	2,47	4,92	7,84	9,70	11,99
MEA-C22	2,12	2,71	4,69	7,35	10,02	11,43
MEB-C22	1,84	2,71	3,96	7,45	10,60	12,27
MEC-C22	1,98	2,80	4,32	7,78	10,35	12,22
MED-C22	2,23	2,79	4,14	7,94	10,62	12,29

Tabla 6.35 Resumen resistencias morteros C22

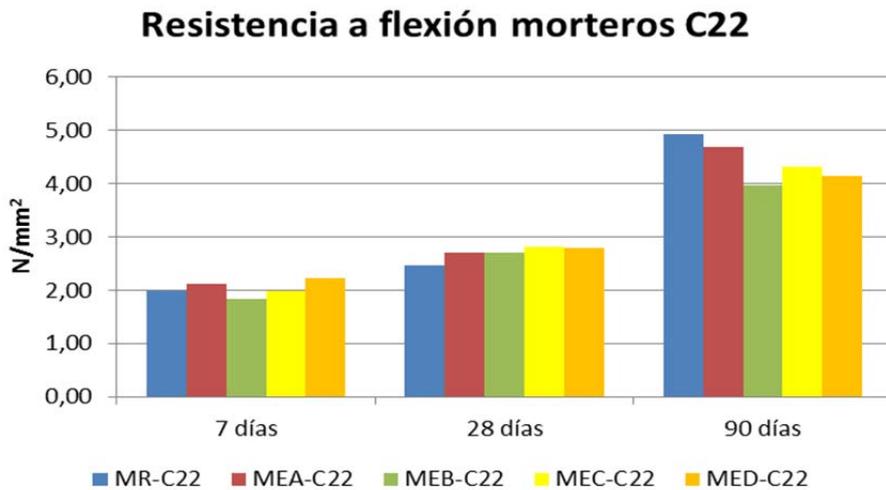
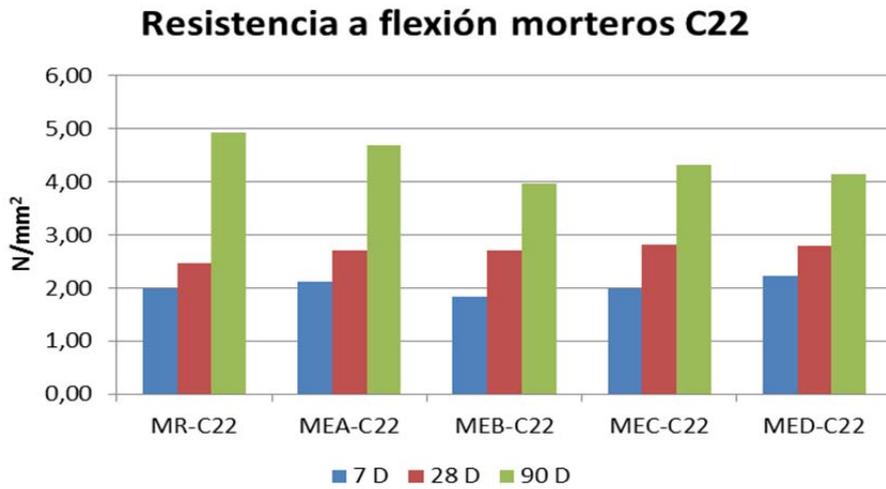


Gráfico 6.12 Resistencias a flexión morteros C22

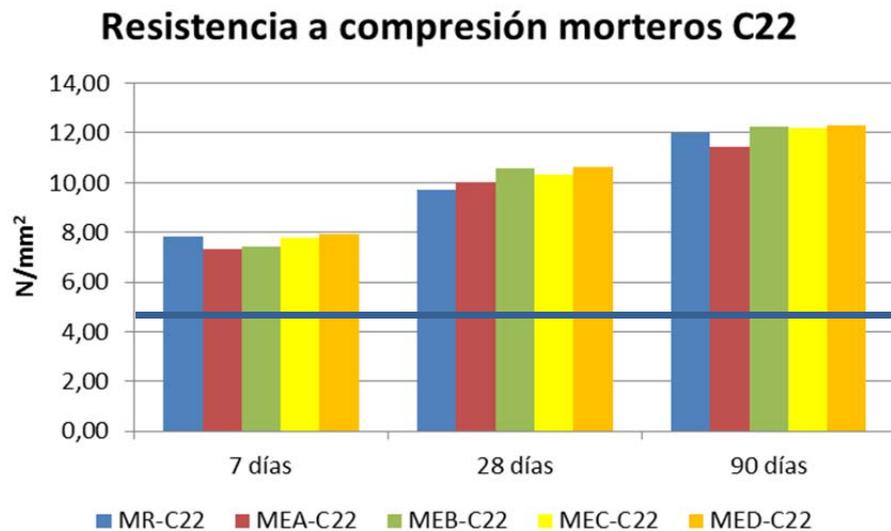
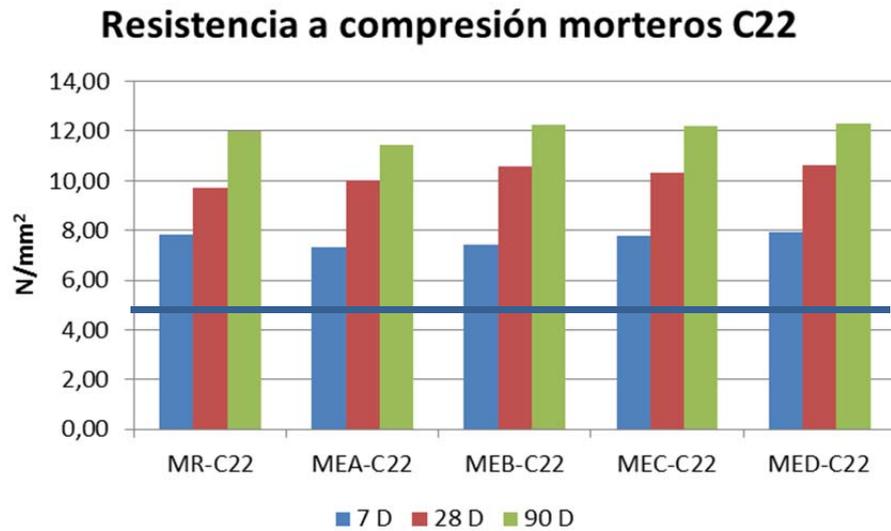


Gráfico 6.13 Resistencias a compresión morteros C22

Cuando el aditivo empleado es el retenedor de agua Cimsil C22, también se alcanzan valores superiores a 5 N/mm^2 a los 7 días de curado en todas las familias de estudio, obteniendo a los 28 días una resistencia aproximada de 10 N/mm^2 .

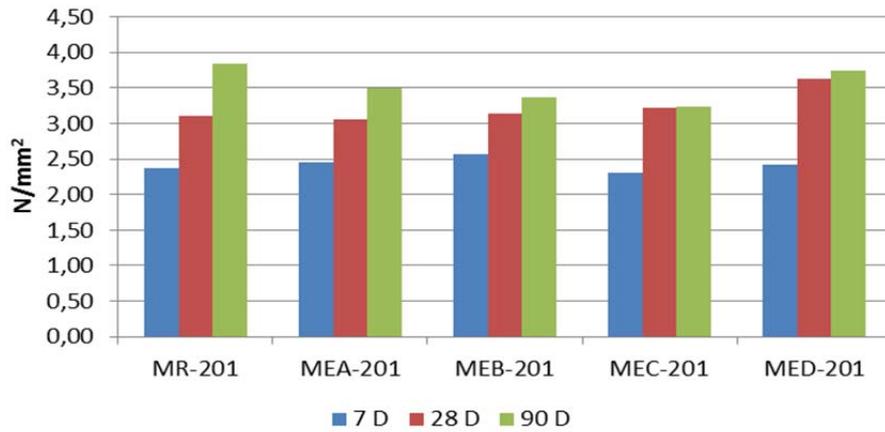
Así mismo, los morteros dosificados con árido siderúrgico tienen más resistencia a compresión que los elaborados con árido natural.

Aunque se ha estudiado que en las primeras horas el fraguado de los morteros dosificados con este aditivo es más lento, se comprueba que alcanzan resistencias óptimas a los 7 días.

Resistencias mecánicas morteros PM201 (N/mm ²)						
MORTERO	Flexión			Compresión		
	7 días	28 días	90 días	7 días	28 días	90 días
MR-201	2,37	3,10	3,84	8,28	10,61	12,94
MEA-201	2,45	3,06	3,50	8,21	10,94	13,76
MEB-201	2,57	3,13	3,37	8,08	9,80	13,27
MEC-201	2,30	3,23	3,24	8,11	10,49	13,88
MED-201	2,42	3,63	3,74	9,25	11,47	14,82

Tabla 6.36 Resumen resistencias morteros PM201

Resistencia a flexión morteros PM201



Resistencia a flexión morteros PM201

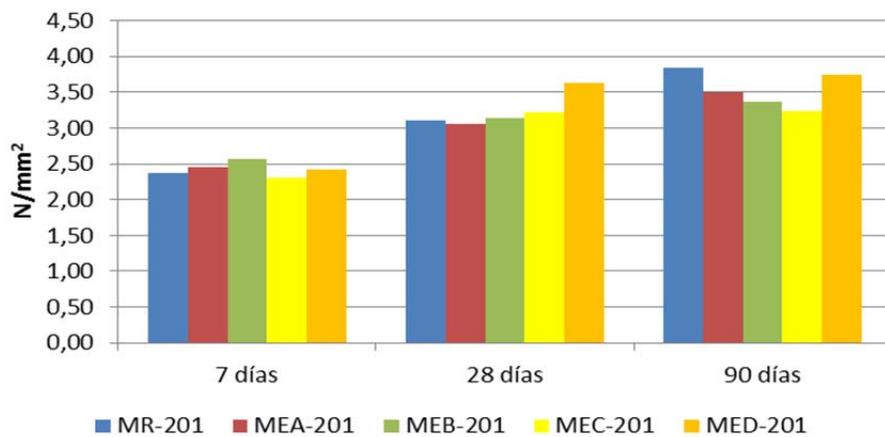


Gráfico 6.14 Resistencias a flexión morteros PM201

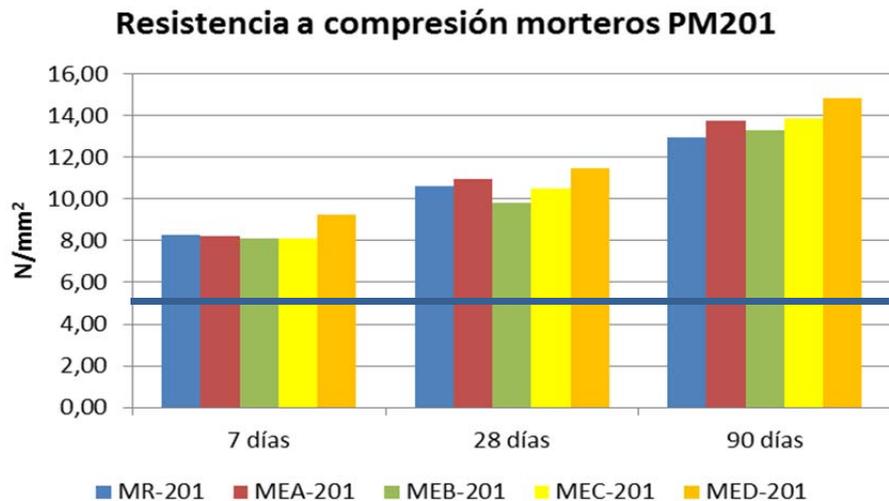
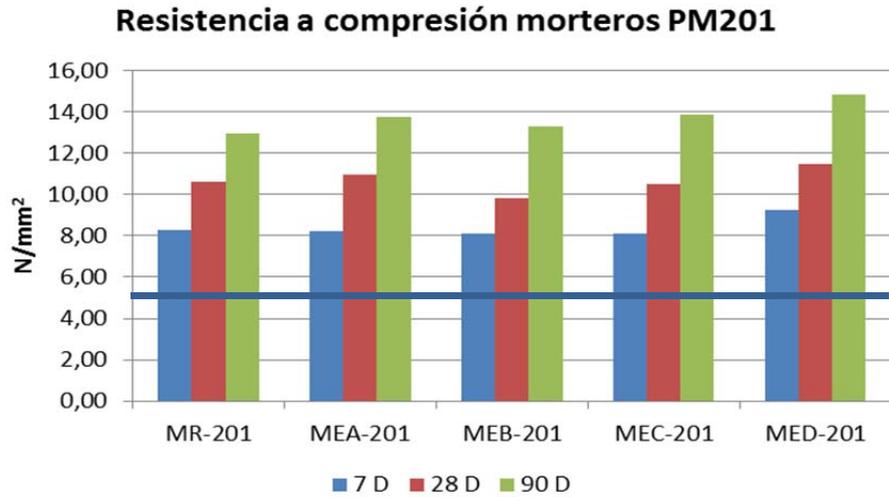


Gráfico 6.15 Resistencias a compresión morteros PM201

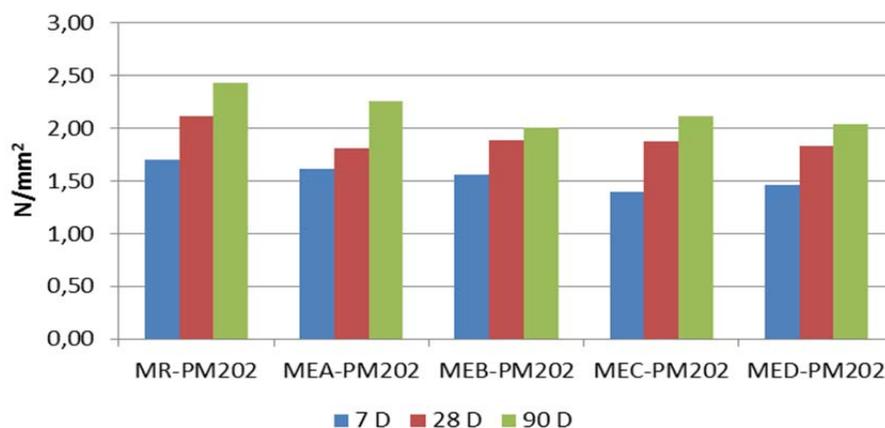
El comportamiento de los morteros dosificados con Cimsil C22 y con aireante- plastificante PM201 es muy similar en cuanto a resistencias mecánicas, pues ambos alcanzan alrededor de 10 N/mm² a los 28 de curado.

Las resistencias a compresión incrementan su valor cuando las mezclas tienen escorias, aunque este aumento no es tan pronunciado como en las mezclas sin aditivos, pudiéndose afirmar que, cuando empleamos PM201, tanto los morteros de referencia con árido natural, como los morteros con escorias, presentan un comportamiento a compresión muy similar.

Resistencias mecánicas morteros PM202 (N/mm ²)						
MORTERO	Flexión			Compresión		
	7 días	28 días	90 días	7 días	28 días	90 días
MR-202	1,70	2,12	2,43	4,45	5,66	7,41
MEA-202	1,61	1,80	2,26	3,78	5,24	6,50
MEB-202	1,55	1,89	2,00	3,54	5,05	5,75
MEC-202	1,40	1,88	2,12	3,69	5,12	5,96
MED-202	1,46	1,83	2,04	3,76	5,04	6,02

Tabla 6.37 Resumen resistencias morteros PM202

Resistencia a flexión morteros PM202



Resistencia a flexión morteros PM202

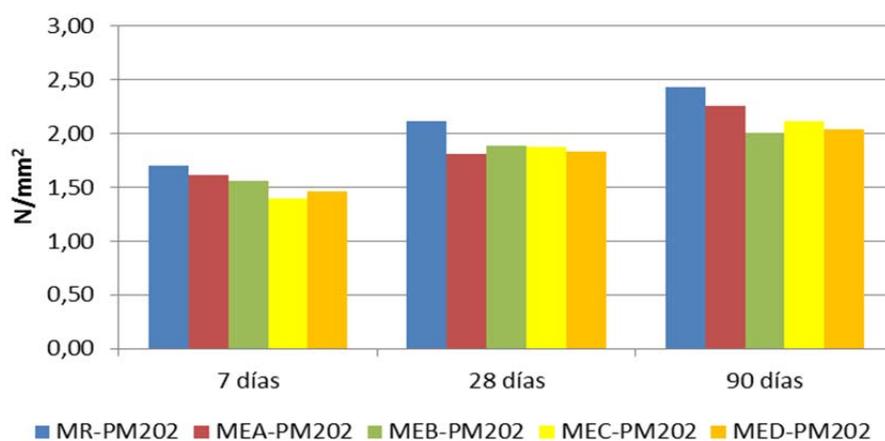


Gráfico 6.16 Resistencias a flexión morteros PM202

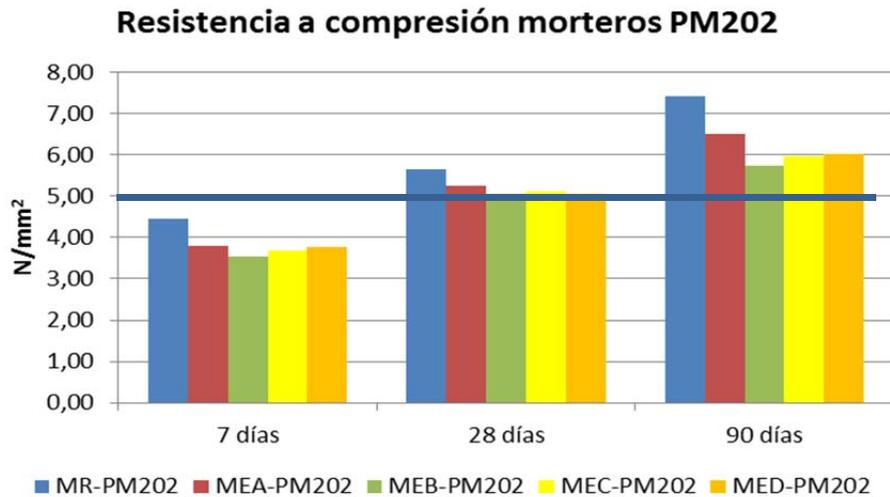
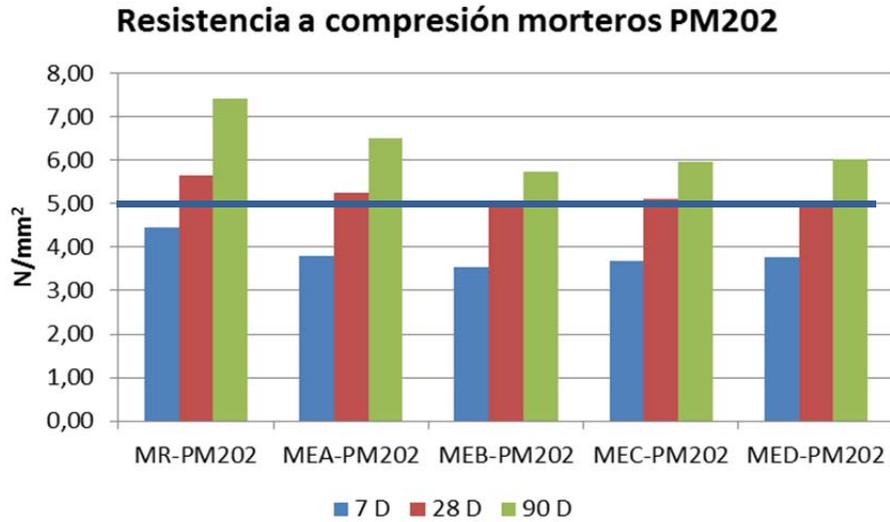


Gráfico 6.17 Resistencias a compresión morteros PM202

Los morteros elaborados con PM202 obtienen unos valores de resistencia a compresión a los 28 días muy ajustados, siendo ligeramente superiores a los 5 N/mm² objeto de diseño.

Con estos datos, obtenidos en laboratorio en condiciones óptimas, no se podría garantizar en obra el valor de 5 Mpa, por lo que el valor de diseño de los mismos correspondería a un M-2,5.

En este caso, además de la importancia que tiene la composición del aditivo en el comportamiento mecánico de las mezclas, se puede comprobar que los resultados obtenidos son mejores al emplear el árido natural que con el árido siderúrgico. Efectivamente, los valores a 7, 28 y 90 días del mortero MR-202 son superiores al MED-202.

El estudio de los morteros se puede completar con un análisis transversal de resistencias mecánicas entre morteros análogos, dependiendo del tipo de aditivo empleado. Esta comparativa se muestra en la Tabla 6.38 y en el Gráfico 6.18 para los ensayos a flexión, y en la Tabla 6.39 y en el Gráfico 6.19, para los valores de compresión a 28 días.

Comparativo resistencia a flexión 28 días(MR)		
	N/mm²	Variación respecto MR
MR	3,82	
MR-C22	2,47	- 35,4 %
MR-201	3,10	- 18,8 %
MR-202	2,12	- 44,6 %

Comparativo resistencia a flexión 28 días (MEA)		
	N/mm²	Variación respecto MEA
MEA	4,74	
MEA-C22	2,71	-42,8 %
MEA-201	3,06	- 35,4 %
MEA-202	1,80	- 61,9 %

Comparativo resistencia a flexión 28 días (MEB)		
	N/mm²	Variación respecto MEB
MEB	4,95	
MEB-C22	2,71	- 45,8 %
MEB-201	3,13	- 35,4 %
MEB-202	1,89	- 61,8 %

Comparativo resistencia a flexión 28 días (MEC)		
	N/mm²	Variación respecto MEC
MEC	4,95	
MEC-C22	2,80	- 43,4 %
MEC-201	3,23	- 34,9 %
MEC-202	1,88	- 62,1 %

Comparativo resistencia a flexión 28 días (MED)		
	N/mm²	Variación respecto MED
MED	5,09	
MED-C22	2,79	- 45,2 %
MED-201	3,63	- 28,7 %
MED-202	2,79	- 45,2 %

Tabla 6.38 Comparativo resistencia a flexión a los 28 días

Cuando los morteros incorporan el aditivo C22, las resistencias a flexión disminuyen un 42% de media, pero cuando el aditivo dosificado es PM201, se reducen del orden del 30%. El mayor descenso en las resistencias

mecánicas se produce cuando se emplea el aditivo PM202, donde la pérdida de resistencia alcanza valores en torno al 55%.

No obstante, aunque los morteros fabricados con escorias muestran un buen comportamiento de resistencia a flexotracción, los resultados obtenidos no son indicativos del comportamiento final de estos morteros. Por ello, será más útil realizar el análisis de la resistencia mecánica a compresión, sobre todo a los 28 días, al ser un indicio de durabilidad de especial importancia en este tipo de material.

Comparativo resistencias a flexion a 28 días

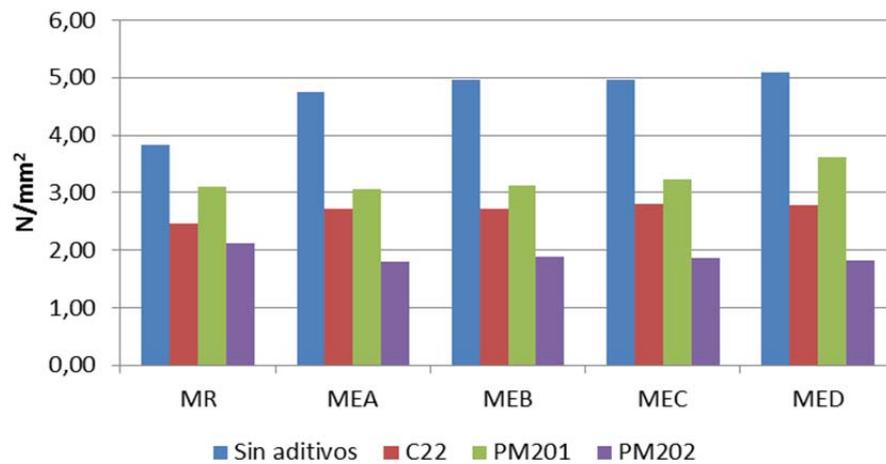


Gráfico 6.18 Comparativo resistencias a flexión a los 28 días

En la Tabla 6.39 se compara la resistencia a compresión a los 28 días de morteros análogos, en función del aditivo incorporado a la mezcla.

Comparativo resistencia a compresión 28 días(MR)		
	N/mm ²	Variación respecto MR
MR	15,15	
MR-C22	9,70	- 35,8 %
MR-201	10,61	- 29,8 %
MR-202	5,66	- 62,7 %

Comparativo resistencia a compresión 28 días (MEA)		
	N/mm ²	Variación respecto MEA
MEA	17,60	
MEA-C22	10,02	- 43,0 %
MEA-201	10,94	- 37,8 %
MEA-202	5,24	- 70,2 %

Comparativo resistencia a compresión 28 días (MEB)			Comparativo resistencia a compresión 28 días (MEC)		
	N/mm ²	Variación respecto MEB		N/mm ²	Variación respecto MEC
MEB	17,66		MEC	17,66	
MEB-C22	10,60	- 40,0 %	MEC-C22	10,35	- 41,4 %
MEB-201	9,80	- 44,5 %	MEC-201	10,49	- 40,6 %
MEB-202	5,05	-71,4 %	MEC-202	5,12	- 71,0 %

Comparativo resistencia a compresión 28 días (MED)		
	N/mm ²	Variación respecto MED
MED	17,84	
MED-C22	10,62	- 40,5 %
MED-201	11,47	- 35,7 %
MED-202	5,04	- 71,7 %

Tabla 6.39 Comparativo resistencia a compresión a los 28 días

Cuando los morteros incorporan el aditivo C22 o PM201, las resistencias a compresión a 28 días disminuyen aproximadamente un 40%, alcanzando con ambos aditivos valores similares. El descenso más acusado de resistencia se produce con la incorporación del aditivo PM202, donde la reducción alcanza el 69%.

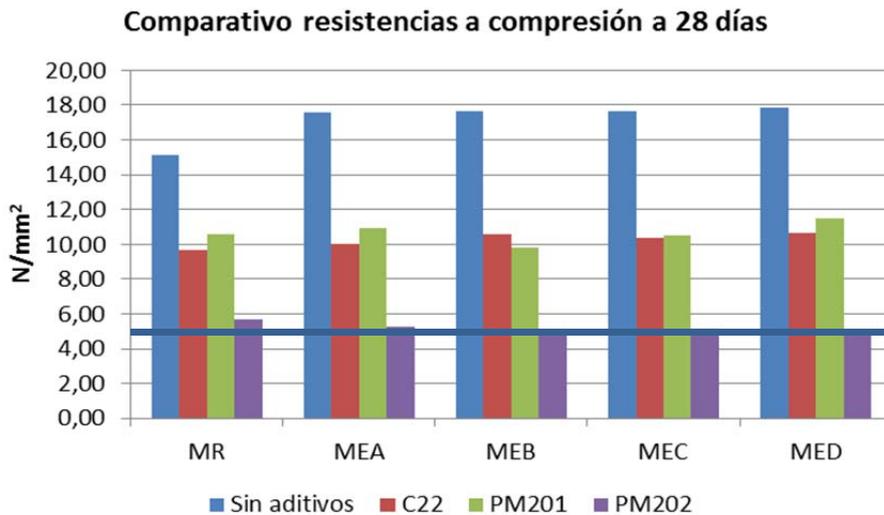


Gráfico 6.19 Comparativo resistencias a compresión a los 28 días

Todos los morteros diseñados cumplen con los parámetros de diseño en cuanto a su consistencia plástica (175 ± 10 mm en mesa de sacudidas) y resistencia a compresión a los 28 días igual o superior a 5 N/mm^2 , característica de los morteros empleados en albañilería (M5a).

De igual forma, con estos morteros también se cumplen las prescripciones establecidas en el CTE- DB- SE F “Seguridad estructural Fábricas”, donde se indica que el mortero ordinario para fábricas convencionales no será inferior a M1 (1 N/mm^2) y que los morteros utilizados en fábrica armada o pretensada, los morteros de junta delgada y los morteros ligeros, no presentarán una resistencia inferior a la establecida para un mortero M4 (4 N/mm^2).

El valor 1 N/mm^2 es un valor muy bajo, fácilmente alcanzable incluso con bajas dosificaciones cemento/arena, por lo que puede considerarse la resistencia a compresión un indicativo de durabilidad. Previsiblemente, los morteros con aditivo PM202, con resistencias a compresión inferiores, tendrán un peor comportamiento frente a ensayos de durabilidad.

El resto de morteros muestran un buen indicio de durabilidad, ya que las resistencias de los morteros se incrementan considerablemente en el tiempo, especialmente para los morteros diseñados con escoria negra y blanca. No obstante, para confirmar este comportamiento en el tiempo, deben someterse a ensayos de durabilidad específicos, mediante exposiciones extremas a agentes contaminantes agresivos externos.

El Gráfico 6.20 muestra la relación entre la resistencia a compresión de las mezclas y la cantidad de cemento dosificada en cada una de ellas por m^3 de mortero. Se puede apreciar que los morteros que emplean aditivo PM202 tienen unas resistencias a compresión bajas en relación con la cantidad de cemento empleada.

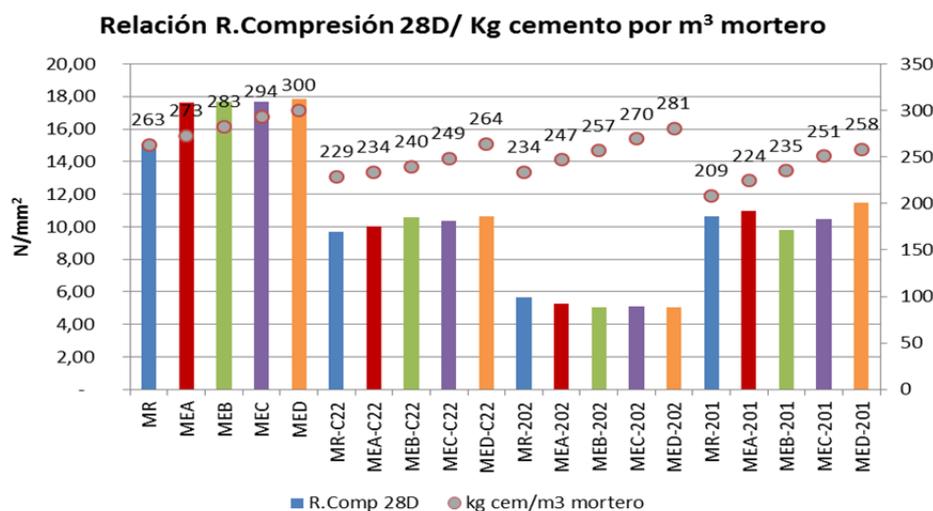


Gráfico 6.20 Relación entre la resistencia a compresión a 28 D y los kg de cemento por m^3 de mortero

6.3.3. Adherencia del mortero endurecido

La resistencia a la adhesión de los morteros está recogida en la norma UNE-EN 1015-12 “Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 12: Determinación de la resistencia a la adhesión de los morteros para revoco y enlucido endurecidos aplicados sobre soportes”.

La norma indica expresamente que se emplearán como soporte ladrillos cerámicos, bloques silicocalcáreos o bloques de hormigón, en estado seco al aire. Como se ha indicado anteriormente, los morteros fabricados con escoria elaborados sin aditivos retienen con dificultad el agua de amasado, circunstancia que hace imposible la aplicación de la masa sobre un soporte seco, debido a su gran capacidad de absorción y a la exudación del agua de dosificación del propio mortero.

Por otra parte, la antigua norma básica de la edificación NBE-FL 90 “Muros Resistentes de Fábrica de Ladrillo” establece una serie de condiciones a tener en cuenta para aplicar los morteros sobre las piezas como, por ejemplo, humedecer los ladrillos antes de su empleo en la ejecución de la fábrica.

La humectación puede realizarse por aspersión, regando abundantemente el rejal hasta el momento de su empleo, o por inmersión, introduciendo los ladrillos en una balsa durante unos minutos, apilándolos después de sacarlos hasta que no goteen.

La cantidad de agua embebida en el ladrillo debe ser la necesaria para que no varíe la consistencia del mortero al ponerlo en contacto con el ladrillo, sin succionar el agua de amasado ni incorporarla.

De igual forma, la norma que la sustituye, CTE-DB SE F “Seguridad Estructural: Fábricas”, indica que las piezas, en concreto las de cerámica, se humedecerán antes de su empleo en la ejecución de la fábrica, bien por aspersión o bien por inmersión en agua, durante unos minutos. La cantidad de agua embebida en la pieza debe ser la necesaria para que no varíe la consistencia del mortero al ponerlo en contacto con la misma, sin succionar agua de amasado del mortero ni incorporar a éste el agua del soporte.

Siguiendo las recomendaciones de la normativa estudiada, se opta por humedecer el soporte cerámico sobre el que se realiza el ensayo. Para ello, las piezas se sumergen durante 1 min. en agua, con lo que se alcanza una saturación de las piezas del 13%.

Para el estudio de los morteros con aditivo, y con el objetivo de mantener las mismas condiciones de ensayo, los ladrillos también se sumergen en agua durante un periodo de 1 min.

De la Figura 6.1 hasta la Figura 6.4 se muestra el aspecto de las probetas ensayadas.

Caracterización de los morteros fabricados con árido siderúrgico



Figura 6.1 Rotura adherencia mortero sin aditivos



Figura 6.2 Rotura adherencia mortero con C22



Figura 6.3 Rotura adherencia mortero con PM202



Figura 6.4 Rotura adherencia mortero con PM201

Como puede comprobarse, la rotura de todas las piezas ha sido de Tipo Adhesiva (tipo “a” según norma), produciéndose la rotura en la interfase entre el mortero y el soporte.

La Tabla 6.40 recoge las medias de los cinco valores unitarios obtenidos del ensayo de adherencia de cada uno de los morteros.

Resistencia a la adhesión del mortero endurecido					
MORTERO	MR	MEA	MEB	MEC	MED
N/mm ²	1,15	0,68	0,71	0,79	0,83
Variación		-41,1 %	- 38,4 %	- 31,34 %	- 27,7 %
MORTERO	MR-C22	MEA-C22	MEB-C22	MEC-C22	MED-C22
N/mm ²	0,46	0,44	0,35	0,43	0,62
Variación		- 4,3 %	- 23,7 %	- 6,1 %	+ 35,0 %
MORTERO	MR-201	MEA-201	MEB-201	MEC-201	MED-201
N/mm ²	0,45	0,49	0,57	0,54	0,64
Variación		+ 8,4 %	+ 27,5 %	+ 20,0 %	+ 42,1 %
MORTERO	MR-202	MEA-202	MEB-202	MEC-202	MED-202
N/mm ²	0,13	0,16	0,18	0,19	0,20
Variación		+ 27,8 %	+ 39,7 %	+ 48,4 %	+ 61,1%

Tabla 6.40 Resistencia a la adhesión del mortero endurecido

El valor máximo de adhesión se produce en los morteros sin aditivos dosificados sólo con árido natural.

Comparativa adherencia mortero endurecido

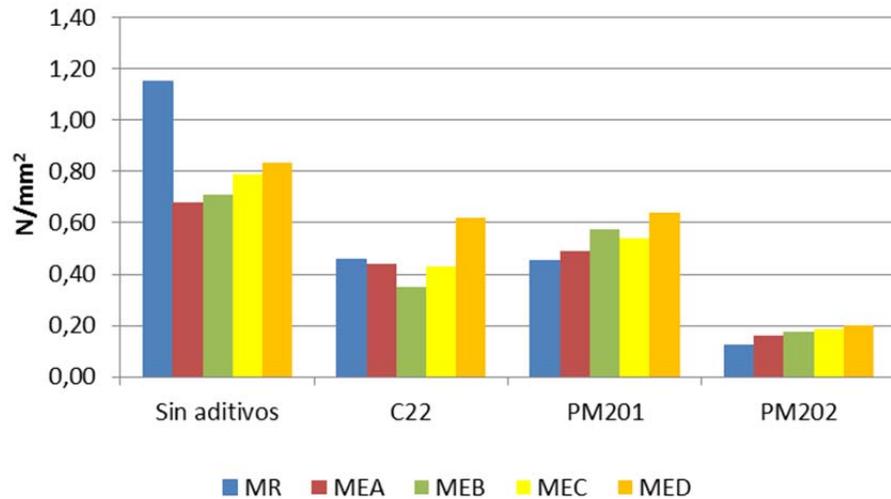


Gráfico 6.21 Comparativa adherencia mortero endurecido

Si comparamos las mezclas dosificadas con los aditivos (C22, PM201 y PM202), la familia de morteros con escorias MED presenta mayores resistencias a la adherencia que sus homólogos MR.

Por el contrario, si el comparativo se realiza dentro de la misma familia en función del aditivo utilizado (Tabla 6.41), se observa que con el C22 las adherencias disminuyen una media del 43%, mientras que con el PM201 el descenso alcanza el 32%.

Los resultados más bajos se dan en los morteros dosificados con el aditivo PM202, ya que las resistencias apenas alcanzan 1/3 del valor de la de sus correspondientes morteros de referencia análogos.

Comparativo Resistencia a la adhesión del mortero endurecido (MR)		
	N/mm ²	Variación respecto MR
MR	1,15	
MR-C22	0,46	- 60,2 %
MR-201	0,45	- 61,0 %
MR-202	0,13	- 89,1 %

Comparativo Resistencia a la adhesión del mortero endurecido (MEA)		
	N/mm ²	Variación respecto MEA
MEA	0,68	
MEA-C22	0,44	- 35,3 %
MEA-201	0,49	- 28,1 %
MEA-202	0,16	- 76,3 %

Comparativo Resistencia a la adhesión del mortero endurecido (MEB)			Comparativo Resistencia a la adhesión del mortero endurecido (MEC)		
	N/mm ²	Variación respecto MEB		N/mm ²	Variación respecto MEC
MEB	0,71		MEC	0,79	
MEB-C22	0,35	- 50,6 %	MEC-C22	0,43	- 45,5 %
MEB-201	0,57	- 19,1 %	MEC-201	0,54	- 31,8 %
MEB-202	0,18	- 75,2 %	MEC-202	0,19	- 76,4 %

Comparativo Resistencia a la adhesión del mortero endurecido (MED)		
	N/mm ²	Variación respecto MED
MED	0,83	
MED-C22	0,62	- 25,6 %
MED-201	0,64	- 23,2 %
MED-202	0,20	- 75,7 %

Tabla 6.41 Comparativo resistencia a la adhesión

En el Gráfico 6.21 se observan los resultados de resistencia a la adhesión, donde puede apreciarse como los valores disminuyen cuando se incorporan aditivos a las mezclas.

Comparativa adherencia mortero endurecido

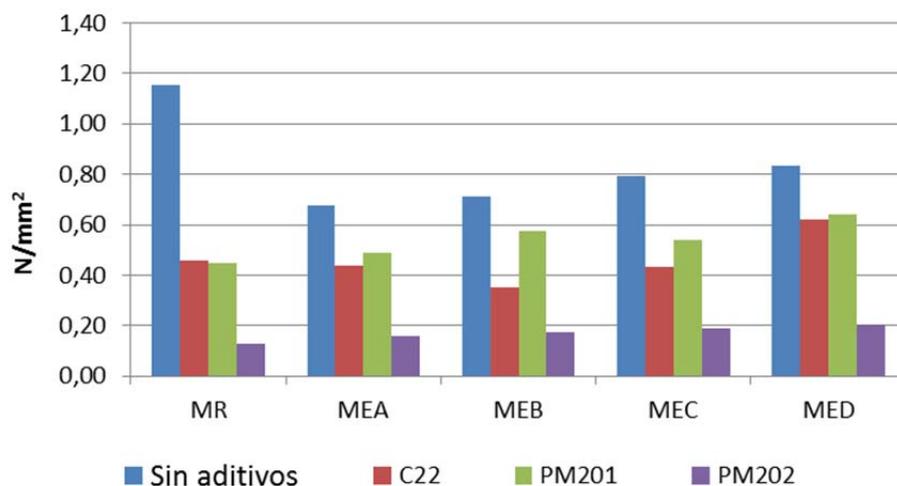


Gráfico 6.22 Adherencia mortero endurecido por familia de estudio

De los resultados obtenidos se concluye que los morteros que integran aditivos en su dosificación no mejoran la adherencia respecto de sus homólogos fabricados sin aditivos.

6.3.4. Absorción de agua

Todos los materiales presentan la propiedad de atraer y retener líquidos en su superficie o en su interior. En unos casos la disposición de los líquidos se produce en la superficie de las paredes externas que delimitan el material, ya que no tienen poros o éstos no están en contacto con el exterior. Este fenómeno se conoce como absorción y es propio de los materiales no porosos abiertos y con superficies externas romas y lisas. En otros casos, los líquidos se depositan en el interior de los materiales a través de los intersticios internos abiertos al exterior, y de una red capilar que los comunica entre ellos. Son materiales con porosidad aparente, en los que el volumen real y aparente de los mismos no coinciden.

El mortero es un material poroso, ya que en su interior aparecen un conjunto de intersticios capilares que recorren todo su interior. Estudios realizados sobre el comportamiento del agua de dosificación en los conglomerados permiten afirmar que el 60% del agua utilizada en la fabricación de los morteros y hormigones se combina químicamente con los componentes mineralógicos del cemento y se localiza de la siguiente forma:

Una parte se sitúa en la red capilar que se forma una vez mezclados y amasados los componentes del mortero. Esta red capilar está abierta al exterior y recorre toda la masa del mortero, estableciendo un intercambio de humedad con el exterior.

En los morteros de poco espesor el proceso de evaporación del agua de amasado puede dar lugar a tensiones que pueden superar los valores de adherencia del mortero, produciendo el desconchado de la capa superficial de recubrimiento.

La importancia de la red capilar y su distribución en el mortero pueden afectar a la absorción de agua. Esta absorción puede producirse, bien por permeabilidad a través de las caras del material o debido a fuerzas de atracción entre el líquido y los capilares internos comunicados con el exterior.

La presencia de agua en los edificios puede proceder directamente del exterior, como es el caso del agua de lluvia que se proyecta sobre el edificio, por capilaridad del agua presente en el terreno o indirectamente por condensación del agua contenida en el interior del inmueble. Por ello, la absorción de agua de los morteros se puede estudiar desde diferentes puntos de vista:

1. La cantidad de agua que puede absorber un mortero a presión atmosférica por inmersión en agua.

2. La absorción de agua por capilaridad o succión que un mortero absorbe por fuerzas de atracción entre el líquido y la red capilar del mortero.

6.3.4.1. Absorción de agua a presión atmosférica

En este apartado se recogen los datos obtenidos de la absorción de agua a presión atmosférica por inmersión en agua de acuerdo con el procedimiento recogido en la norma UNE-EN 13755 “Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la absorción de agua a presión atmosférica”.

Los valores expresados en % de la absorción de agua de los morteros a presión atmosférica están recogidos en la Tabla 6.42.

Absorción de agua a presión atmosférica					
MORTERO	MR	MEA	MEB	MEC	MED
%	7,96 %	8,23 %	8,58 %	8,81 %	9,67 %
Variación		+ 3,4 %	+ 7,8 %	+ 10,7 %	+ 21,5 %
MORTERO	MR-C22	MEA-C22	MEB-C22	MEC-C22	MED-C22
%	7,43 %	6,84 %	7,46 %	6,25 %	6,58 %
Variación		- 7,9 %	0,4 %	- 15,9 %	- 11,5 %
MORTERO	MR-201	MEA-201	MEB-201	MEC-201	MED-201
%	9,23 %	8,99 %	8,94 %	8,46 %	8,61 %
Variación		- 2,7 %	- 3,2 %	- 8,3 %	- 6,8 %
MORTERO	MR-202	MEA-202	MEB-202	MEC-202	MED-202
%	9,77 %	10,75 %	10,10 %	9,90 %	9,50 %
Variación		+ 10,0 %	+ 3,4 %	+ 1,3 %	- 2,8 %

Tabla 6.42 Absorción de agua a presión atmosférica

En las mezclas sin aditivos, la absorción de agua a presión atmosférica aumenta a medida que se sustituye el árido natural por la escoria siderúrgica.

Cuando los morteros incorporan aditivos, los valores de absorción son prácticamente iguales, independientemente del árido empleado. Si se dosifican con C22 el coeficiente de absorción alcanza valores en torno al 7%; con el PM201 del 9% y cuando se elaboran con PM202 son del 10%.

En la Tabla 6.43 y en el Gráfico 6.23 se recogen los estudios comparativos de los valores de absorción de agua de los morteros de manera transversal en función del aditivo empleado en las mezclas.

Comparativo Absorción de agua a presión atmosférica (MR)			Comparativo Absorción de agua a presión atmosférica (MEA)		
	%	Variación respecto MR		%	Variación respecto MEA
MR	7,96 %		MEA	8,23 %	
MR-C22	9,67 %	+ 21,5 %	MEA-C22	6,84 %	- 16,9 %
MR-201	9,23 %	+ 16,0 %	MEA-201	8,99 %	+ 9,2 %
MR-202	9,77 %	+ 22,7 %	MEA-202	10,75 %	+ 30,6 %

Comparativo Absorción de agua a presión atmosférica (MEB)			Comparativo Absorción de agua a presión atmosférica (MEC)		
	%	Variación respecto MEB		%	Variación respecto MEC
MEB	8,58 %		MEC	8,81 %	
MEB-C22	7,46 %	- 13,1 %	MEC-C22	6,25 %	- 29,1 %
MEB-201	8,94 %	+ 4,2 %	MEC-201	8,46 %	- 4,0 %
MEB-202	10,10 %	+ 17,7 %	MEC-202	9,90 %	+ 12,4 %

Comparativo Absorción de agua a presión atmosférica (MED)		
	%	Variación respecto MED
MED	9,67 %	
MED-C22	6,58 %	- 31,9 %
MED-201	8,61 %	- 11,0 %
MED-202	9,50 %	- 1,8 %

Tabla 6.43 Comparativa absorción de agua a presión atmosférica

Cuando no se utilizan aditivos, el mortero de referencia MR tiene una absorción de agua inferior al fabricado únicamente con escoria MED, por lo que se puede concluir que, en ausencia de aditivos, la naturaleza del árido es determinante en este ensayo.

En cambio, cuando las mezclas incorporan aditivos, los morteros elaborados con árido natural presentan una absorción de agua superior a los fabricados con árido siderúrgico, por lo que, aun siendo relevante la naturaleza del árido empleado, las características del aditivo dosificado son concluyentes, pues provocan que con el árido natural la absorción de agua sea superior que cuando se utiliza el árido siderúrgico.

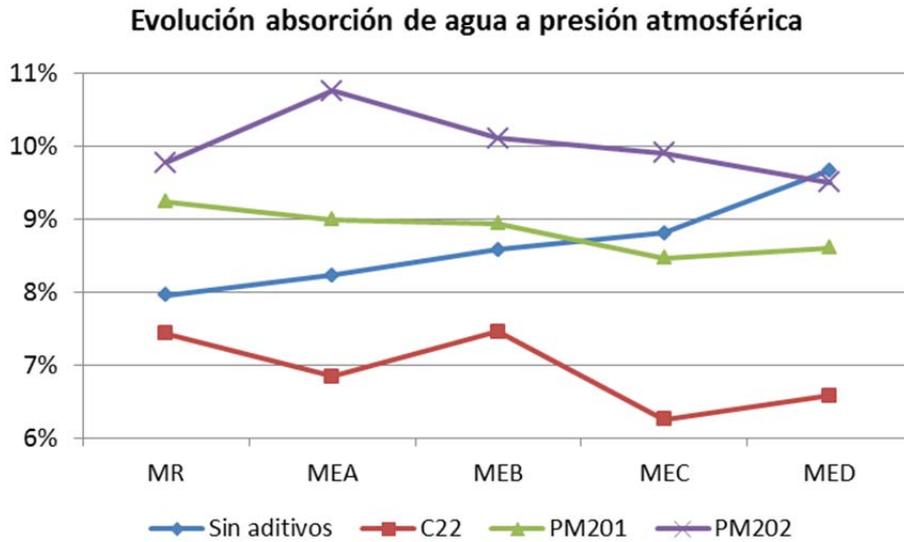


Gráfico 6.23 Evolución absorción de agua a presión atmosférica

6.3.4.2. Absorción de agua por capilaridad

La absorción de agua por capilaridad o succión se determina según lo especificado en la norma UN-EN 1015-18 “Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 18: Determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad del mortero endurecido”.

La Tabla 6.44 recoge los Coeficientes de Absorción de Agua de los diferentes tipos de morteros, así como la altura que alcanza el agua absorbida después de finalizar el ensayo a los 90 minutos.

El estudio de la absorción por capilaridad de los morteros es útil para conocer cómo se estructura la red capilar interna del material y poder comprobar así su comportamiento cuando está en contacto con la humedad.

La norma UNE-998-1 clasifica los morteros en función de su coeficiente de absorción por capilaridad (c) en tres categorías:

- W1 cuando $c \leq 0,4 \text{ Kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0,5})$
- W2 cuando $c \leq 0,2 \text{ Kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0,5})$
- W0 cuando el valor c no es declarado

Según esta tipificación todos los morteros serían W2, excepto el mortero fabricado únicamente con escorias y dosificado sin aditivos MED, por lo que se puede afirmar que tienen una buena resistencia a la filtración contra la penetración del agua.

Coeficiente de absorción por capilaridad $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0,5})$ Altura de penetración del agua (mm)					
MORTERO	MR	MEA	MEB	MEC	MED
$\text{Kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0,5})$	0,178	0,140	0,130	0,103	0,203
Variación		- 21,5 %	- 27,1 %	- 42,1 %	+ 14,0 %
Altura	23,8	21,8	20,3	18,0	24,5
MORTERO	MR-C22	MEA-C22	MEB-C22	MEC-C22	MED-C22
$\text{Kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0,5})$	0,175	0,192	0,132	0,167	0,153
Variación		+ 9,5 %	- 24,8 %	- 4,8 %	- 12,4 %
Altura	22,3	23,0	17,5	23,3	18,2
MORTERO	MR-201	MEA-201	MEB-201	MEC-201	MED-201
$\text{Kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0,5})$	0,125	0,148	0,163	0,135	0,160
Variación		+ 18,7 %	+ 30,7 %	+ 8,0 %	+ 28,0 %
Altura	16,6	16,5	18,8	14,2	15,2
MORTERO	MR-202	MEA-202	MEB-202	MEC-202	MED-202
$\text{Kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0,5})$	0,162	0,090	0,123	0,100	0,070
Variación		- 44,3 %	- 23,7 %	- 38,1 %	- 56,7 %
Altura	2,0	2,3	3,0	3,2	3,7

Tabla 6.44 Coeficiente de absorción por capilaridad de los morteros y altura de agua alcanzada

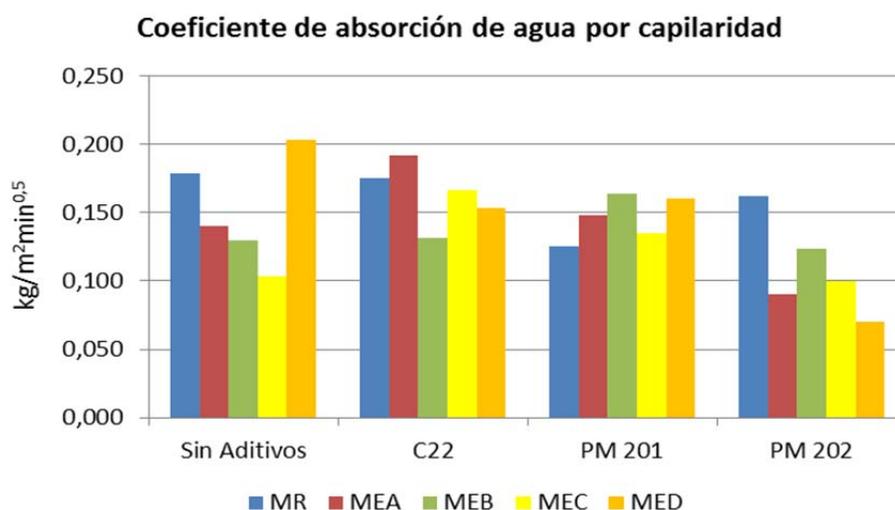


Gráfico 6.24 Coeficiente de absorción por capilaridad

En la Tabla 6.45 se realiza el estudio del coeficiente de absorción por capilaridad en función del aditivo empleado en las mezclas. El análisis queda reflejado en la Gráfico 6.25.

Comparativo Coeficiente de absorción por capilaridad (MR)		
	kg/(m ² .min ^{0,5})	Variación respecto MR
MR	0,178	
MR-C22	0,175	- 1,9 %
MR-201	0,125	- 29,9 %
MR-202	0,162	- 9,3 %

Comparativo Coeficiente de absorción por capilaridad (MEA)		
	kg/(m ² .min ^{0,5})	Variación respecto MEA
MEA	0,140	
MEA-C22	0,192	+ 36,9 %
MEA-201	0,148	+ 5,9 %
MEA-202	0,090	- 35,7 %

Comparativo Coeficiente de absorción por capilaridad (MEB)		
	kg/(m ² .min ^{0,5})	Variación respecto MEB
MEB	0,130	
MEB-C22	0,132	+ 1,3 %
MEB-201	0,163	+ 25,6 %
MEB-202	0,123	- 5,2 %

Comparativo Coeficiente de absorción por capilaridad (MEC)		
	kg/(m ² .min ^{0,5})	Variación respecto MEC
MEC	0,103	
MEC-C22	0,167	+ 61,4 %
MEC-201	0,135	+ 30,7 %
MEC-202	0,100	- 3,2 %

Comparativo Coeficiente de absorción por capilaridad (MED)		
	kg/(m ² .min ^{0,5})	Variación respecto MED
MED	0,203	
MED-C22	0,153	- 24,6 %
MED-201	0,160	- 21,3 %
MED-202	0,070	- 65,6 %

Tabla 6.45 Comparativo coeficiente de absorción por capilaridad

Los resultados obtenidos son muy uniformes y no permiten diferenciar comportamiento entre los morteros, en función de la naturaleza del árido utilizado, arena silícica o escoria, o del aditivo dosificado. No obstante, sí se puede observar que las mezclas MEA-C22 y MED muestran un comportamiento a la absorción por capilaridad singular si las comparamos con el resto de dosificaciones.

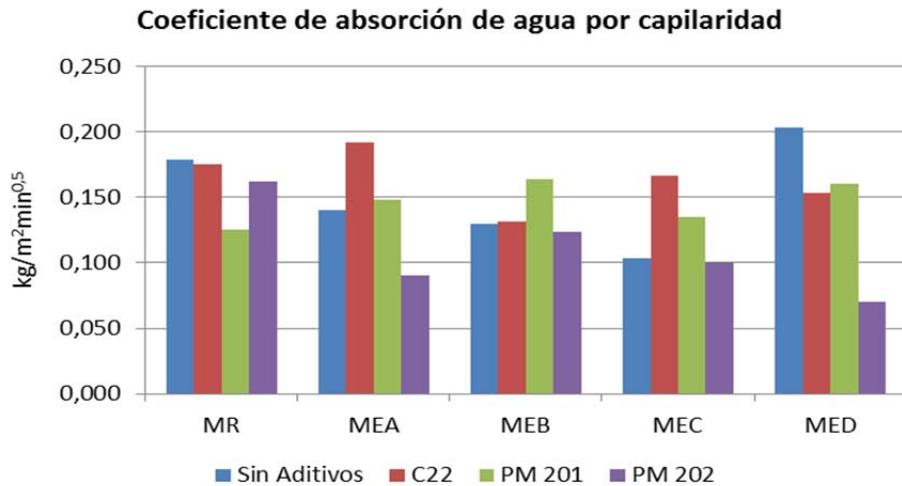


Gráfico 6.25 Comparativo coef. absorción de agua por capilaridad

Una vez concluido el ensayo, las probetas se seccionan longitudinalmente y se mide la altura de penetración del agua en las muestras parafinadas (Figura 6.5 a Figura 6.8).

En las imágenes se observa que el ascenso del agua es prácticamente el mismo, tanto en los morteros sin aditivos como en los dosificados con aditivos C22 y PM201. Por el contrario, cuando el aditivo empleado es PM202, el agua apenas asciende 2 ó 3 mm una vez transcurridos los 90 minutos establecidos como referencia en el ensayo, circunstancia que puede deberse a que el contenido de aire ocluido en estos morteros es más elevado que en el resto, favoreciendo así la rotura de su red capilar intersticial.

Se observa que, en ningún caso, la altura de penetración supera los 25 mm, por lo que se puede concluir que para un mortero de juntas, colocado sobre ladrillo o bloque al exterior, la penetración de agua por capilaridad no llegaría a la superficie no expuesta de la fábrica.

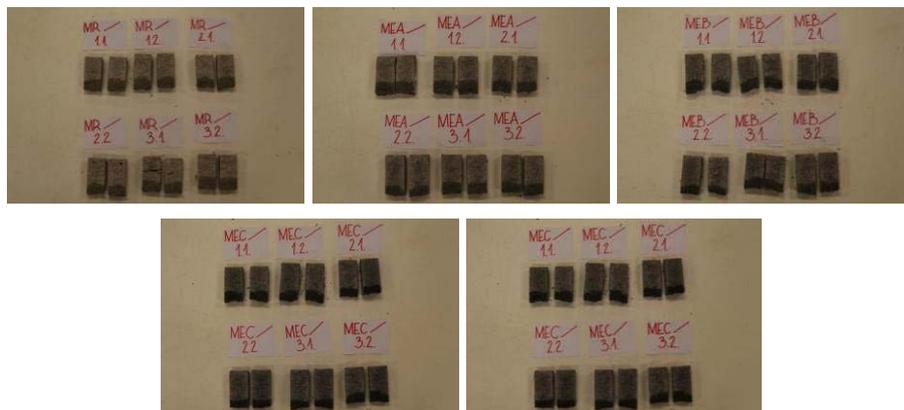


Figura 6.5 Altura penetración de agua morteros sin aditivos

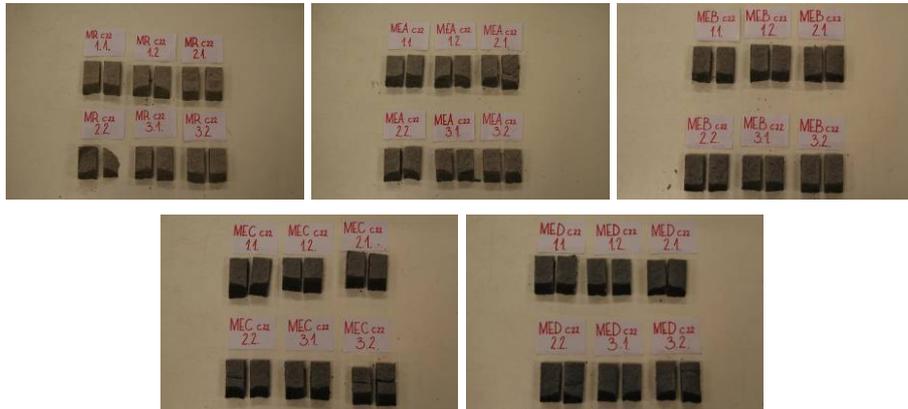


Figura 6.6 Altura penetración de agua morteros C22

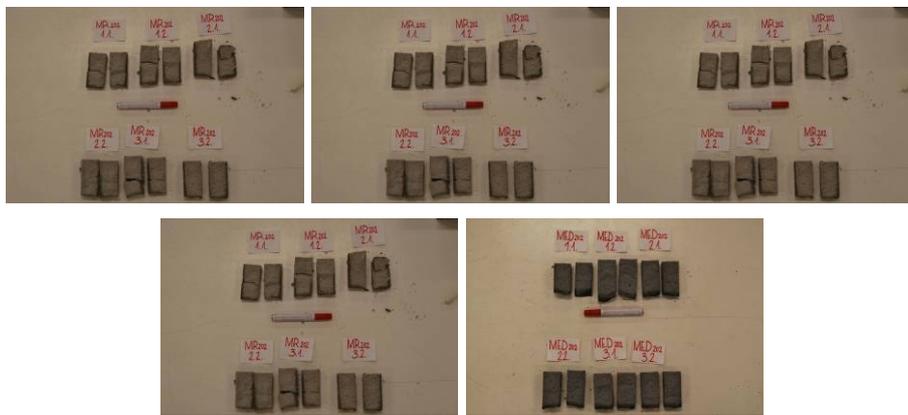


Figura 6.7 Altura penetración de agua morteros PM 202



Figura 6.8 Altura penetración de agua morteros 201

En el Gráfico 6.26 puede observarse la escasa altura alcanzada por el agua en los morteros que incluyen el aditivo PM 202 en su dosificación.

Con este aditivo se consiguen los mayores contenidos de aire ocluido (29%), y su distribución puede observarse en las secciones obtenidas en el

TAC (apartado 6.4.2, página 200). En ellas se percibe que el mortero MEB-202 tiene sus poros interconectados, creando una gran masa porosa y no una red capilar al uso. Por este mismo motivo estos morteros son los que menos resistencia a compresión presentan.

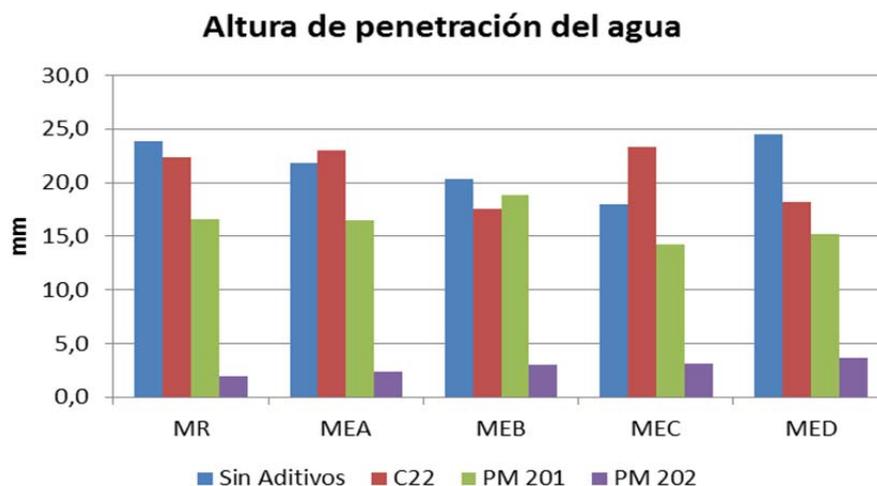


Gráfico 6.26 Altura de penetración por capilaridad

6.3.5. Permeabilidad al vapor de agua

Para el estudio de la permeabilidad al vapor de agua de los morteros se sigue el método descrito en la norma UNE-EN 1015-19 “Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 19: Determinación de la permeabilidad al vapor de agua de los morteros de revoco y enlucido”.

Durante la realización del ensayo se anota, además del nuevo peso de la probeta, las condiciones ambientales de temperatura y humedad relativa, con el fin de ajustar a la realidad la diferencia de presión entre la cara interior de la probeta y la cara exterior, pues la norma contempla como valores de referencia para el ensayo, una temperatura ambiente de 20°C y una humedad relativa exterior del 50%.

La diferencia de peso de las probetas en función del tiempo o flujo de vapor de agua (kg/seg) se refleja en los siguientes gráficos (Gráfico 6.27 al Gráfico 6.30). En ellos se muestra la línea de tendencia de cada tipo de mezcla, lo que permite calcular la permeanza (Λ) y la permeabilidad al vapor de agua (W_{vp}) de los morteros.

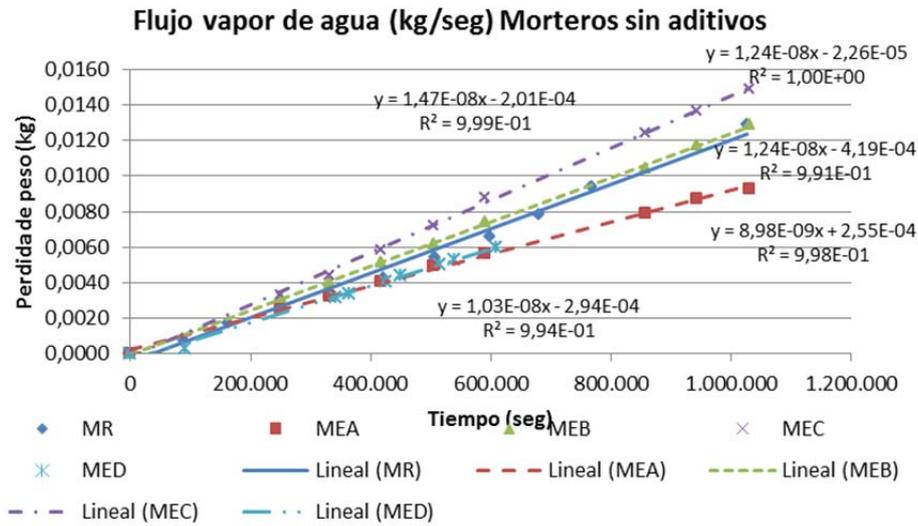


Gráfico 6.27 Flujo de vapor de agua (kg/seg) Morteros sin aditivos

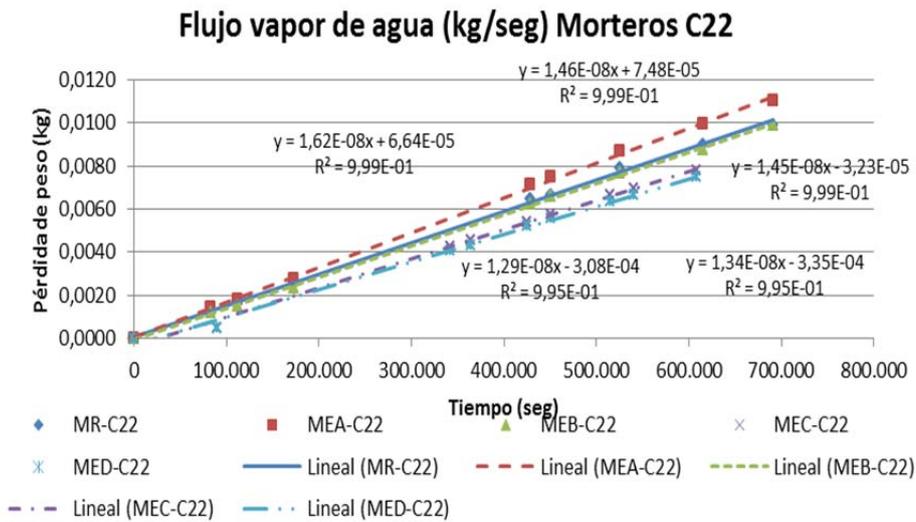


Gráfico 6.28 Flujo de vapor de agua (kg/seg) Morteros con C22

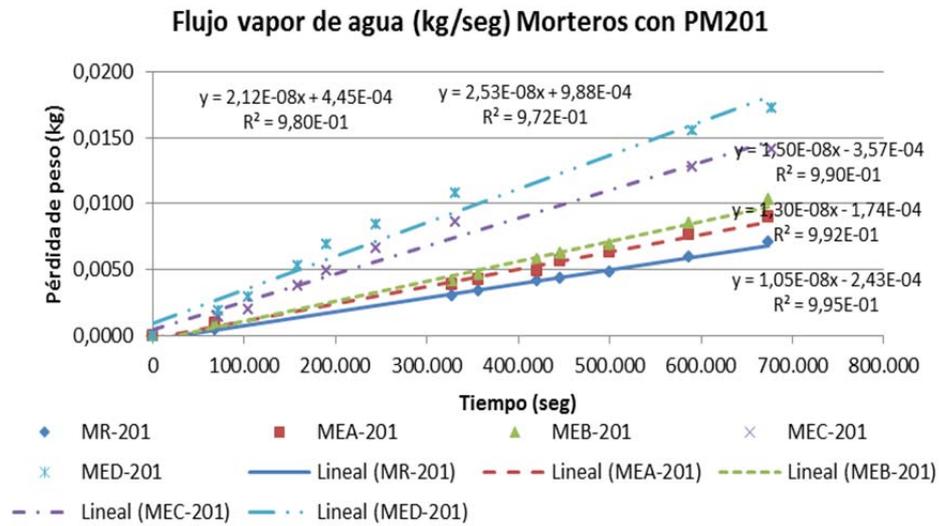


Gráfico 6.29 Flujo de vapor de agua (kg/seg) Morteros con PM201

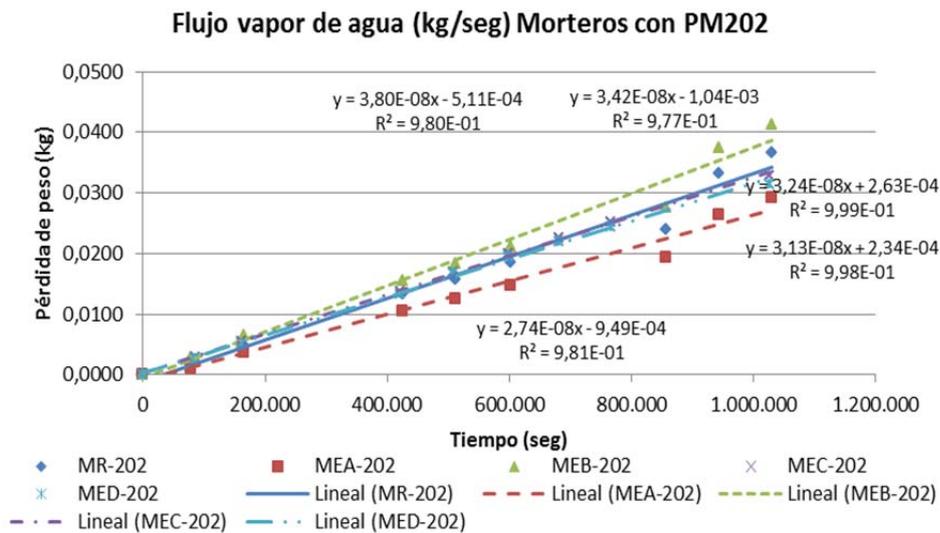


Gráfico 6.30 Flujo de vapor de agua (kg/seg) Morteros con PM202

Una vez conocido el flujo de vapor de agua de los morteros, se procede a calcular los valores de la permeancia (Λ), permeabilidad al vapor de agua (W_{vp}) y coeficiente de permeabilidad al vapor de agua (μ), de acuerdo con la normativa de referencia. Estos datos están reflejados en la Tabla 6.46.

Permeabilidad al vapor de agua de los morteros			
Mortero	Permeanza Λ Kg/(m ² .s.Pa)•10 ⁻⁰⁹	Permeabilidad W_{vp} Kg/(m.s.Pa)•10 ⁻¹¹	Coficiente de permeabilidad al vapor de agua μ
MR	0,62	0,99	19,46
MEA	0,49	0,78	24,83
MEB	0,68	1,09	17,78
MEC	0,81	1,30	14,90
MED	0,65	1,03	18,76
MR-C22	0,86	1,38	14,05
MEA-C22	0,96	1,54	12,59
MEB-C22	0,86	1,37	14,13
MEC-C22	0,85	1,36	14,27
MED-C22	0,81	1,30	14,94
MR-201	0,65	1,04	18,65
MEA-201	0,81	1,30	14,87
MEB-201	0,94	1,51	12,88
MEC-201	1,24	1,98	9,78
MED-201	1,33	2,13	9,11
MR-202	1,71	2,74	7,09
MEA-202	1,35	2,15	9,00
MEB-202	1,92	3,07	6,32
MEC-202	1,70	2,72	7,12
MED-202	1,64	2,63	7,38

Tabla 6.46 Permeabilidad al vapor de agua de los morteros

El valor del Coeficiente de Permeabilidad al Vapor de Agua (μ) se puede comparar por familia de morteros, en función del tipo de aditivo dosificado (Gráfico 6.31) o bien en función del grado de sustitución del árido natural por árido siderúrgico (Gráfico 6.32)

En el Gráfico 6.31 se observa que las mezclas que no incluyen aditivo, las que llevan aditivo C22 y las de PM 202, mantienen valores semejantes de μ .

Los morteros sin aditivos presentan un valor de μ de 19, las mezclas dosificadas con retenedor de agua C22 tienen un μ de 14 y en las que se incorpora 202 el μ es de 7.

Sin embargo, cuando los morteros incluyen el aireante- plastificante PM201, la naturaleza del árido influye en el valor de μ . Efectivamente, el

mortero MR-201 tiene un valor de μ de 18,65, y según se sustituye el árido natural por siderúrgico este valor desciende hasta alcanzar el mortero MED-201 una referencia de 9,11.

Coeficiente de permeabilidad al vapor de agua

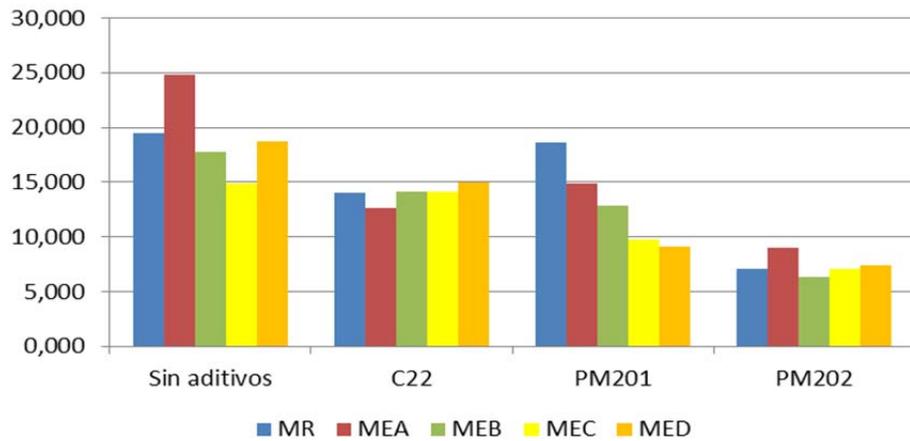


Gráfico 6.31 Comparativo coef. permeabilidad al vapor de agua

En el Gráfico 6.32 se observa que los mayores valores alcanzados en el Coeficiente de Permeabilidad al Vapor de Agua (μ) se obtienen en los morteros sin aditivos.

Los valores más bajos se dan en el caso de las mezclas con aditivo PM 202, mientras que al incorporar otros aditivos, como el C22 o PM201, se obtienen valores intermedios.

Coeficiente de permeabilidad al vapor de agua

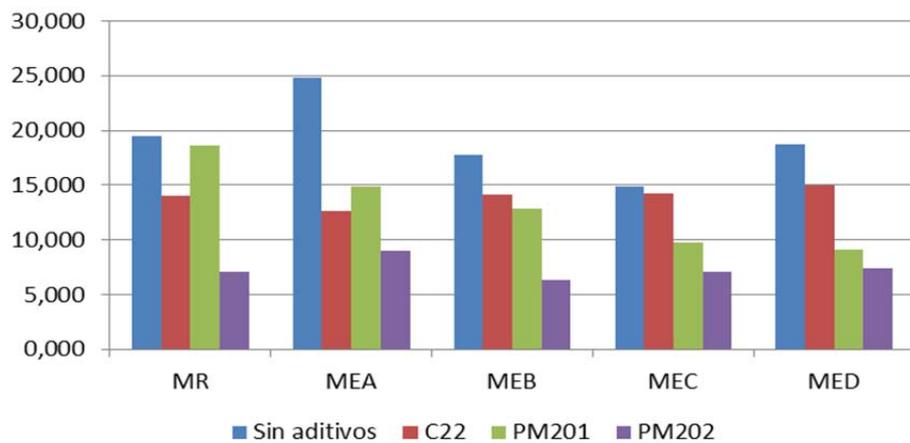


Gráfico 6.32 Comparativo coef. permeabilidad al vapor de agua

6.4. CARACTERIZACIÓN MICROESTRUCTURAL

6.4.1. Microscopía electrónica de barrido (M.E.B.)

6.4.1.1. Introducción

Conocer los procesos y reacciones que se suceden en la hidratación de los componentes mineralógicos del Clinker de cemento Portland es necesario para poder determinar la calidad de los morteros y hormigones de los que forma parte. Por ello, las reacciones químicas que se producen en la pasta formada por la mezcla de cemento y agua, han sido profusamente estudiadas con técnicas que analizan principalmente sus propiedades físicas y químicas^{154,155,156,157}.

Mediante métodos de caracterización se puede conocer con más precisión el comportamiento de la pasta de cemento, lo que facilita poder predecir propiedades como la resistencia, durabilidad y estabilidad de las mezclas de las que forma parte. De igual forma, permite seleccionar cemento para aplicaciones concretas, en función de las características del entorno.

La mezcla del cemento con una cantidad determinada de agua da como resultado la formación de una pasta, producto de los procesos de hidratación de los componentes mineralógicos del cemento Portland. Esta pasta agrega los áridos que acompañan a las mezclas de mortero y constituyen la matriz cementicia que garantiza la trabazón y unión de todos sus componentes.

Las reacciones de hidratación de los componentes mineralógicos del cemento Portland son muy rápidas y disminuyen de velocidad con el paso del tiempo. Una vez producida la hidratación, comienza el fraguado de la pasta, perdiendo su consistencia plástica y dando lugar al desarrollo de resistencias mecánicas.

La hidratación del cemento portland origina diferentes fases morfológicas de silicatos cálcicos hidratados (denominados genéricamente "gel C-S-H"), hidróxido cálcico (CH), ettringita (fase AF_f), monosulfoaluminato hidratado (fase AF_m), y ocasionalmente pequeñas cantidades de otras fases. Todos estos compuestos junto con los

¹⁵⁴ Mehta, P. (1986). Hardened cement paste— microstructure and its relationship to properties. International Congress on the Chemistry of Cement, (Río de Janeiro) Vol 8.

¹⁵⁵ Puertas, M., F. Blanco and S. Palomo (1989). "Microestructura del hormigón-Influencia sobre sus propiedades." Instituto de Ciencias de la construcción Eduardo Torroja. Madrid nº398.

¹⁵⁶ Diamond, S. (1976). Cement paste microstructure—an overview at several levels. Proc. Conf. hydraulic cement pastes: their structure and properties, Sleafield.

¹⁵⁷ Sidorova, A. (2013). Estudio del efecto de la naturaleza del árido reciclado en la microestructura y propiedades de la zona de transición árido-pasta de cemento, Universidad Politécnica de Cataluña.

componentes del Clinker no hidratado forman el conjunto de elementos microestructurales sólidos de la pasta de cemento^{154,155}.

El silicato de calcio hidratado (C-S-H) es abundante y constituye en torno al 50-60% de los componentes sólidos de la pasta¹⁵⁶. Genera importantes cantidades de enlaces por unidad de superficie, por lo que es el responsable de la capacidad adherente del material y de la resistencia mecánica, así como de su durabilidad en el tiempo. Aunque su estructura no es cristalina, sí contiene una cierta ordenación con formas variables, por lo que también es responsable de otras propiedades de la pasta de cemento tales como la porosidad, la permeabilidad o su fluencia¹⁵⁸.

Uno de los factores que caracteriza al "gel C-S-H" es la existencia de diferentes estados de agregación dependiendo de la porosidad de su estructura interna, pasando paulatinamente de estados muy livianos a otros más densos. De igual forma, estas estructuras determinan también diferentes respuestas a la capacidad mecánica del material.

Los geles que se forman en el proceso de hidratación de los silicatos de calcio forman partículas muy pequeñas (menos de 1 μm) de naturaleza no cristalina y composición variable. Los dos compuestos mineralógicos que surgen son el silicato bicálcico (belita) y silicato tricálcico (alita). En ambos casos, el proceso de hidratación es muy parecido y sólo se distinguen por la cantidad de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ que se forma y por el calor generado en la reacción.

El C_3S o alita es el silicato cálcico más inestable de los presentes en el cemento. Al hidratarse con el agua se transforma en un silicato cálcico hidratado, denominado tobermorita gel, y en hidróxido de calcio.

El C_2S o belita es un silicato más estable que el anterior. Al hidratarse, se convierte también en tobermorita gel, pero libera menos cantidad de hidróxido al formarse.

Como se ha indicado, otro compuesto que también se forma en los procesos de hidratación del clinker de cemento Portland es el hidróxido cálcico o Portlandita [$\text{Ca}(\text{OH})_2$]. Este agregado se estructura en formas planas o hexagonales de gran tamaño y constituyen el 20-25% del volumen de sólidos de la pasta de cemento.

La presencia del hidróxido cálcico es esencial para mantener el pH de la pasta de cemento en valores comprendidos entre 12-13, protegiendo las armaduras de los hormigones armados por la corrosión electroquímica.

Por formarse en cristales de gran superficie y pequeño espesor, la superficie específica de la Portlandita es muy baja, lo que determina una unión muy débil tanto entre los propios enlaces internos de CH, como de éstos con otros materiales, por lo que prácticamente no contribuye a la resistencia mecánica final de la pasta de cemento¹⁵⁴.

¹⁵⁸ Goñi, S., A. Guerrero, F. Puertas, M. Hernández, M. Palacios, J. Dolado, W. Zhu and T. Howind (2011). "Textural and mechanical characterization of CSH gels from hydration of synthetic T1-C3S, β -C2S and their blends." *Materiales de Construcción* vol 61(302): pp.169-183.

Por otra parte, altos contenidos de hidróxido cálcico en las pastas de cemento hidratado puede tener un efecto adverso sobre la durabilidad química del hormigón, debido a la elevada solubilidad del CH en medios acuosos¹⁵⁵.

Junto con los silicatos cálcicos hidratados (C-S-H) y la Portlandita (CH) también aparece un sulfoaluminato de calcio hidratado, denominado ettringita, generado por la reacción de la fase aluminato del Clinker de cemento Portland $[(\text{CaO})_3\text{Al}_2\text{O}_3]$ con el sulfato cálcico dihidratado $(\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O})$ que se añade para regular el proceso de fraguado.

Con el agua la ettringita se hidrata, formándose los sulfoaluminatos de calcio hidratado durante las primeras etapas de hidratación del cemento Portland a partir de la reacción de la fase aluminato del Clinker $(\text{CaO})_3\text{Al}_2\text{O}_3$ con el yeso $(\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O})$, empleado para retardar el fraguado. Supone entre un 15-20% del volumen de los sólidos de la pasta del cemento.

Se distinguen dos fases de sulfoaluminatos de calcio, AF_t y AF_m , que se forman dependiendo de las condiciones de agregación de las estructuras cristalinas.

Los aluminatos cálcicos hidratados tri-fase (AF_t) $\text{C}_6\text{AS}_3\text{H}_{32}$ se forman por la hidratación de cemento Portland y tienen su origen en la ettringita pura con sustitución parcial de A (Al_2O_3) por F (Fe_2O_3) y SO_4^{-2} por otros aniones. Cristaliza en forma de finas agujas prismáticas.

Los sulfatos aluminatos cálcicos hidratados monofase (AF_m) $\text{C}_4\text{ASH}_{12}$ derivan del monosulfoaluminato puro con sustitución parcial de A (Al_2O_3) por F (Fe_2O_3) y SO_4^{-2} por otros aniones. Sus cristales son muy parecidos a los de la Portlandita (CH) aunque de mayor tamaño (10 μm) y con forma hexagonal¹⁵⁹.

La mayor parte de los sulfatos presentes en el cemento se combinan para formar ettringita o monosulfoaluminatos en las primeras 24 horas del proceso de fraguado¹⁶⁰, dispersándose uniformemente en la pasta del cemento. A esta ettringita se le denomina "ettringita primaria".

Si el hormigón fabricado con cemento se expone a la humedad de forma continuada, la ettringita puede disolverse y depositarse en los huecos y pequeñas fisuras del hormigón. Los cristales formados son aciculares y se disponen de forma radial cerrando los poros que ocupan. A esta ettringita se le denomina "ettringita secundaria" y presenta un tamaño de hasta dos micrómetros en sección transversal y de veinte a treinta micrómetros de largo. La presencia de este hidrato en el hormigón lo hace vulnerable al ataque por sulfatos.

¹⁵⁹ Jawed, I., J. Skalny and J. Young (1983). Structure and Performance of Cements, edited by P. Barnes. Chapter 6, Applied Science Publishers, London: 237-317.

¹⁶⁰ Klemm, W. A. and F. Miller (1997). Plausibility of delayed ettringite formation as a distress mechanism—Considerations at ambient and elevated temperatures. Proceedings of the 10th International Congress on the Chemistry of Cement.

La formación de tobermorita a partir de la hidratación de los silicatos bicálcicos (belita) y tricálcicos (alita) da lugar a agregaciones en forma de racimo que se van uniendo entre sí mediante fuerzas de adhesión o de Van Der Waals^{161,162} para formar la ligazón propia del cemento. De igual forma, las fibras de CSH y las agujas de ettringita se traban entre sí, enredándose con las placas de portlandita CH. La deposición de los geles de CSH determina la cohesión del conjunto, siendo difícil distinguir unos agregados de otros, especialmente si la relación a/c es baja¹⁵⁹.

La resistencia de la pasta del cemento infliere el comportamiento de la matriz cementicia en los morteros y hormigones de los que forma parte y es una consecuencia directa de las fuerzas de adhesión y cohesión (fuerzas de Van Der Waals) que se producen entre los diferentes cristales de CSH, de AF_t y AF_m y las placas de CH.

Por último, la durabilidad de los hormigones y morteros depende de la estabilidad de los componentes mineralógicos formados en los procesos de fraguado y endurecimiento. La desestabilización de los enlaces químicos por la acción de sustancias externas o la porosidad generadas en los procesos de hidratación pueden influir decisivamente en su durabilidad.

6.4.1.2. Mortero de referencia MR

Un análisis somero de la primera imagen microscópica del mortero de referencia MR (Figura 6.9) muestra gel de silicato cálcico hidratado (C-S-H) formado por la hidratación de la pasta de cementero, con poros interlaminares agregados entre los diferentes nódulos. Si se analiza más pormenorizadamente la matriz de un nódulo, pueden observarse la formación de pequeños grumos de gel de CSH junto con finas fibras de silicato cálcico hidratado cristalizadas en forma de acícula junto con otras, algo más gruesas de ettringita. Ambas fibras se orientan de forma radial hacia el exterior del nódulo, conformando una estructura cerrada y densa, perfectamente trabada. También se observan pequeñas láminas superpuestas de monosulfoaluminato (AF_m).

Las ramificaciones de C-H-S se orientan hacia los granos de árido situados alrededor del nódulo, anclando unos con otros, confiriendo cohesión a la matriz cementicia y rigidez al conjunto pasta-árido.

¹⁶¹ Powers, T. C. (1958). "Structure and physical properties of hardened Portland cement paste." *Journal of the American Ceramic Society* **41**(1): 1-6.

¹⁶² Chatterjee, A. (2003). *High-belite Portland cement-An update on development, characterization and applications*. Proceedings of the 11th International Congress on the Chemistry of Cements, Durban, South Africa.

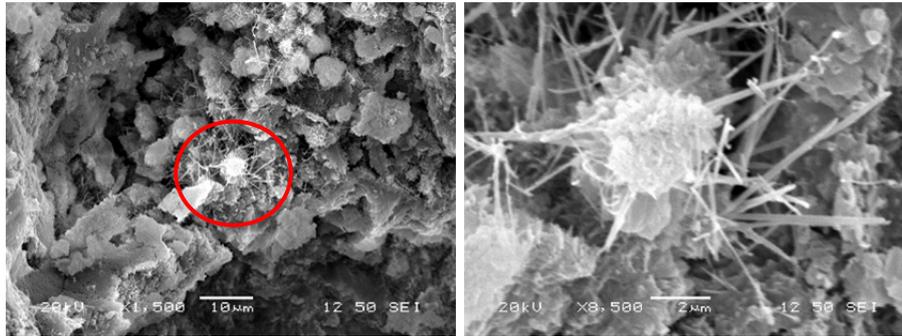


Figura 6.9 Microscopía electrónica de barrido MR (zona1)

La Figura 6.10 muestra los nódulos anidados de silicatos de calcio hidratados (C-S-H), en una fase más desarrollada, donde las matrices de gel de silicato se agrupan, dejando espacios cada vez más cerrados y trabados por las finas fibras de silicato cálcico CSH y las agujas de ettringita.

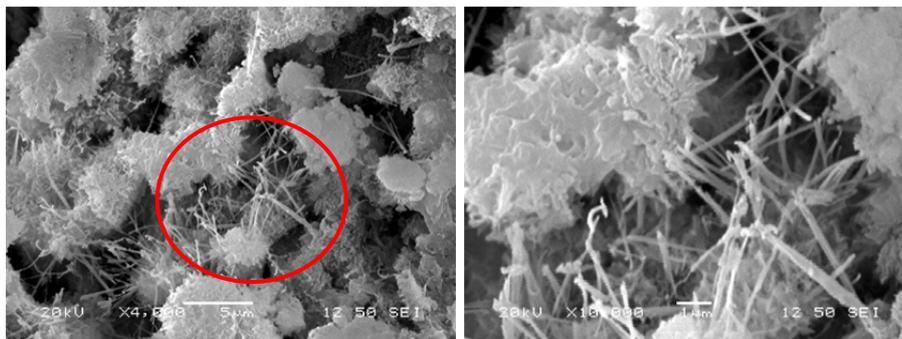


Figura 6.10 Microscopía electrónica de barrido MR (zona2)

En la Figura 6.11 se observa la formación de silicatos bicálcicos (SC_2) con un grado de hidratación progresivo, que da lugar a cúmulos que se van extendiendo hacia el interior conforme va avanzando el proceso de hidratación. En la Figura 6.12 pueden verse agregados de gel de sílice rodeando partículas de belita (silicato bicálcico) de forma esférica, que son más compactos y muestran un mayor desarrollo del proceso de hidratación.

Cuando la belita se hidrata se convierte en tobermorita gel e hidróxido de calcio, formas que se observan rodeando la esfera de este silicato cálcico (SC_2).

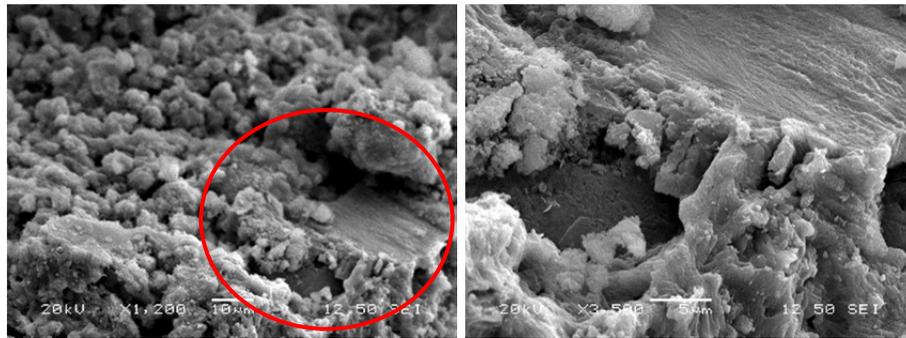


Figura 6.11 Microscopía electrónica de barrido MR (zona3)

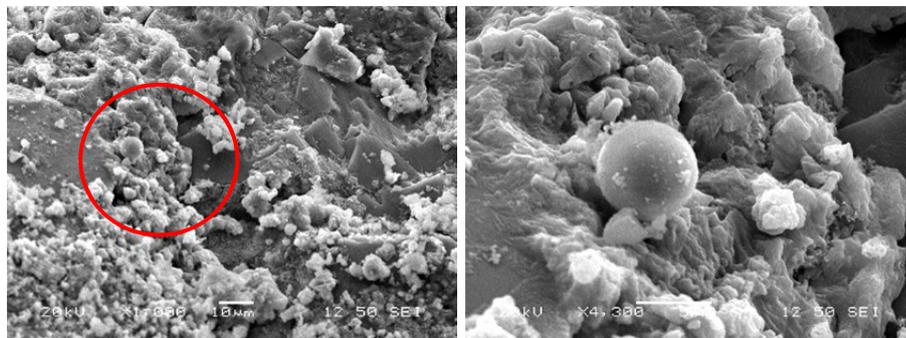


Figura 6.12 Microscopía electrónica de barrido MR (zona4)

Las imágenes correspondientes a la Figura 6.13 muestran de nuevo agregados amorfos de gel de CSH, con cristales de ettringita en forma de agujas y placas dispersas en forma de roseta de sulfoaluminato cálcico AF_m .

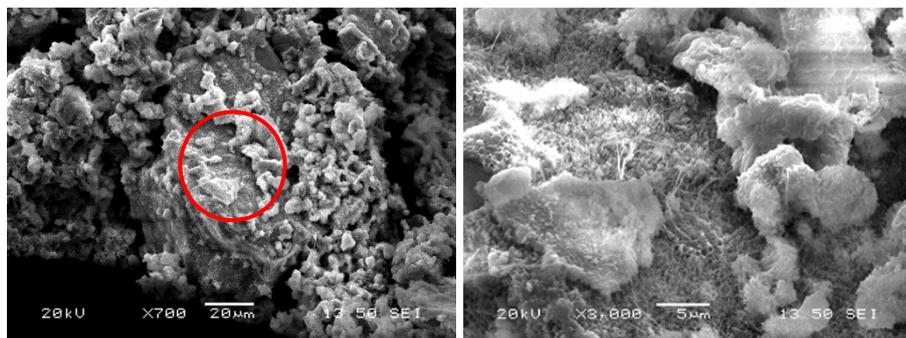


Figura 6.13 Microscopía electrónica de barrido MR (zona5)

6.4.1.3. Mortero con escorias MEB

En las imágenes de la Figura 6.14 y Figura 6.15, correspondientes al mortero MEB fabricado con escorias, la superficie de la pasta de cemento es homogénea y presenta poros de pequeño tamaño uniformemente distribuidos entre los granos de escoria.

La microestructura es una típica amalgama de CSH, con cristales de sulfoaluminatos y grandes cristales de CH en forma de placas de forma plana irregular. La matriz es densa y muy continua, aunque aparecen poros intercalados en la masa.

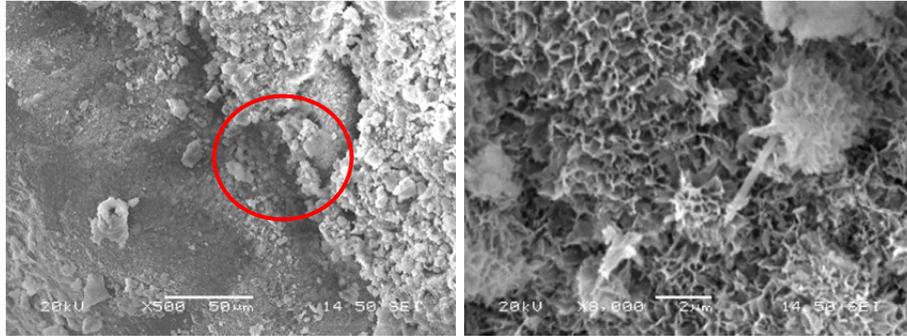


Figura 6.14 Microscopía electrónica de barrido MEB (zona1)

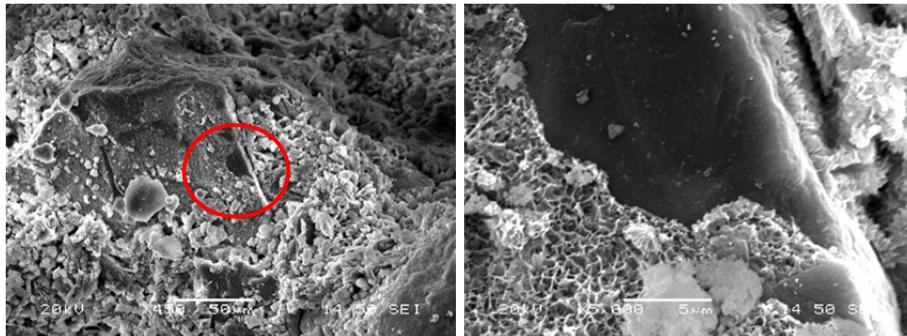


Figura 6.15 Microscopía electrónica de barrido MEB (zona2)

6.4.1.4. Mortero con escorias MED

Las imágenes correspondientes al mortero con escorias MED son muy ilustrativas y muestran la formación de diferentes componentes del cemento en combinación con los fragmentos de escoria.

La Figura 6.16 se puede observar un nódulo de gel de CSH en formación, con finos cristales de sulfoaluminato de calcio en expansión y cúmulos de CH en forma de pequeñas placas superpuestas en diferentes planos.

En el caso de la Figura 6.17, se observan cristales de CH muy amalgamados. Una ampliación de una parte de esta imagen permite observar las placas de CH junto con cristales de agujas más gruesas de sulfoaluminato en desarrollo.

La imagen de la Figura 6.18 muestra un conjunto de placas de portlandita CH rodeadas y trabadas con gel de sílice CSH y filamentos gruesos de sulfoaluminato.

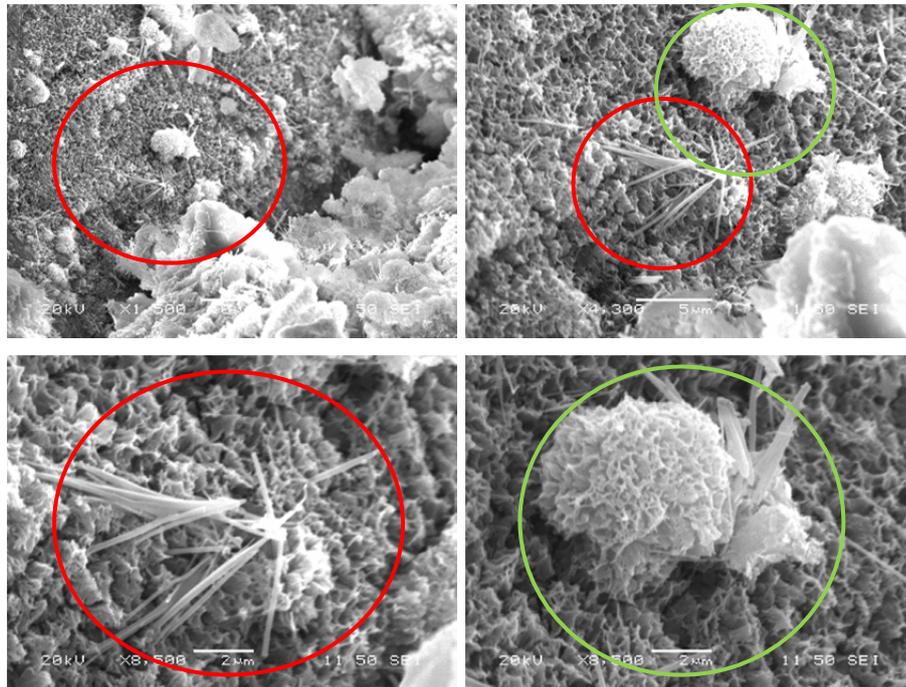


Figura 6.16 Microscopía electrónica de barrido MED (zona1)

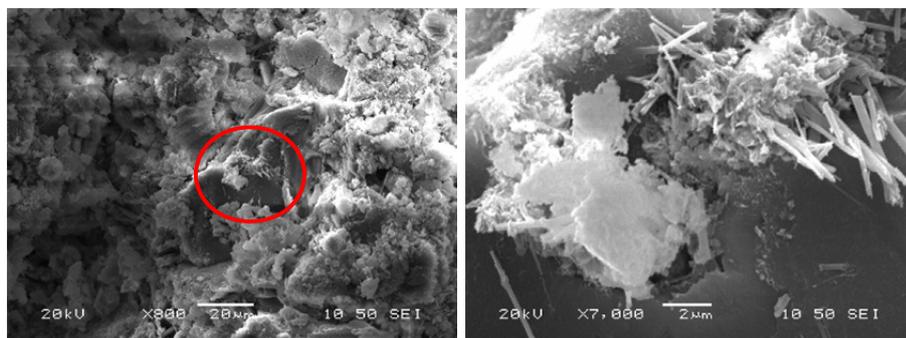


Figura 6.17 Microscopía electrónica de barrido MED (zona2)

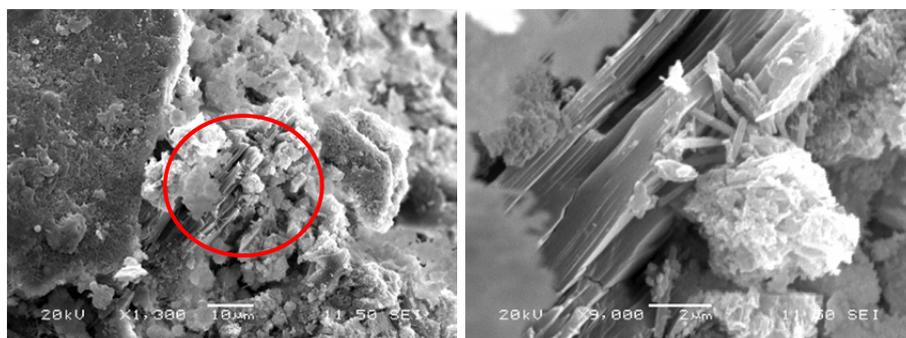


Figura 6.18 Microscopía electrónica de barrido MED (zona3)

6.4.1.5. Mortero con aditivo Cimsil C22: MEB-C22

El mortero MEB-C22 analizado presenta también un desarrollo uniforme del gel de CSH, con pequeños bloques de CH relativamente bien formados.

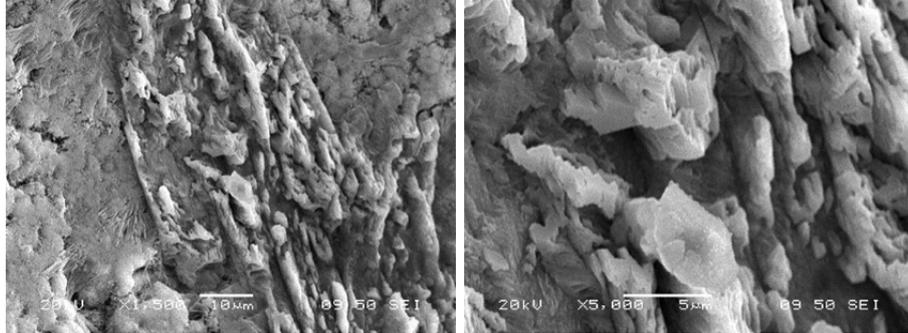


Figura 6.19 Microscopía electrónica de barrido MEB-C22 (zona1)

En la Figura 6.20, una ampliación de la misma, muestra la formación de cristales aciculares de sulfoaluminatos, muy ramificados, junto con nódulos en formación de CSH. Agrupadas aparecen cúmulos amorfos de CH.

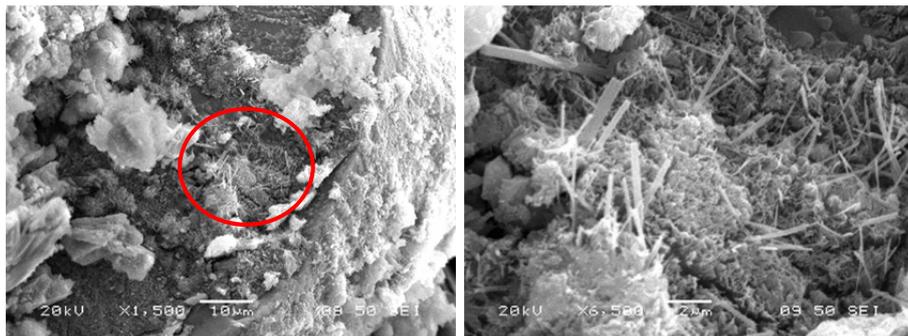


Figura 6.20 Microscopía electrónica de barrido MEB-C22 (zona2)

Las imágenes de la Figura 6.21, Figura 6.22 y Figura 6.23 no hacen sino confirmar la presencia de los componentes mineralógicos habituales en los conglomerados de cemento portland.

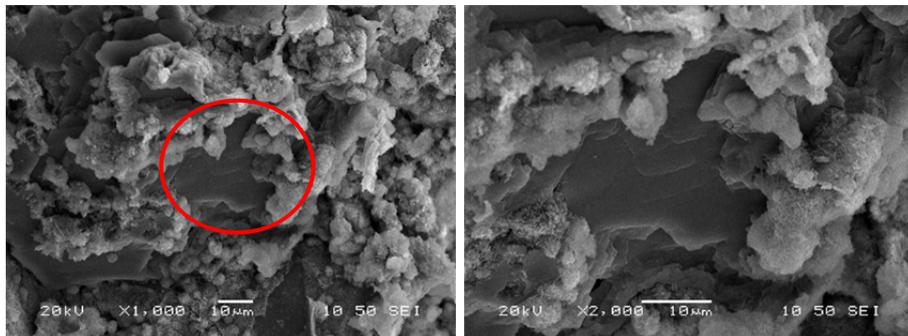


Figura 6.21 Microscopía electrónica de barrido MEB-C22 (zona3)

En la primera imagen se puede observar una placa de CH rodeada de gel de CSH en formación.

En la segunda imagen las placas de CH son más evidentes y se disponen en forma de planos paralelos junto con los nódulos de gel de CSH y pequeños cristales aciculares de sulfoaluminato.

La tercera imagen aparecen también amalgamas de placas de CH orientadas en distintas direcciones rodeadas de cúmulos de gel de CSH distribuidas uniformemente.

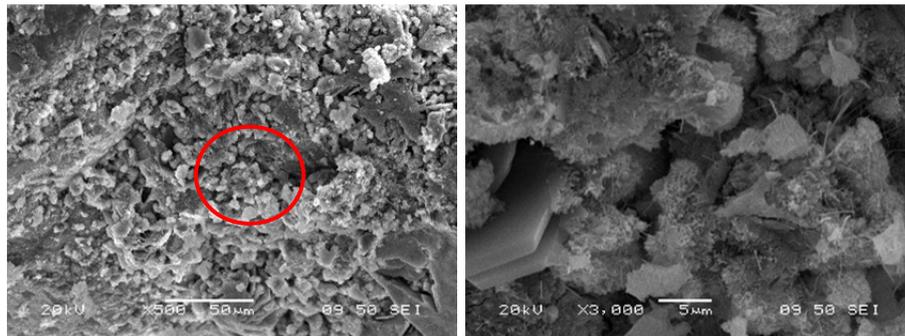


Figura 6.22 Microscopía electrónica de barrido MEB-C22 (zona4)

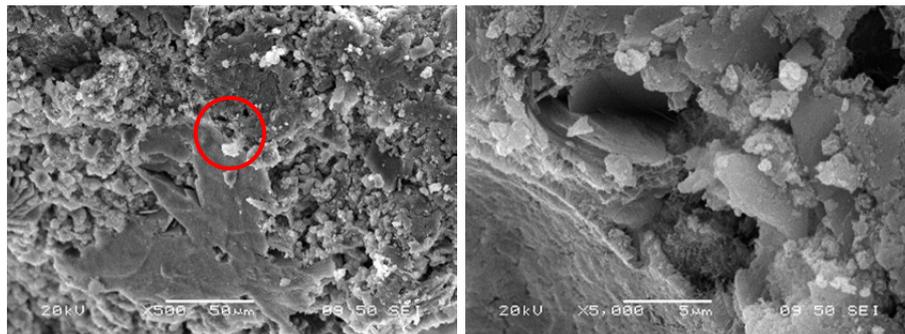


Figura 6.23 Microscopía electrónica de barrido MEB-C22 (zona5)

6.4.1.6. Mortero con aditivo PremorterMix 201: MEB 201

Analizada la estructura microscópica del mortero fabricado con el aireante-plastificante PremorterMix 201, en Figura 6.24 se puede observar una formación de gel de sílice CSH (tobermorita) muy agregado, pero con zonas que sugieren poros que ha dejado el agua retenida. Aunque la agregación de los silicatos cálcicos es bastante uniforme, se aprecian cúmulos de portlandita CH.

Esta disposición se confirma en la imagen de la Figura 6.25, donde aparecen rosetones dispersos que bien pueden corresponderse con agua retenida que ha desaparecido dejando este tipo de formas. Las zonas adyacentes se encuentran cubiertas por una espesa capa de silicatos cálcicos CSH con finas agujas, acompañadas de placas CH.

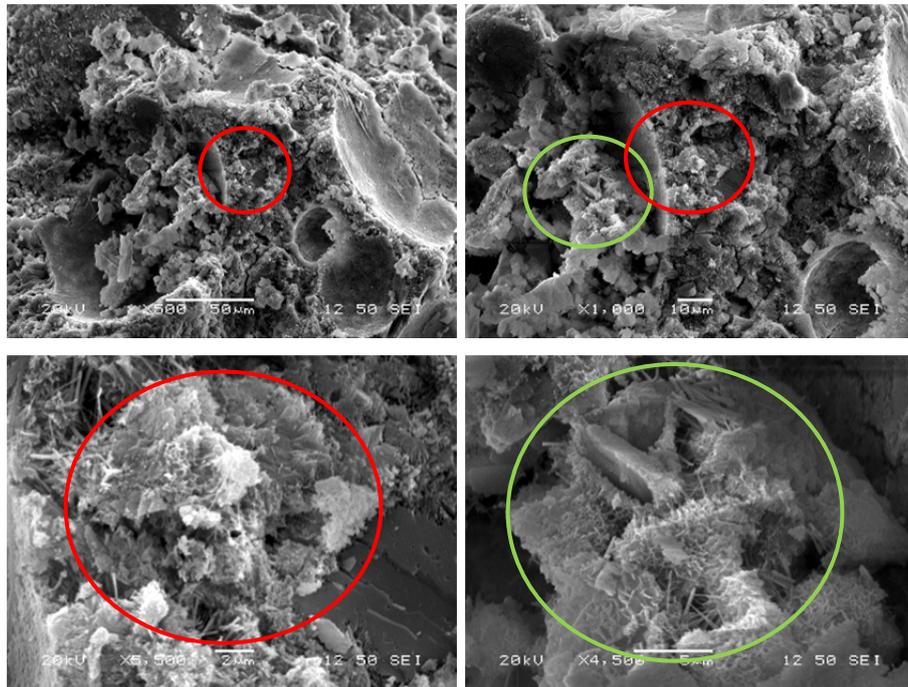


Figura 6.24 Microscopía electrónica de barrido MEB-201 (zona1)

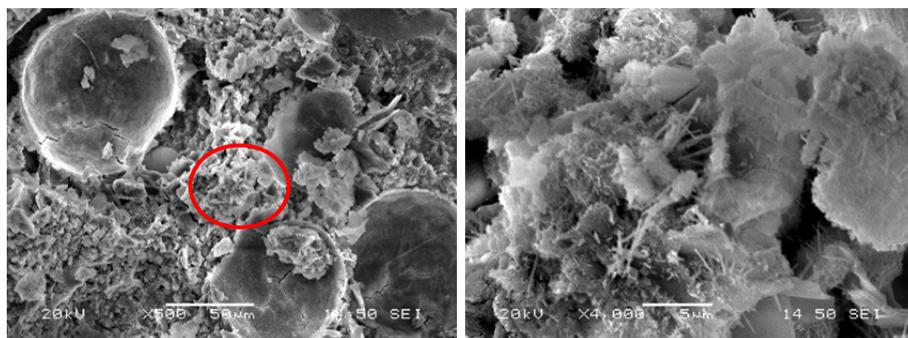


Figura 6.25 Microscopía electrónica de barrido MEB-201 (zona2)

6.4.2. Tomografía axial computerizada (TAC)

Para determinar la macroporosidad de los morteros, se emplea la Tomografía Axial Computerizada (TAC). Los datos obtenidos se procesan con el software "Mimics 10.0", de tal manera que las sucesivas imágenes captadas por el equipo se unen, reconstruyendo digitalmente una imagen tridimensional susceptible de ser estudiada.

Mediante esta técnica se pueden determinar los poros de tamaño superior a 170 µm. Se han analizado los morteros sin aditivos MR, MEA, MEB, MEC y MED, además de las mezclas con un 50% de sustitución del árido natural y que incorporan aditivos, MEB-C22, MEB-201 y MEB-202.

En la Tabla 6.47 se muestran los resultados cuantitativos en porcentaje de la macroporosidad de los morteros estudiados.

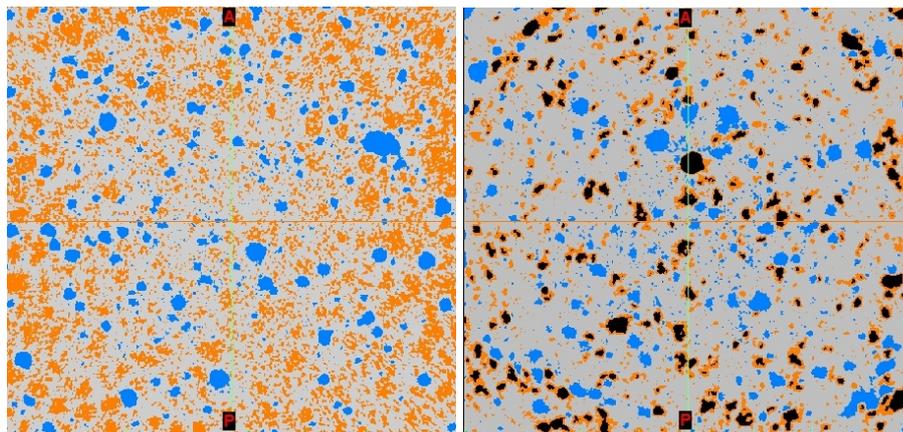
Mortero	Macroporosidad (%)
MR	7,75
MEA	8,15
MEB	8,73
MEC	8,86
MED	8,5
MEB-C22	15,72
MEB-201	21,92
MEB-202	24,67

Tabla 6.47 Macroporosidad de los morteros

En la Figura 6.26 están representadas las secciones axiales de los morteros. Como se puede observar, los materiales se diferencian por el color asignado en función de su densidad:

- Color azul los poros
- Color naranja el árido
- Color negro la escoria
- Color gris la pasta de cemento

Se aprecia claramente la distribución homogénea de los materiales que componen los morteros en todas las mezclas. También puede observarse que los morteros que incorporan aditivos en las mezclas tienen un volumen superior de poros.



Mortero MR

Mortero MEA

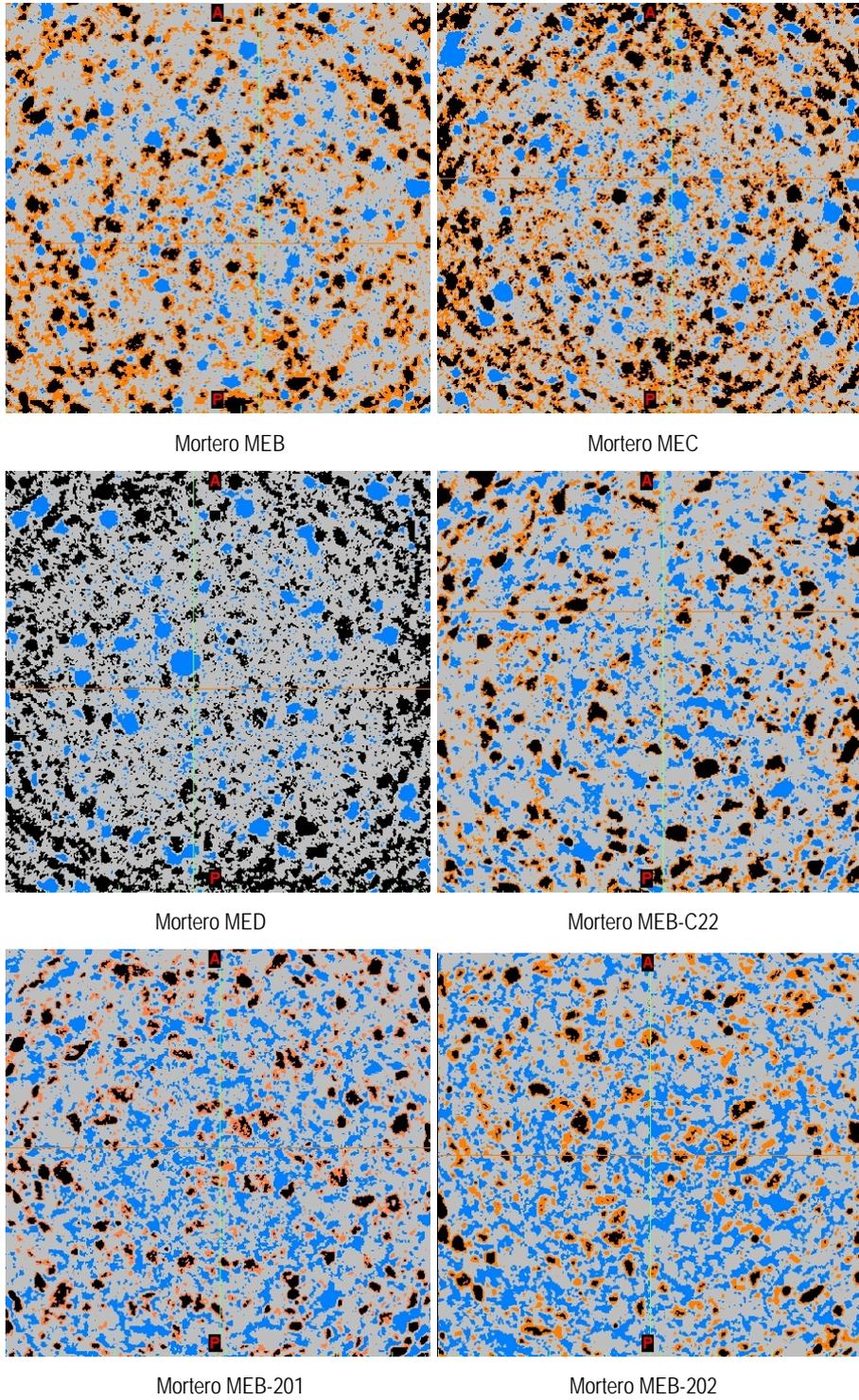


Figura 6.26 Tomografías axiales de los morteros

En la Figura 6.27 hasta la Figura 6.34, con la gama de colores anteriormente descrita, puede observarse en imágenes tridimensionales la distribución de los elementos que conforman los morteros.

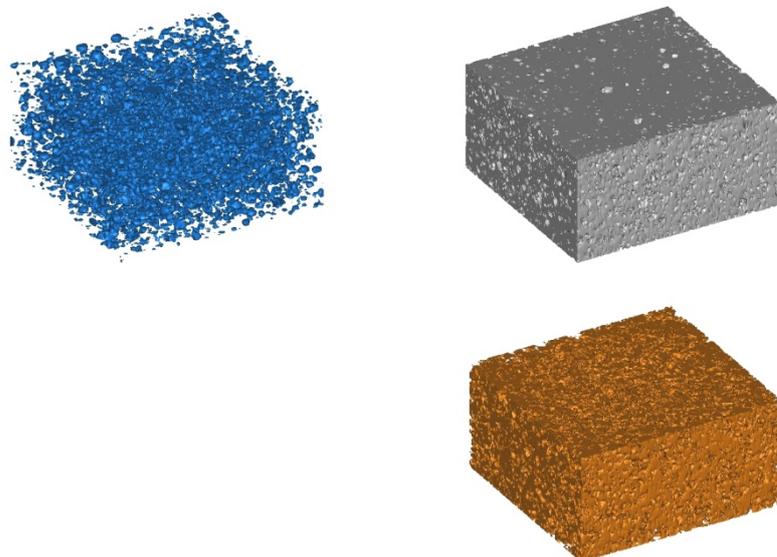


Figura 6.27 Imágenes 3D mortero MR

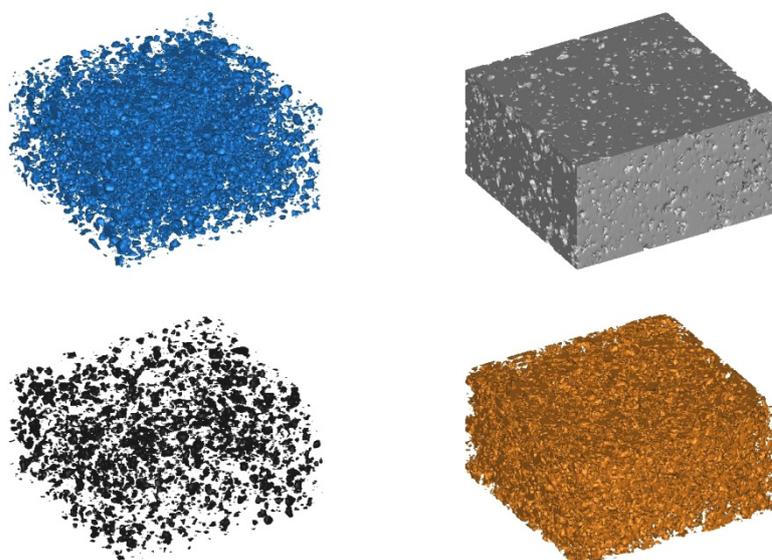


Figura 6.28 Imágenes 3D mortero MEA

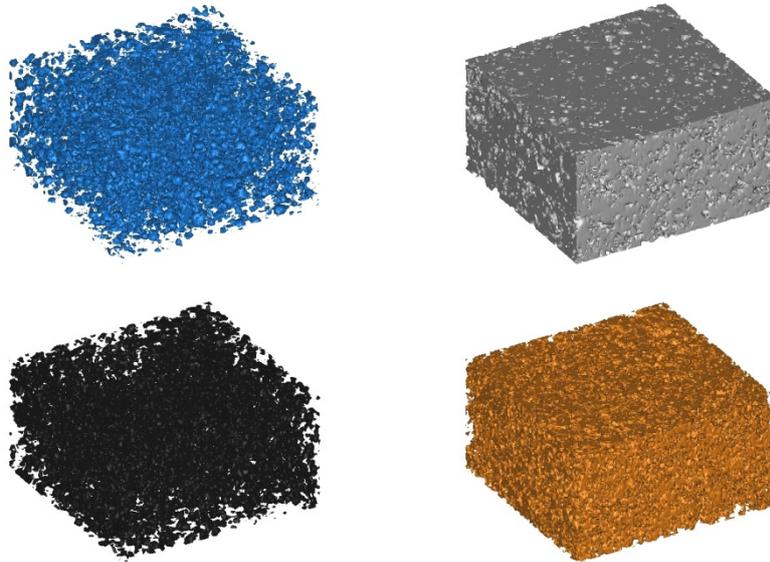


Figura 6.29 Imágenes 3D mortero MEB

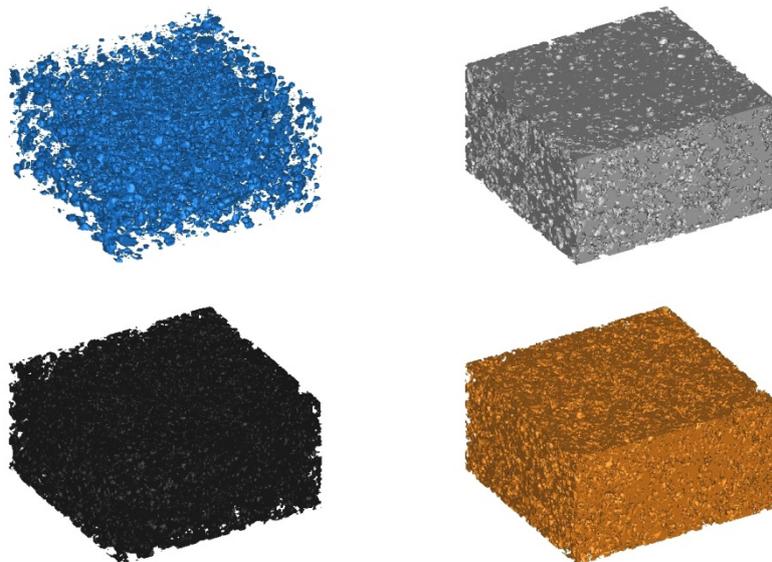


Figura 6.30 Imágenes 3D mortero MEC

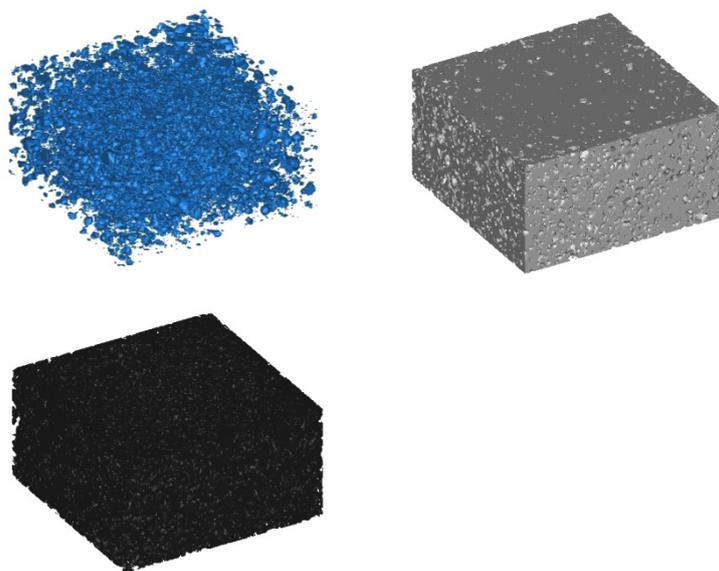


Figura 6.31 Imágenes 3D mortero MED

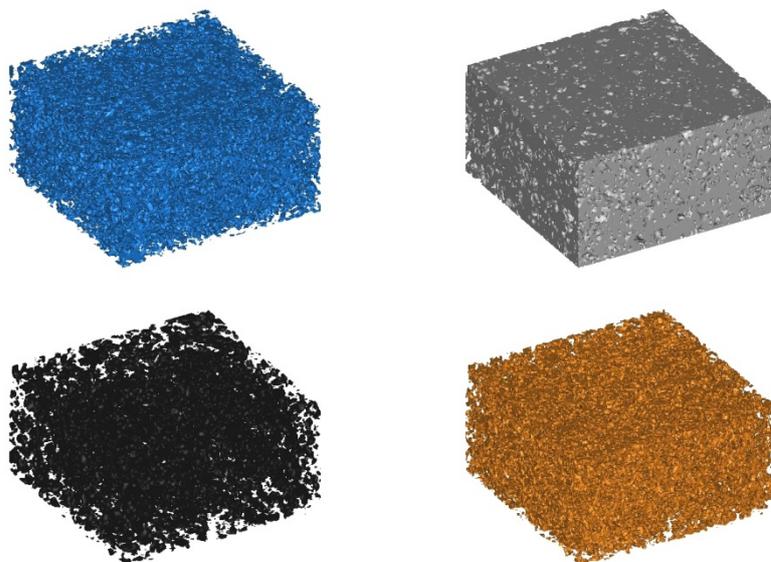


Figura 6.32 Imágenes 3D mortero MEB-C22

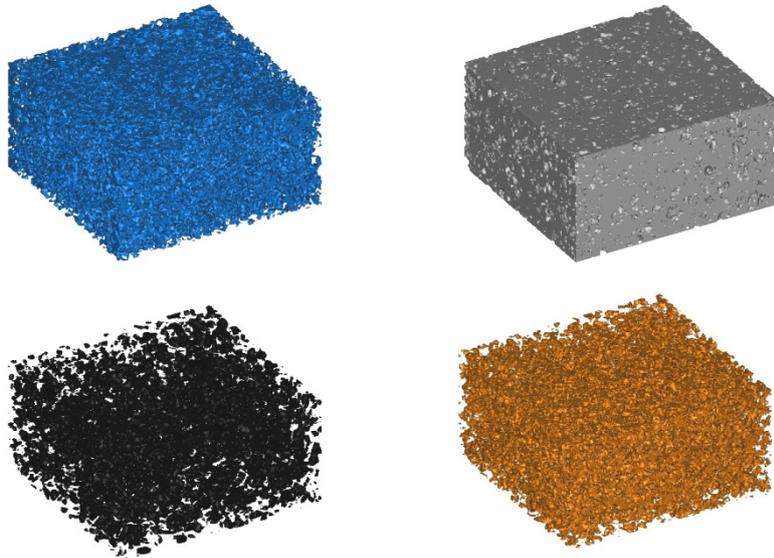


Figura 6.33 Imágenes 3D mortero MEB-201

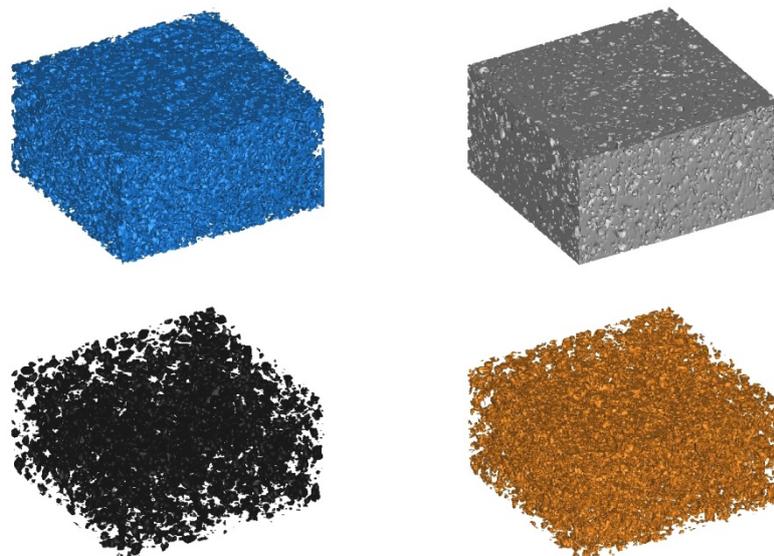


Figura 6.34 Imágenes 3D mortero MEB-202

6.4.3. Porosimetría de intrusión de mercurio MIP

Los datos referidos a la microporosidad de los morteros se recogen en la Tabla 6.48. Los poros de menor tamaño tienen un diámetro de 7 nm, siendo el tamaño superior obtenido con este ensayo de 215 μm .

El estudio confirma los datos obtenidos en los ensayos de aire ocluido y macroporosidad. Así, los morteros con más porosidad son aquellos que

incorporan aditivos en la dosificación, alcanzando el máximo valor con el aireante- plastificante PremorterMix 202.

Porosimetría de intrusión de mercurio MIP			
Mortero	Diámetro mínimo del poro (nm)	Diámetro máximo del poro (nm)	Microporosidad MIP (%)
MR	7,27	215.598,87	15,82
MEA	7,27	215.732,77	17,66
MEB	7,27	215.906,98	21,62
MEC	7,27	215.921,55	21,19
MED	7,27	215.643,22	23,48
MEB-C22	7,27	215.830,70	27,80
MEB-201	7,27	215.758,10	31,36
MEB-202	7,27	215.783,27	33,77

Tabla 6.48 Porosimetría de intrusión de mercurio MIP

El Gráfico 6.33 muestra el volumen intrusivo acumulado de los morteros ensayados. El Gráfico 6.34 muestra el pico máximo de la curva de distribución, que indica el diámetro crítico de poro, es decir, muestra el tamaño de poro interconectado que más veces se repite de manera continua, y que se corresponde con la pendiente de la curva del volumen intrusivo acumulado.¹⁶³

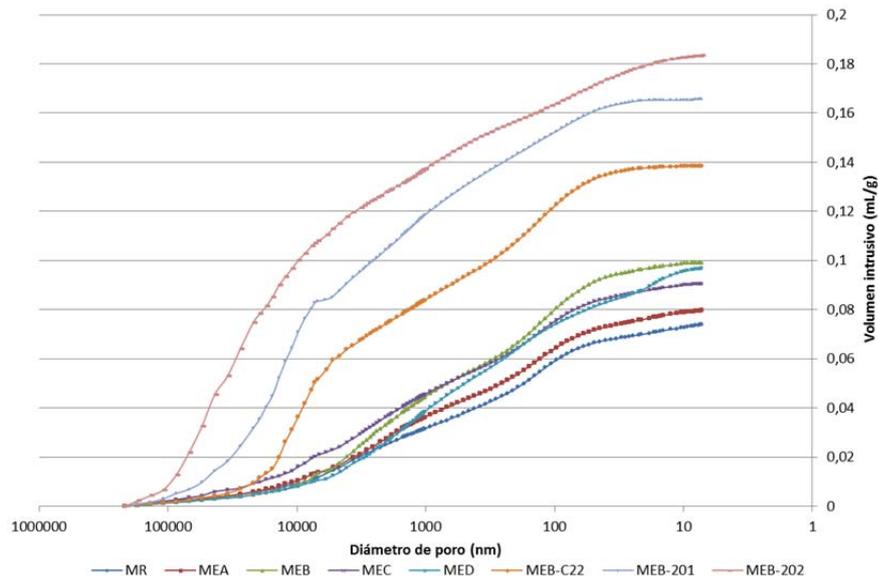


Gráfico 6.33 Volumen intrusivo acumulado

¹⁶³ Salas García, M. Á. (2014). Morteros aligerados con propiedades mejoradas fabricados con residuos de poliamida, Universidad de Burgos.

Las curvas del volumen intrusivo acumulado de poros permiten observar que, en los morteros dosificados sin aditivo, el diámetro crítico del poro se sitúa en torno a los 130 nm, con independencia del tipo de árido empleado. Sin embargo, este comportamiento difiere en las mezclas que incorporan aditivos.

En efecto, se comprueba que el empleo de aditivos produce un incremento del diámetro crítico del poro, ya que con el aditivo retenedor C22, el diámetro crítico alcanza los 12.275 nm, con PM-201 13.771 nm y con PM-202 54.789 nm.

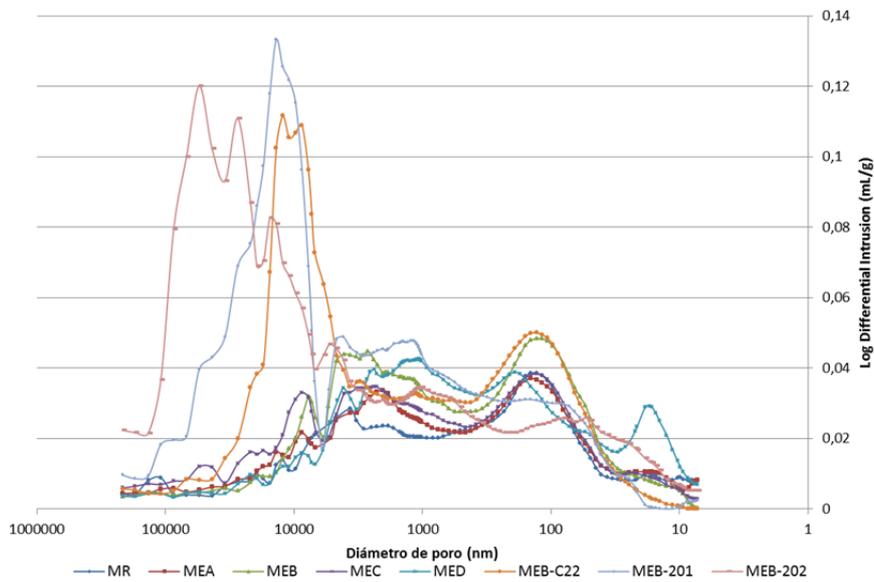


Gráfico 6.34 Curvas derivadas de volumen intrusivo

Capítulo VII

Durabilidad de los morteros

7. DURABILIDAD DE LOS MORTEROS

En este apartado se estudia el comportamiento de los morteros fabricados con escorias cuando se exponen a ambientes agresivos en situación de prestación. Para ello, se someten a ensayos de durabilidad que simulan ambientes reales en los que el mortero puede verse sometido a la acción de los agentes meteorológicos, como el hielo, los ciclos de humedad-sequedad o el choque térmico, o bien a ambientes agresivos extremos como la presencia de gases contaminantes.

Los ensayos de durabilidad permiten evaluar el comportamiento del material con el paso del tiempo, en función de su naturaleza y propiedades y se conocen también como “ensayos de envejecimiento acelerado”. Están descritos en el Capítulo “Procedimiento Experimental” y son los siguientes:

- Heladicidad
- Choque térmico
- Agua salina
- Cristalización de sales
- Atmósferas industriales. (Kesternich)

7.1. HELADICIDAD

No existe una norma específica sobre el método de ensayo a heladicidad de los morteros, por lo que se ha adaptado la norma UNE- EN 12371 “Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la resistencia a la heladicidad”.

La norma define el número de ciclos a los que se somete el material, en función de si es ensayo tecnológico o de identificación. En el ensayo tecnológico el número de ciclos está indicado en la correspondiente norma de producto, mientras que en el ensayo de identificación es el cliente quien especifica el número máximo de ciclos.

El número de ciclos hielo/deshielo se ha fijado tomando como referencia la normativa aplicable a la piedra natural. La norma UNE-EN 22202-1 “Productos de piedra natural. Construcción de pavimentos con piedra natural. Parte 1: Baldosas para pavimentación de suelos y escaleras”¹⁶⁴ señala que a los efectos de identificación del producto se deben realizar 56 ciclos de hielo/deshielo, y la norma UNE-EN 22203 “Productos de piedra natural. Construcción de aplacados de fachadas con piedra natural”¹⁶⁵

¹⁶⁴ AENOR (2011). "UNE-EN 22202-1 Productos de piedra natural. Construcción de pavimentos con piedra natural. Parte 1: Baldosas para pavimentación de suelos y escaleras", Madrid, Aenor.

¹⁶⁵ AENOR (2011). "UNE-EN 22203 Productos de piedra natural. Construcción de aplacados de fachadas con piedra natural", Madrid, Aenor.

recoge que el número de ciclos que hay que realizar depende de las condiciones climáticas del emplazamiento, definido por el denominado Índice de Hielo (I_g), del riesgo de saturación y de la vida útil de la piedra, que debe estar comprendida entre 20 y 40 años, mediante la siguiente expresión:

$$N = \frac{I_g \cdot n}{12} k$$

Donde,

- N número de ciclos hielo/deshielo
- I_g Índice de hielo del emplazamiento (44,5 en Burgos según tabla B.1 del anejo B)
- n número de años de exposición (entre 20 y 40 años)
- k factor de saturación (0,4 para aplacados de paredes verticales según tabla B.2 del anejo B)

En consecuencia, aplicando los criterios de la normativa indicada, en piezas utilizadas en el aplacados de fachadas para una vida útil estimada de 40 años, localizada en la ciudad de Burgos, son precisos 59 ciclos de hielo y deshielo para conocer el comportamiento del material a largo plazo.

No obstante, se opta por realizar 56 ciclos hielo/deshielo pues se consideran suficientes para caracterizar el material y conocer su respuesta frente a temperaturas sucesivas extremas.

Una vez completados los ciclos se valoran, para su verificación, los siguientes parámetros de caracterización:

1. Variación del volumen aparente de las probetas
2. Inspección visual
3. Variación resistencias mecánicas

7.1.1. Variación del volumen aparente

Los resultados obtenidos antes y después de realizar el ensayo se reflejan en la Tabla 7.1, en la que se recogen los pesos secos de las probetas antes y después del ensayo y su variación, así como el volumen aparente de las probetas, antes y después de los 56 ciclos, y también su posible variación.

Si, una vez realizado el ensayo, la pérdida o variación de peso fuese mayor del 3%, tendríamos una clasificación de material como “heladizo”.

En los morteros ensayados, las variaciones producidas son todas menores del 3%, por lo que puede afirmarse que todas las dosificaciones cumplen con el ensayo de heladicidad.

Ensayo heladicidad								
	Peso seco (gr)		Variación		Volumen aparente (dm ³)		Variación	
	Antes	Después	Unitaria	%	Antes	Después	Unitaria	%
MR	500,60	494,13	- 6,47	-1,29	0,2513	0,2495	-0,0018	-0,72
MEA	522,50	517,82	-4,68	-0,90	0,2525	0,2516	-0,0009	-0,38
MEB	540,50	532,83	-7,67	-1,42	0,2506	0,2474	-0,0032	-1,26
MEC	559,85	553,14	-6,71	-1,20	0,2499	0,2473	-0,0026	-1,02
MED	588,20	582,15	-6,05	-1,03	0,2530	0,2508	-0,0022	-0,85
MR-C22	445,55	443,41	-2,14	-0,48	0,2513	0,2503	-0,0010	-0,40
MEA-C22	457,95	456,29	-1,66	-0,36	0,2525	0,2515	-0,0010	-0,42
MEB-C22	481,45	480,03	-1,42	-0,29	0,2505	0,2496	-0,0009	-0,36
MEC-C22	506,45	504,94	-1,51	-0,30	0,2526	0,2515	-0,0011	-0,44
MED-C22	530,15	528,33	-1,82	-0,34	0,2513	0,2504	-0,0008	-0,34
MR-201	456,28	256,05	- 0,23	- 0,05	0,2536	0,2525	- 0,0011	- 0,45
MEA-201	475,24	4.75.55	0,31	0,07	0,2543	0,2529	- 0,0014	- 0,55
MEB-201	497,72	497.65	- 0,07	- 0,01	0,2541	0,2524	- 0,0017	- 0,67
MEC-201	510,98	511,05	0,08	0,01	0,2544	0,2534	- 0,0011	- 0,41
MED-201	528,48	529,05	0,57	0,11	0,2532	0,2517	- 0,0014	- 0,57
MR-202	396,09	396,80	0,71	0,18	0,2542	0,2523	- 0,0019	- 0,73
MEA-202	412,25	413,00	0,76	0,18	0,2538	0,2521	- 0,0018	- 0,69
MEB-202	429,03	429,35	0,32	0,07	0,2521	0,2498	- 0,0023	- 0,91
MEC-202	451,83	452,25	0,43	0,09	0,2542	0,2518	- 0,0024	- 0,94
MED-202	458,85	458,70	- 0,15	- 0,03	0,2494	0,2463	- 0,0031	- 1,26

Tabla 7.1 Variación en peso y volumen ensayo heladicidad

7.1.2. Inspección visual

De acuerdo con la normativa referida, es preciso examinar las caras y aristas de las probetas una vez concluidos los ciclos de hielo/deshielo, procediendo a realizar una evaluación final de su estado, tomando como referencia la siguiente escala:

- 0 probeta intacta
- 1 daños mínimos (redondeo mínimo de esquinas y aristas) que no comprometen la integridad de la probeta
- 2 una o varias grietas ($\leq 0,1$ mm de ancho) o rotura de pequeños fragmentos (≤ 30 mm², por fragmento)
- 3 una o varias grietas, agujeros o rotura de fragmentos de mayor tamaño que el definido en el punto 2, o una alteración del material

en vetas, o la probeta muestra signos importantes de desagregación o disolución

- 4 probeta con grandes grietas o rota en dos o más trozos o desintegrada

El aspecto de las probetas, antes y después del ensayo, se puede observar en las imágenes que se muestran de la Figura 7.1 a la Figura 7.5.



Figura 7.1 Antes y después ensayo heladicidad morteros sin aditivos



Figura 7.2 Mortero sin aditivos. Daños mínimos en probetas

No se aprecian diferencias sustanciales entre los morteros convencionales y los fabricados con escoria, sin embargo los materiales elaborados sin aditivos presentan un redondeo de esquinas y aristas más acusado, aunque leve, que las piezas fabricadas con aditivos.

Una primera inspección visual de las probetas permite comprobar que, aparentemente, están en perfecto estado, sin afecciones significativas y con un aspecto semejante al que presentaban antes de ser sometidas a los ciclos hielo/deshielo. No se constata la presencia de fisuras, grietas, laminaciones o desconchados apreciables. Únicamente las probetas elaboradas con mortero sin aditivos presentan un ligero redondeo de esquinas y aristas, por lo que, de acuerdo con la escala recogida en la norma, podrían catalogarse como “1”, pues no se producen alteraciones significativas que afecten a su integridad. El resto de probetas podrían calificarse como “0”, ya que no presentan alteración alguna.



Figura 7.3 Antes y después ensayo heladicidad morteros C22



Figura 7.4 Antes y después ensayo heladicidad morteros PM201



Figura 7.5 Antes y después ensayo heladicidad morteros PM 202

Como conclusión a la evaluación organoléptica de las probetas se puede afirmar que éstas no presentan alteraciones significativas en su aspecto, por lo que los morteros ensayados son muy estables frente a las variaciones bruscas de temperatura.

7.1.3. Variación de resistencias

Una vez transcurridos los 56 ciclos hielo/deshielo se han realizado los correspondientes ensayos mecánicos de rotura a flexión y compresión. Estos resultados se han comparado con los registros obtenidos a 90 días. (Tabla 7.2)

Resistencias mecánicas N/mm ²						
	Flexión			Compresión		
	90 D	Después ensayo heladicidad	Variación %	90 D	Después ensayo heladicidad	Variación %
MR	4,36	6,02	+ 38,15%	16,47	24,92	+ 51,29%
MEA	4,95	5,96	+ 20,50%	20,42	25,87	+ 26,70%
MEB	5,07	5,89	+ 16,26%	20,53	24,10	+ 17,37%
MEC	5,04	5,53	+ 9,75%	22,04	25,05	+13 64%
MED	5,27	5,68	+ 7,85%	22,15	23,08	+ 4,18%
MR-C22	4,92	3,70	- 24,73%	11,99	13,70	+ 14,22%
MEA-C22	4,69	3,87	- 17,54%	11,43	14,34	+ 25,48%
MEB-C22	3,96	4,11	+ 3,87%	12,27	14,92	+ 21,60%
MEC-C22	4,32	4,16	- 3,70%	12,22	14,94	+ 22,24%
MED-C22	4,14	4,27	+ 3,03%	12,29	16,38	+ 33,28%
MR-201	3,84	4,43	+ 15,36%	12,94	19,55	+ 51,08%
MEA-201	3,50	4,31	+ 23,21%	13,76	18,47	+ 34,22%
MEB-201	3,37	4,77	+ 41,53%	13,27	17,68	+ 33,25%
MEC-201	3,24	4,28	+ 32,02%	13,88	16,69	+ 20,26%
MED-201	3,74	4,20	+ 12,17%	14,82	14,90	+ 0,56%
MR-202	2,43	2,12	-12,71%	7,41	6,49	-12,41%
MEA-202	2,26	2,26	+ 0,08%	6,50	7,09	+ 9,09%
MEB-202	2,00	2,36	+ 17,77%	5,75	6,22	+ 8,15%
MEC-202	2,12	2,16	+ 1,71%	5,96	5,70	- 4,36%
MED-202	2,04	2,05	+ 0,53%	6,04	5,96	-1,36%

Tabla 7.2 Resistencias mecánicas ensayo heladicidad

Como se puede observar, la resistencia mecánica de los morteros, una vez sometidos al ensayo de heladicidad, aumenta su valor. Este resultado es coherente con el comportamiento de los morteros estudiado en el apartado anterior, ya que éstos no sufren alteraciones significativas en su estructura y, como se puede comprobar, siguen con el proceso de endurecimiento, tal y como se evidencia por los resultados obtenidos a la edad de 28 y 90 días, respectivamente.

La mejora en la resistencia a flexión y compresión se justifica también por el tiempo transcurrido entre el amasado de las mezclas y el comienzo del ensayo de heladicidad, ya que hasta que no se disponen de una serie de tres probetas por amasada, no se comienza con el proceso de los 56 ciclos de hielo y deshielo.

7.2. CHOQUE TÉRMICO

Mediante este ensayo se valora el comportamiento de las muestras cuando están sometidas a ciclos alternos de humedad-sequedad. Este proceso de cambios bruscos de temperatura y humedad es el ambiente habitual de los materiales colocados en el exterior de los edificios, siendo el mortero uno de los más expuestos, tanto en juntas de fábricas como en revestimientos continuos de paramentos.

Un mortero colocado en una zona del edificio con una orientación sur o suroeste, en pleno verano, puede llegar a alcanzar temperaturas que pueden rondar los 50°C. Pero en esta situación, si se produce una tormenta, el mortero se humedece y la temperatura de la fachada puede bajar bruscamente, del orden de 30°C ó 40°C.

Estas variaciones de temperatura y humedad crean tensiones en el interior del mortero, debido a la diferencia de temperatura entre la cara expuesta y la cara interior del mortero.

Al igual que sucede con el ensayo de heladicidad, no existe norma específica para este tipo de situaciones, por lo que, de nuevo, se aplica por analogía la norma UNE-EN 14066 "Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la resistencia al envejecimiento por choque térmico".

Tal y como se indica en la norma, las probetas se someten a 20 ciclos de humedad (6 horas sumergidas en agua destilada)-sequedad (18 horas en horno ventilado a 105°C). Una vez completados los ciclos se valoran para su verificación los siguientes parámetros de caracterización:

1. Variación del peso seco de las probetas
2. Inspección visual
3. Variación resistencias mecánicas

7.2.1. Variación del peso seco

Los resultados obtenidos se recogen en la Tabla 7.3, en la que se muestran los pesos secos de las probetas antes y después del ensayo, y su variación después de los 20 ciclos de humedad- sequedad.

Como puede comprobarse, las variaciones de masa en las probetas después de realizados los ensayos no son importantes, resultando todas ellas inferiores al 1,0%, lo que muestra la estabilidad de los morteros ante este tipo de afección climatológica.

Ensayo choque térmico				
	Peso seco (gr)		Variación	
	Antes	Después	Unitaria	%
MR	500,90	501,05	0,15	0,03%
MEA	519,15	519,55	0,40	0,08%
MEB	536,60	536,90	0,30	0,06%
MEC	561,25	561,50	0,25	0,04%
MED	582,45	582,70	0,25	0,04%
MR-C22	433,4	435,90	2,50	0,58%
MEA-C22	459,1	461,60	2,50	0,54%
MEB-C22	481,6	484,60	3,05	0,63%
MEC-C22	501,0	504,30	3,35	0,67%
MED-C22	534,1	537,50	3,40	0,64%
MR-201	449,3	452,60	3,35	0,74%
MEA-201	471,0	474,72	3,72	0,79%
MEB-201	488,5	492,31	3,86	0,79%
MEC-201	506,4	510,39	3,99	0,79%
MED-201	518,8	523,50	4,70	0,91%
MR-202	384,4	387,75	3,35	0,87%
MEA-202	410,8	413,88	3,13	0,76%
MEB-202	425,7	429,39	3,69	0,87%
MEC-202	440,4	443,96	3,61	0,82%
MED-202	457,9	461,72	3,87	0,85%

Tabla 7.3 Variación de peso ensayo choque térmico

7.2.2. Inspección visual

La norma indica que debe hacerse un análisis visual comparativo de las probetas con las de los morteros de referencia, y comprobar la presencia de posibles oxidaciones, cambios de tonalidad en el color, aparición de manchas, hinchamientos, agrietamientos, escamaciones o exfoliaciones

En la Figura 7.6 a Figura 7.9 puede observarse el aspecto visual de las probetas, antes y después de ser sometidas al ensayo. En ninguno de los casos se aprecia alteración alguna en las mismas, ya que todas muestran un buen aspecto, sin cambios significativos que indiquen deterioro o desagregación en la estructura del mortero.



Figura 7.6 Antes y después ensayo choque térmico mortero sin aditivos



Figura 7.7 Antes y después ensayo choque térmico mortero C22



Figura 7.8 Antes y después ensayo choque térmico mortero PM201



Figura 7.9 Antes y después ensayo choque térmico mortero PM202

7.2.3. Variación de resistencias

Una vez transcurridos los 20 ciclos humedad-sequedad se han realizado los correspondientes ensayos mecánicos de rotura a flexión y compresión.

Estos resultados se han comparado con los valores obtenidos a 90 días. (Tabla 7.4)

Resistencias mecánicas N/mm ²						
	Flexión			Compresión		
	90 D	Después ensayo choque térmico	Variación %	90 D	Después ensayo choque térmico	Variación %
MR	4,36	3,77	- 13,45%	16,47	22,47	+ 36,42%
MEA	4,95	3,73	- 24,72 %	20,42	21,12	+ 3,44 %
MEB	5,07	3,70	-26,96 %	20,53	20,11	- 2,04 %
MEC	5,04	3,82	-24,20 %	22,04	21,83	- 0,96 %
MED	5,27	3,73	-29,29 %	22,15	19,15	- 13,55 %
MR-C22	4,92	2,40	-51,17 %	11,99	11,18	- 6,75 %
MEA-C22	4,69	2,32	- 50,53 %	11,43	11,71	+ 2,47 %
MEB-C22	3,96	2,31	- 41,70 %	12,27	11,83	- 3,59%
MEC-C22	4,32	2,46	-43,03 %	12,22	11,61	- 5,00 %
MED-C22	4,14	3,98	-3,76 %	12,29	15,47	+ 25,89%
MR-201	3,84	3,32	-13,64 %	12,94	16,61	+ 28,36%
MEA-201	3,50	3,69	+ 5,47%	13,76	15,27	+ 10,98%
MEB-201	3,37	3,96	+17,54 %	13,27	14,99	+ 12,97%
MEC-201	3,24	3,45	+ 6,34 %	13,88	14,56	+ 4,89 %
MED-201	3,74	3,79	+1,21 %	14,82	13,76	- 7,16 %
MR-202	2,43	1,90	-21,88 %	7,41	6,05	- 18,33 %
MEA-202	2,26	1,99	- 11,85 %	6,50	6,55	+ 0,84 %
MEB-202	2,00	1,75	- 12,70 %	5,75	5,31	- 7,69 %
MEC-202	2,12	1,57	-25,93%	5,96	5,55	- 6,83%
MED-202	2,04	1,85	- 9,24 %	6,04	5,62	- 6,95%

Tabla 7.4 Resistencias mecánicas ensayo choque térmico

Los valores obtenidos muestran, en general, un buen comportamiento mecánico de los morteros, tanto a flexión como a compresión, con resistencias iguales o superiores a los 5 N/mm², referencia establecida como objetivo en esta Tesis.

Si se analizan los resultados por separado, la resistencias a flexión disminuyen ligeramente, salvo en el caso de los morteros dosificados con aditivo PM201. Por el contrario, los valores obtenidos en el ensayo a compresión son muy parecidos a los registrados a 90 días. Cabe destacar el comportamiento de los morteros dosificados con aditivo PM201, que han

mejorado su resistencia mecánica a compresión después de concluido el ensayo.

7.3. AGUA SALINA

El procedimiento aplicado se describe en la norma americana ASTM D 4792-00 "Standard method for potencial expansion of aggregates from hydration reactions". Ésta permite determinar la expansión o hinchamiento potencial de los conglomerados que contienen componentes sensibles a la hidratación y aumento de volumen, tales como el calcio libre y óxidos de magnesio que se producen en algunos subproductos industriales, como es el caso de las escorias.

Este ensayo está orientado al estudio de conglomerados de hormigón fabricados con residuos siderúrgicos, pero puede también aplicarse a los morteros objetos de estudio en este trabajo por la analogía existente entre estos dos materiales.

Mediante la inmersión de las probetas de mortero en agua de mar a altas temperaturas, se puede estudiar la estabilidad de las escorias utilizadas en las mezclas así como el grado de meteorización de sus componentes potencialmente expansivos.

De acuerdo con los postulados de la norma, las probetas se sumergen en agua salina a 70°C durante 32 días. Una vez transcurrido este tiempo, se valoran para su verificación los siguientes parámetros de caracterización:

1. Variación del peso seco de las probetas y expansión
2. Inspección visual
3. Variación resistencias mecánicas

7.3.1. Variación del peso seco y expansión

Los resultados obtenidos se recogen en la Tabla 7.5, en la que se muestran los pesos secos de las probetas antes y después del ensayo y su variación después de estar 32 días sumergidas en agua marina a 70°C.

Las probetas muestran un aspecto con cambios de tonalidad variables en toda la superficie, producto de la adhesión de sales, que incluso han entrado en su red intersticial de poros. Por ello, una vez pesadas de nuevo, se aprecian pequeños incrementos en su masa, que son más acusados en los morteros dosificados sin aditivos, tanto en el caso de los fabricados con arena silícica natural como con escorias siderúrgicas, aumentando el peso aproximadamente un 3,0%.

Por el contrario, los morteros dosificados con aditivos, tanto de la familia de los retenedores como la de los aireantes-plastificantes, apenas incrementan un 1,0% su peso.

Ensayo agua salina				
Variación peso seco				
	Peso seco (gr)		Variación	
	Antes	Después	Unitaria	%
MR	504,40	522,72	+ 18,32	+ 3,63%
MEA	532,45	550,27	+ 17,82	+ 3,35%
MEB	536,95	550,24	+ 13,29	+ 2,48%
MEC	553,05	568,92	+ 15,87	+ 2,87%
MED	590,55	608,44	+ 17,89	+ 3,03%
MR-C22	446,1	451,46	+ 5,36	+ 1,20%
MEA-C22	463,0	470,39	+ 7,44	+ 1,61%
MEB-C22	481,8	489,50	+ 7,75	+ 1,61%
MEC-C22	507,9	515,95	+ 8,10	+ 1,59%
MED-C22	529,0	536,63	+ 7,63	+ 1,44%
MR-201	448,3	454,43	+ 6,13	+ 1,37%
MEA-201	469,6	475,72	+ 6,17	+ 1,31%
MEB-201	486,7	491,96	+ 5,26	+ 1,08%
MEC-201	499,2	504,44	+ 5,29	+ 1,06%
MED-201	530,4	536,12	+ 5,72	+ 1,08%
MR-202	394,3	397,16	+ 2,86	+ 0,72%
MEA-202	412,7	415,85	+ 3,14	+ 0,76%
MEB-202	427,0	429,92	+ 2,91	+ 0,68%
MEC-202	443,6	446,72	+ 3,17	+ 0,71%
MED-202	457,2	460,82	+ 3,67	+ 0,80%

Tabla 7.5 Variación del peso seco. Ensayo agua salina

De igual forma, en la Tabla 7.6 pueden observarse los valores iniciales y finales de la longitud mayor de las probetas sometidas a ensayo.

Los resultados son también concluyentes al comprobarse que los morteros dosificados sin aditivos presentan expansiones más acusadas que los fabricados con aditivos, con independencia del tipo de árido, natural o de escoria, utilizado en las mezclas.

Ensayo agua salina				
Expansión				
	Dimensión mayor (mm)		Variación	
	Antes	Después	Unitaria (mm)	%
MR	160,05	160,35	+ 0,30	+ 0,19%
MEA	160,25	160,65	+ 0,40	+ 0,25%
MEB	160,25	160,40	+ 0,15	+ 0,09%
MEC	160,15	160,35	+ 0,20	+ 0,12%
MED	160,10	160,30	+ 0,20	+ 0,12%
MR-C22	160,10	160,25	+ 0,15	+ 0,09%
MEA-C22	160,15	160,30	+ 0,15	+ 0,09%
MEB-C22	160,00	160,10	+ 0,10	+ 0,06%
MEC-C22	160,15	160,30	+ 0,15	+ 0,09%
MED-C22	160,00	160,15	+ 0,15	+ 0,09%
MR-201	160,05	160,15	+ 0,10	+ 0,06%
MEA-201	160,00	160,10	+ 0,10	+ 0,06%
MEB-201	160,25	160,25	+ 0,00	+ 0,00%
MEC-201	160,35	160,45	+ 0,10	+ 0,06%
MED-201	160,35	160,45	+ 0,10	+ 0,06%
MR-202	160,10	160,25	+ 0,15	+ 0,09%
MEA-202	159,80	159,90	+ 0,10	+ 0,06%
MEB-202	160,10	160,20	+ 0,10	+ 0,06%
MEC-202	160,00	160,10	+ 0,10	+ 0,06%
MED-202	160,05	160,15	+ 0,10	+ 0,06%

Tabla 7.6 Expansión. Ensayo agua salina

7.3.2. Inspección visual

Como en los anteriores ensayos de durabilidad, se realiza un examen visual del aspecto que presentan las probetas, una vez concluidos los 32 días de ensayo sumergidas en agua salina. Se comprueba, por comparación con las probetas de referencia posibles oxidaciones, cambios de color o de tonalidad, aparición de manchas, hinchamientos, agrietamientos, escamaciones o exfoliaciones.

En la Figura 7.10 a Figura 7.13 puede observarse el aspecto visual de las probetas, antes y después de ser sometidas al ensayo. En ninguno de los casos se aprecia alteración alguna en las mismas, por lo que se puede

concluir que no se ha producido deterioro en las muestras que provoque la desagregación de la estructura del mortero.



Figura 7.10 Mortero sin aditivos. Antes y después ensayo agua salina



Figura 7.11 Mortero C22. Antes y después ensayo agua salina



Figura 7.12 Mortero PM201. Antes y después ensayo agua salina

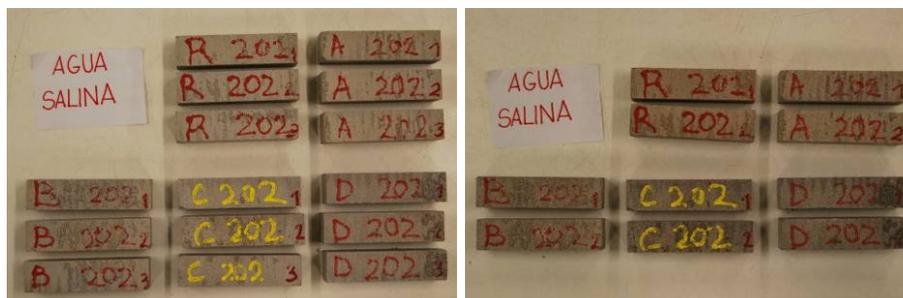


Figura 7.13 Mortero PM202. Antes y después ensayo agua salina

Los morteros ensayados no presentan alteraciones significativas en su aspecto externo, no evidenciándose la presencia de oxidaciones,

alteraciones en su coloración, aparición de manchas, hinchamientos, agrietamientos, escamaciones o exfoliaciones.

Al concluir los ciclos, lo único reseñable es el depósito de sales cristalizadas en la superficie exterior de las probetas. (Figura 7.14)



Figura 7.14 Depósito de sales en superficie

7.3.3. Variación de resistencias

Una vez transcurridos los 32 días sumergidas en agua salina, se realizan a las probetas los correspondientes ensayos mecánicos de rotura a flexión y compresión. Los resultados se recogen en la Tabla 7.7, donde también se muestra un estudio comparativo con los valores de resistencia obtenidos a los 90 días.

Resistencias mecánicas N/mm ²						
	Flexión			Compresión		
	90 D	Después ensayo agua salina	Variación %	90 D	Después ensayo agua salina	Variación %
MR	4,36	4,29	-1,63%	16,47	21,39	29,89%
MEA	4,95	4,55	-8,14%	20,42	22,63	10,84%
MEB	5,07	4,14	-18,41%	20,53	21,38	4,16%
MEC	5,04	4,75	-5,83%	22,04	20,96	-4,91%
MED	5,27	3,97	-24,62%	22,15	20,60	-6,98%
MR-C22	4,92	4,18	-14,97%	11,99	15,02	25,30%
MEA-C22	4,69	3,94	-16,04%	11,43	13,39	17,11%
MEB-C22	3,96	3,89	-1,75%	12,27	14,00	14,09%
MEC-C22	4,32	3,81	-11,84%	12,22	14,23	16,48%
MED-C22	4,14	4,64	12,09%	12,29	14,49	17,89%
MR-201	3,84	3,61	-6,01%	12,94	17,99	39,06%
MEA-201	3,50	3,47	-0,89%	13,76	17,86	29,78%
MEB-201	3,37	3,66	8,49%	13,27	18,08	36,24%
MEC-201	3,24	3,68	13,57%	13,88	16,85	21,42%
MED-201	3,74	4,41	17,81%	14,82	15,17	2,33%
MR-202	2,43	3,07	26,35%	7,41	6,52	-12,07%
MEA-202	2,26	3,15	39,48%	6,50	7,40	13,89%
MEB-202	2,00	2,70	34,77%	5,75	5,89	2,47%
MEC-202	2,12	2,66	25,48%	5,96	6,08	1,93%
MED-202	2,04	2,39	17,19%	6,04	5,50	-8,94%

Tabla 7.7 Resistencias mecánicas ensayo agua salina

En este ensayo, a diferencia de los anteriores, los resultados de resistencia mecánica a flexión y compresión muestran un comportamiento diferente antes y después de ser sumergidas las probetas en el agua marina.

Un primer análisis muestra una reducción de la resistencia mecánica a flexión de los morteros dosificados sin aditivos. También cuando el aditivo empleado es el retenedor de agua C22. En el caso de los aditivos plastificantes-aireantes utilizados en el estudio, PM201 y PM202, se comprueba que el efecto reductor no se produce, registrándose valores a flexión muy próximos a los obtenidos a los 90 días.

Si se analiza la resistencia mecánica a compresión, se observa que prácticamente todos los morteros ensayados desarrollan resistencias mecánicas a compresión mayores nada más concluir el ensayo, si las comparamos con las obtenidas a los 90 días. Es decir, se produce un aumento en casi todos los casos, lo que nos induce a pensar que la exposición del mortero al agua de mar no afecta al proceso de endurecimiento del mortero, ya que no inhibe las reacciones de cristalización de sus componentes mineralógicos.

7.4. CRISTALIZACIÓN DE SALES

La cristalización de sales solubles en el interior de los materiales produce tensiones dimensionales que pueden afectar a la estabilidad de su estructura interna.

La presencia de agua con concentraciones variables de sales puede tener su origen en los propios materiales utilizados para la fabricación de los morteros, especialmente en el agua de amasado y en los áridos, sobre todo si se han obtenido de arenas de playa o de depósitos sedimentarios contaminados. También los aditivos utilizados o los cementos con altas concentraciones de álcalis pueden aportar sales a las mezclas.

Las sales solubles también pueden provenir de los materiales que están en contacto con el mortero, como los productos cerámicos o los prefabricados de hormigón, junto con los que participa en unidades de obra de tabiquería, bien como junta de unión o como revestimiento.

Las sales pueden originarse en ambientes contaminados como las atmósferas industriales o por su presencia en el propio terreno. En ambos casos, en presencia de la humedad ambiental, pueden penetrar al interior del mortero por absorción o por capilaridad.

La normativa específica de morteros no contempla un procedimiento de análisis que valore la resistencia a la cristalización de sales solubles, pero partiendo de la consideración de que el mortero se puede clasificar dentro de los materiales pétreos artificiales, de nuevo se opta por utilizar el método de ensayo de la normativa de aplicación a las piedras naturales.

La norma utilizada es la UNE-EN 12370 "Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la resistencia a la cristalización de las sales".

Al igual que con el resto de ensayos de durabilidad, una vez concluido el mismo, se valoran para su verificación los siguientes parámetros de caracterización:

1. Variación del peso seco de las probetas
2. Inspección visual
3. Variación resistencias mecánicas

7.4.1. Variación del peso seco

Los resultados obtenidos se recogen en la Tabla 7.8, en la que se muestran los pesos secos de las probetas, antes y después del ensayo, y su variación después de los 15 ciclos.

Ensayo cristalización de sales				
Variación peso seco				
	Peso seco (gr)		Variación	
	Antes	Después	Unitaria	%
MR	500,90	517,00	16,10	+ 3,21%
MEA	514,50	534,13	19,63	+ 3,81%
MEB	536,95	556,66	19,71	+ 3,67%
MEC	555,65	576,65	20,99	+ 3,78%
MED	584,95	607,90	22,94	+ 3,92%
MR-C22	431,0	450,62	19,67	+ 4,56%
MEA-C22	460,7	482,50	21,85	+ 4,74%
MEB-C22	485,6	509,74	24,14	+ 4,97%
MEC-C22	499,0	524,26	25,26	+ 5,06%
MED-C22	535,0	555,45	20,44	+ 3,82%
MR-201	446,6	465,41	18,84	+ 4,22%
MEA-201	470,3	491,04	20,75	+ 4,41%
MEB-201	492,5	514,07	21,56	+ 4,38%
MEC-201	498,2	520,69	22,46	+ 4,51%
MED-201	529,7	549,19	19,54	+ 3,69%
MR-202	397,3	411,48	14,22	+ 3,58%
MEA-202	409,8	426,64	16,86	+ 4,11%
MEB-202	428,1	444,41	16,28	+ 3,80%
MEC-202	446,9	462,73	15,80	+ 3,54%
MED-202	454,6	470,84	16,26	+ 3,58%

Tabla 7.8 Variación del peso seco. Ensayo cristalización de sales

Los resultados muestran un incremento de peso en las probetas ensayadas, producto de la precipitación de las sales solubles en el interior de los poros accesibles del mortero.

El comportamiento es muy uniforme, registrándose incrementos medios del 4,0%, independientemente del árido utilizado (natural o siderúrgico) o del tipo de aditivo dosificado.

7.4.2. Inspección visual

Al igual que en los ensayos de durabilidad precedentes, se realiza una inspección visual de las probetas una vez concluidos los 15 ciclos de exposición al agua con sulfato sódico decahidratado al 14,0%.

El ensayo visual consiste en comprobar si se han producido alteraciones superficiales o del perfil de la arista, pérdida de materia, desconchados o rotura de la estructura interna del material.

En la Figura 7.15 a la Figura 7.18 puede observarse el aspecto visual de las probetas antes y después de ser sometidas al ensayo.

En ningún caso se aprecia la descomposición del cuerpo de las probetas en fragmentos, ni alteraciones superficiales importantes, como fisuras o desconchados, ni pérdida de materia. Se observan, no obstante, aristas romas con pérdida de perfilado.



Figura 7.15 Mortero sin aditivos. Antes y después ensayo cristalización de sales



Figura 7.16 Mortero con C22. Antes y después ensayo cristalización de sales



Figura 7.17 Mortero con PM201. Antes y después ensayo cristalización de sales



Figura 7.18 Mortero con PM202. Antes y después ensayo cristalización de sales

En general, se puede afirmar que las probetas presentan un buen aspecto, por lo que se procede a su rotura a flexión y compresión. Una vez divididas por la mitad, se observa el cambio de color en el perímetro de la probeta, probablemente producido por la inclusión de sales en el interior de las mismas. (Figura 7.19)



Figura 7.19 Cambio de color del perímetro de la probeta por inclusión de sales

7.4.3. Variación de resistencias

Transcurridos los 15 ciclos de exposición de las probetas a las sales, el aspecto de las mismas es bueno, permitiendo ser utilizadas para realizar los correspondientes ensayos mecánicos a flexión y compresión. Como en ensayos anteriores, los resultados obtenidos se han comparado con los valores registrados a 90 días. (Tabla 7.9)

Tanto en el ensayo de resistencia a flexión como a compresión, los resultados obtenidos muestran un buen comportamiento mecánico de los

morteros, desarrollando mayores resistencias después de realizado el ensayo que las obtenidas los 90 días.

Resistencias mecánicas N/mm ²						
	Flexión			Compresión		
	90 D	Después ensayo cristalización de sales	Variación %	90 D	Después ensayo cristalización de sales	Variación %
MR	4,36	5,37	+ 23,10%	16,47	30,78	+ 86,88%
MEA	4,95	7,30	+ 47,49%	20,42	30,55	+ 49,59%
MEB	5,07	4,90	-3,38%	20,53	25,23	+ 22,90%
MEC	5,04	5,81	+ 15,33%	22,04	26,02	+ 18,05%
MED	5,27	6,68	+ 26,75%	22,15	21,77	- 1,74%
MR-C22	4,92	3,87	- 21,40%	11,99	15,18	+ 26,63%
MEA-C22	4,69	4,52	- 3,55%	11,43	17,59	+ 53,93%
MEB-C22	3,96	4,82	+ 21,63%	12,27	18,64	+ 51,92%
MEC-C22	4,32	5,32	+ 23,16%	12,22	17,95	+ 46,86%
MED-C22	4,14	4,66	+ 12,66%	12,29	18,35	+ 49,31%
MR-201	3,84	4,97	+ 29,39%	12,94	25,56	+ 97,50%
MEA-201	3,50	5,19	+ 48,33%	13,76	25,06	+ 82,14%
MEB-201	3,37	5,46	+ 62,05%	13,27	26,85	+ 102,31%
MEC-201	3,24	4,59	+ 41,78%	13,88	20,06	+ 44,55%
MED-201	3,74	4,68	+ 25,02%	14,82	19,44	+ 31,19%
MR-202	2,43	2,40	- 1,14%	7,41	7,98	+ 7,67%
MEA-202	2,26	2,77	+ 22,37%	6,50	8,26	+ 27,14%
MEB-202	2,00	2,18	+ 8,98%	5,75	7,19	+ 25,00%
MEC-202	2,12	2,25	+ 6,13%	5,96	6,79	+ 13,91%
MED-202	2,04	1,86	- 8,66%	6,04	5,95	- 1,57%

Tabla 7.9 Resistencias mecánicas ensayo cristalización de sales

7.5. ATMÓSFERAS INDUSTRIALES. ENSAYO KESTERNICH

De acuerdo con lo expuesto en el apartado 3.5.5 (página 91) se ensayan los morteros a la acción del dióxido de azufre según las normas UNE-EN 6988 y DIN 50018. Estas normas son de aplicación a cualquier material expuesto a la acción de agentes contaminantes agresivos.

En el caso de los morteros de albañilería su aplicación es apropiada ya que, cuando están colocados al exterior, pueden verse afectados por los subproductos generados por los combustibles fósiles, como el petróleo o el carbón, o en atmósferas contaminadas por gases industriales.

Este ensayo permite también comprobar la reacción de los componentes del cemento, especialmente de la cal libre o de los sulfatos cálcicos, frente a la acción del SO₂ y, sobre todo, de las partículas metálicas de hierro presentes en las escorias.

7.5.1. Variación del peso seco

Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 7.10, en la que se recogen los pesos secos de las probetas, antes y después del ensayo, y su variación después de los 15 ciclos.

Se han ensayado los morteros de referencia con árido natural MR y los morteros con un 100% de árido siderúrgico MED, tanto sin aditivos como con ellos.

Ensayo Kesternich				
Variación peso seco				
	Peso seco (gr)		Variación	
	Antes	Después	Unitaria	%
MR	505,41	507,87	2,46	+ 0,49%
MED	597,20	600,99	3,79	+ 0,63%
MR-C22	442,87	446,71	3,84	+ 0,87%
MED-C22	502,47	507,62	5,15	+ 1,02%
MR-201	454,86	457,35	2,49	+ 0,55%
MED-201	537,71	542,41	4,70	+ 0,87%
MR-202	401,17	406,11	4,94	+ 1,23%
MED-202	467,05	472,39	5,33	+ 1,14%

Tabla 7.10 Variación del peso seco. Ensayo Kesternich

De los resultados obtenidos se observa que, en todos los casos, se produce un aumento de peso, si bien este aumento no es significativo en ningún caso y puede justificarse por las condiciones ambientales en las que se produce el ensayo.

Las mezclas aumentan su peso una media del 1%, tanto si éstas están dosificadas con áridos naturales como con escorias, con independencia del aditivo utilizado.

7.5.2. Inspección visual

Una vez concluidos los 15 ciclos de ensayo se comprueba el aspecto visual de las probetas sometidas a atmósferas saturadas de SO₂.

En la Figura 7.20 puede observarse el aspecto visual de las probetas, antes y después de ser sometidas a ensayo.



Figura 7.20 Antes y después ensayo Kesternich



Figura 7.21 Visualización cambios en probetas dentro de la cámara

En ningún caso se aprecian desconchados, fisuras, laminaciones o grietas en las probetas. Se observa, no obstante, un oscurecimiento de los morteros dosificados con áridos siderúrgicos y aditivos (MED-C22, MED-201; MED-202). En la Figura 7.22 se puede apreciar el cambio de color de las probetas con árido siderúrgico, respecto de sus análogas de referencia con árido natural.

En el reconocimiento general de las probetas también se comprueba si se han producido variaciones en sus dimensiones, observando que no se producen cambios de volumen ni expansiones.



Figura 7.22 Detalle cambio color mortero y aparición manchas oxido



Figura 7.23 Aspecto interior morteros

7.5.3. Variación de resistencias

Trascurridos los 15 ciclos de exposición de las probetas de mortero a atmósfera saturada de SO₂, su aspecto permite proceder a realizar los correspondientes ensayos mecánicos de rotura a esfuerzos de flexión y compresión. Como en ensayos anteriores, los resultados obtenidos se han comparado con las resistencias obtenidas a los 90 días. (Tabla 7.11)

Resistencias mecánicas N/mm ²						
	Flexión			Compresión		
	90 D	Después ensayo Kesternich	Variación %	90 D	Después ensayo Kesternich	Variación %
MR	4,36	7,37	+ 69,06%	16,47	27,61	+ 67,65%
MED	5,27	6,74	+ 27,86%	22,15	27,77	+ 25,37%
MR-C22	4,92	4,50	- 8,54%	11,99	15,21	+ 26,88%
MED-C22	4,14	3,41	- 17,63%	12,29	10,93	- 11,04%
MR-201	3,84	5,74	+ 49,54%	12,94	22,51	+ 73,93%
MED-201	3,74	6,09	+ 62,93%	14,82	20,66	+ 39,43%
MR-202	2,43	2,37	- 2,58%	7,41	8,28	+ 11,69%
MED-202	2,04	2,87	+ 40,74%	6,04	7,05	+ 16,75%

Tabla 7.11 Resistencias mecánicas ensayo Kesternich

Como se puede comprobar, las mezclas dosificadas con áridos siderúrgicos y con el aditivo retenedor de agua C22, muestran un peor comportamiento mecánico.

7.6. RESISTENCIAS MECÁNICAS DESPUÉS DEL ENVEJECIMIENTO ACELERADO

En este apartado se realiza una comparativa de las resistencias mecánicas a flexión y compresión de cada familia de estudio sometida a ensayos de envejecimiento acelerado, comparando los datos con los obtenidos a 90 días.

En líneas generales, los morteros dosificados con escorias negras EAF y blancas LF muestran un buen comportamiento a los ensayos de durabilidad. Los resultados obtenidos son aceptables ya que todas las mezclas tienen una resistencia a compresión después de los ensayos de envejecimiento acelerado superior a 5N/mm^2 .

Si a esto añadimos que el aspecto final de las probetas sometidas a ensayos de durabilidad apenas sufre variaciones, se puede afirmar que los morteros ensayados son estables frente a las acciones de envejecimiento acelerado.

Cabe destacar que los ensayos más agresivos, en los que las resistencias han disminuido son el choque térmico y agua salina.

Desde el Gráfico 7.1 hasta el Gráfico 7.4 se muestran, de manera agrupada, las resistencias a flexión de los morteros a 90 días y después de los ensayos de durabilidad, en función de si las mezclas están dosificados sin aditivos, con Cimsil C22, PM201 o PM202.

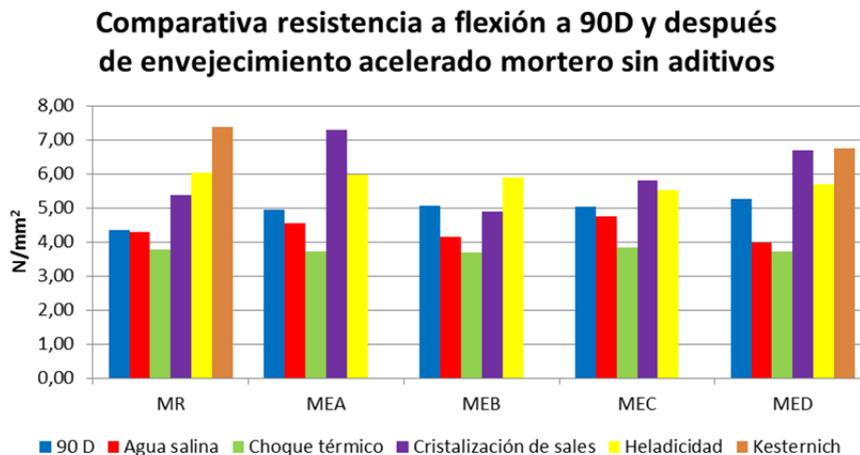


Gráfico 7.1 Envejecimiento acelerado. Flexión mortero sin aditivos

Es estos gráficos puede comprobarse de manera visual que, si nos referimos a la resistencia a flexión, los ensayos que más afectan a la resistencia del mortero son los de agua salina y choque térmico, independientemente del árido utilizado y del aditivo que lleven en su dosificación.

Comparativa resistencia a flexión a 90D y después de envejecimiento acelerado mortero C22

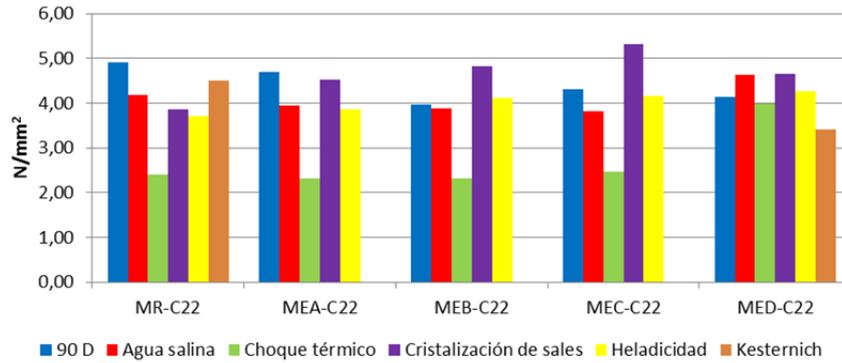


Gráfico 7.2 Envejecimiento acelerado. Flexión morteros C22

Comparativa resistencia a flexión a 90D y después de envejecimiento acelerado mortero PM201

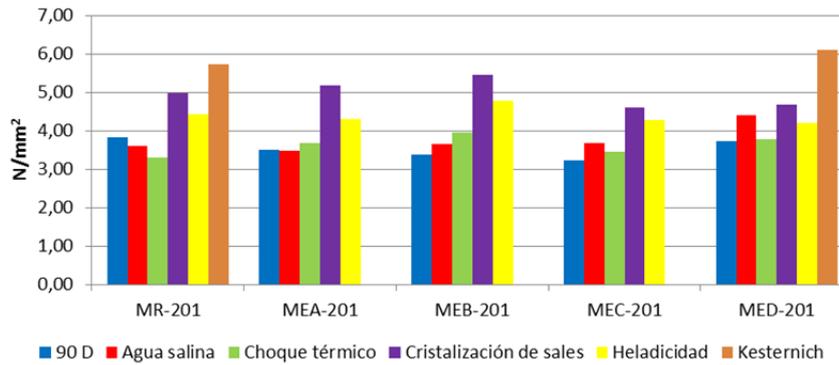


Gráfico 7.3 Envejecimiento acelerado. Flexión morteros PM201

Comparativa resistencia a flexión a 90D y después de envejecimiento acelerado mortero PM202

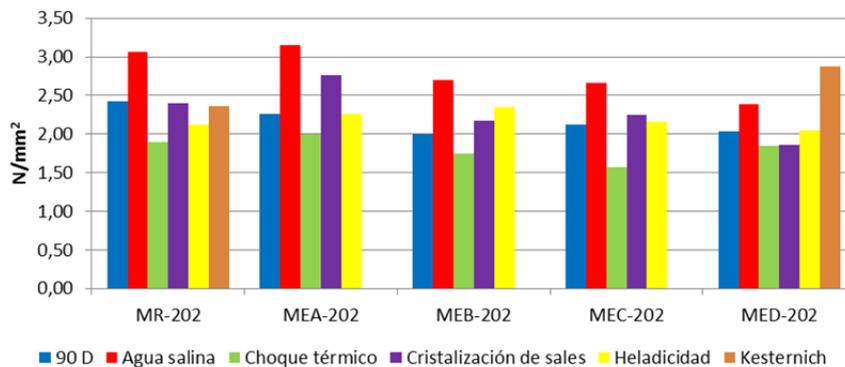


Gráfico 7.4 Envejecimiento acelerado. Flexión morteros PM202

De igual manera, desde el Gráfico 7.5 hasta el Gráfico 7.8 se muestran, de manera agrupada, las resistencias a compresión de los morteros a 90 días y después de los ensayos de durabilidad.

Comparativa resistencia a compresión a 90D y después de envejecimiento acelerado mortero sin aditivos

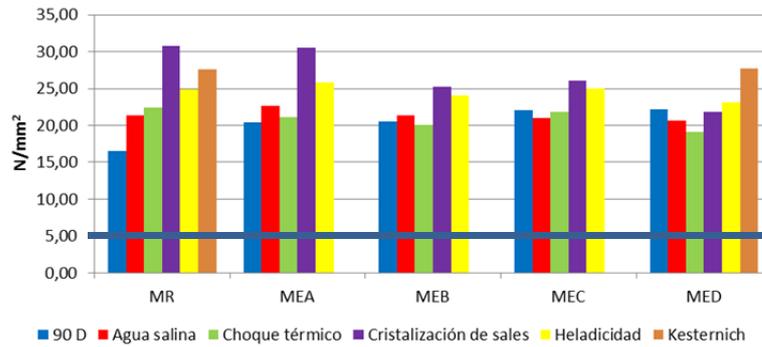


Gráfico 7.5 Envejecimiento acelerado. Comp. morteros sin aditivos

Comparativa resistencia a compresión a 90D y después de envejecimiento acelerado mortero C22

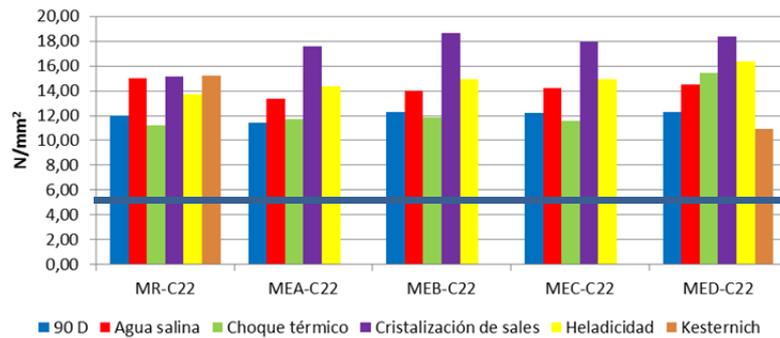


Gráfico 7.6 Envejecimiento acelerado. Compresión morteros C22

Comparativa resistencia a compresión a 90D y después de envejecimiento acelerado mortero PM201

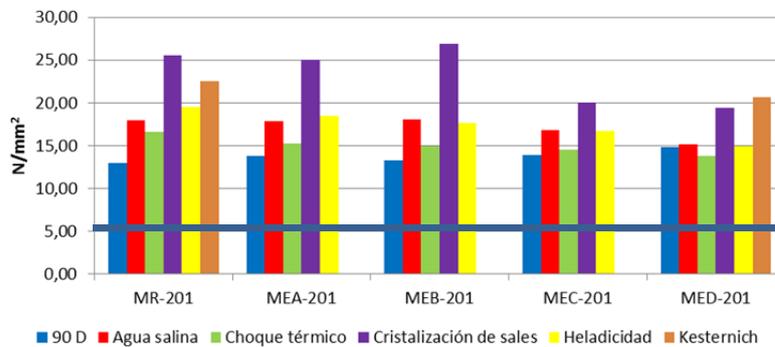


Gráfico 7.7 Envejecimiento acelerado. Compresión morteros PM201

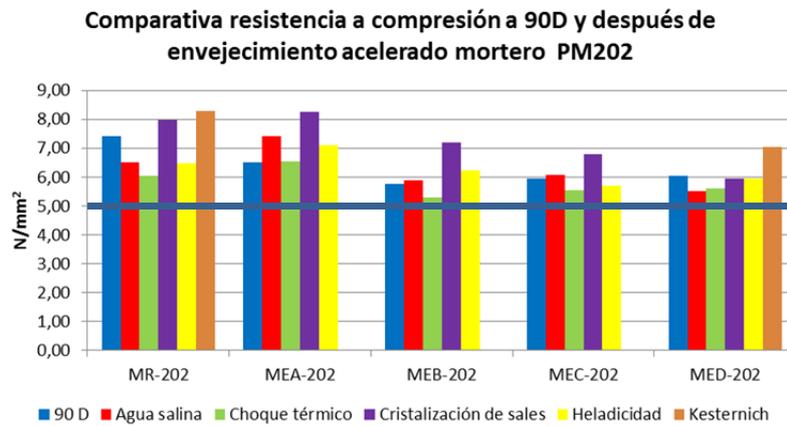


Gráfico 7.8 Envejecimiento acelerado. Compresión morteros PM202

Se comprueba que el ensayo que más afecta a la resistencia mecánica a compresión de los morteros es el del choque térmico, si bien todas las muestras tienen, una vez finalizados los ensayos, unas resistencias superiores al objetivo de diseño de esta Tesis Doctoral.

Se puede concluir que los morteros elaborados con escoria tienen un buen comportamiento frente a los efectos del envejecimiento acelerado o durabilidad.

Capítulo VIII

Estudio económico

8. ESTUDIO ECONÓMICO

En la presente Tesis Doctoral se ha estudiado la viabilidad técnica de los morteros elaborados con áridos siderúrgicos. En este apartado se estima el coste de los distintos morteros elaborados con escoria, comparándolos con sus homólogos de referencia, y se comprueba si la reutilización de estos residuos es rentable desde un punto de vista económico.

En líneas generales, el proceso de fabricación de un mortero industrial se podría desglosar en cuatro etapas¹⁶⁶ (Figura 8.1):

- Recepción y acopio de materiales
- Dosificación
- Mezclado de componentes
- Obtención del producto acabado

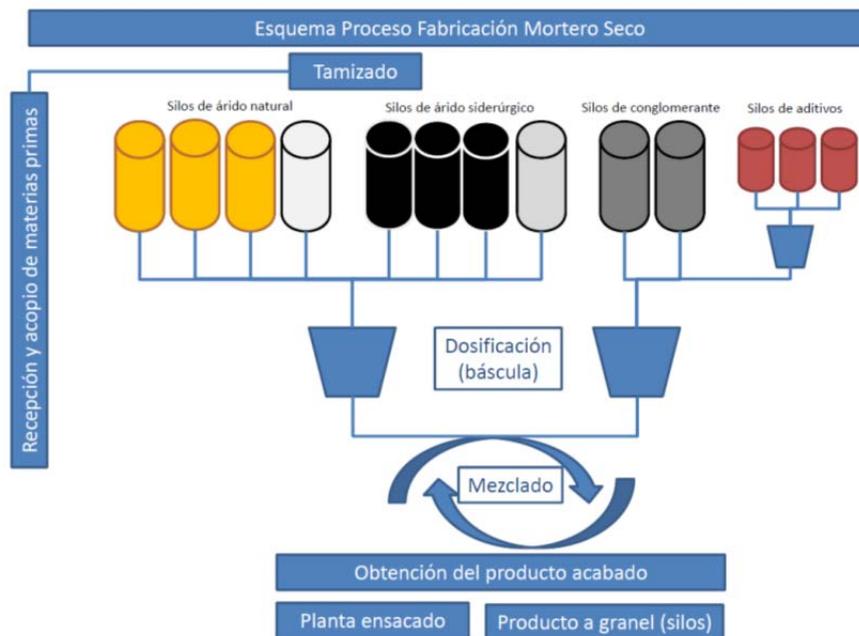


Figura 8.1 Esquema del proceso de fabricación de un mortero seco

Tanto la elaboración de un *mortero seco* de referencia (MR), como un *mortero seco* con árido siderúrgico, sería similar en cuanto a su producción en fábrica. La recepción y acopio de materias primas, el tamizado, mezclado de los componentes y la obtención del producto acabado tendrían el mismo coste.

¹⁶⁶ Bustillo Revuelta, M. (2008). "Hormigones y morteros". Fuego editores. Madrid.

Por este motivo, únicamente se analiza y compara el coste de las materias primas y la cantidad a emplear en las distintas dosificaciones estudiadas, pues son determinantes en la variación del precio final.

La cantidad de agua a emplear en obra para amasar el “*mortero seco*” también varía, pero la repercusión en el precio total del mortero (referido éste al coste de las materias primas) apenas es del 0,5% de su valor, por lo tanto no se considera en el cómputo final.

8.1. VALORACIÓN CUANTITATIVA

Para poder establecer una valoración cuantitativa de los morteros se ha establecido una relación de componentes en peso para cada una de las mezclas para 1 m³ de mortero. (Tabla 8.1 a Tabla 8.4)

Dosificación en peso 1 m ³ morteros sin aditivos (Kg)					
	CEM I	Árido			
		Arena	Filler	EAF	LF
MR	263	1.538,74	39,46	-	-
MEA	273	1.198,08	30,72	399,36	10,24
MEB	283	826,65	21,20	826,65	21,20
MEC	294	429,41	11,01	1.288,25	33,03
MED	300	-	-	1.756,56	45,04

Tabla 8.1 Dosificación 1m³ morteros sin aditivos

Dosificación en peso 1 m ³ morteros C22 (Kg)						
	CEM I	Árido				Aditivo
		Arena	Filler	EAF	LF	C22
MR-C22	229	1.338,97	34,33	-	-	1,602
MEA-C22	234	1.026,60	26,32	342,21	8,77	1,638
MEB-C22	240	701,32	17,98	701,32	17,98	1,678
MEC-C22	249	363,45	9,32	1.090,37	27,96	1,740
MED-C22	264	-	-	1.546,45	39,65	1,850

Tabla 8.2 Dosificación 1m³ morteros C22

Dosificación en peso 1 m ³ morteros PM201 (Kg)						
	CEM I	Árido				Aditivo
		Arena	Filler	EAF	LF	PM201
MR-201	234	1.367,83	35,07	-	-	1,403
MEA-201	247	1.083,42	27,78	361,14	9,26	1,481
MEB-201	257	751,63	19,27	751,63	19,27	1,542
MEC-201	270	394,14	10,11	1.182,43	30,32	1,617
MED-201	281	-	-	1.644,14	42,16	1,686

Tabla 8.3 Dosificación 1m³ morteros PM201

Dosificación en peso 1 m ³ morteros PM202 (Kg)						
	CEM I	Árido				Aditivo
		Arena	Filler	EAF	LF	PM202
MR-202	209	1.220,12	31,29	-	-	0,313
MEA-202	224	983,90	25,23	327,96	8,41	0,336
MEB-202	235	687,67	17,63	687,67	17,63	0,353
MEC-202	251	366,62	9,40	1.099,88	28,20	0,376
MED-202	258	-	-	1.509,40	38,70	0,387

Tabla 8.4 Dosificación 1m³ morteros PM202

8.1.1. Coste de materiales

Los costes de las materias primas¹⁶⁷ están reflejados en la Tabla 8.5.. Se han establecido las siguientes consideraciones:

- El precio del cemento corresponde a 1 tn de cemento a granel.
- El precio del árido natural corresponde a 1 tn de arena de sílice lavada 0/2.
- El precio del filler corresponde a 1tn a granel.
- El precio de la escoria negra y la escoria blanca se considera 0€ por tratarse de un residuo que, de no utilizarse, hubiera sido trasladado a vertedero, por lo que únicamente se tiene en cuenta el coste del transporte. (Tabla 8.6)

¹⁶⁷ ITeC. (2014). "Base de precios de la construcción." from <http://itec.es/nouBedec.e/bedec.aspx>.

- El precio de los aditivos corresponde a 1 kg de material suministrado en sacos. (fuente: Sika).

Coste materias primas	
Cemento CEM I 42,5 R	98,91 €/tn
Arena silícica 0/2	18,02 €/tn
Filler calizo	34,85 €/tn
Escoria negra EAF	Ver Tabla 8.6
Escoria blanca LF	Ver Tabla 8.6
Cimsil C22	1,42 €/kg
PremorterMix PM201	1,52 €/kg
PremorterMix PM202	7,75 €/kg

Tabla 8.5 Coste materias primas

El precio final de la escoria negra y blanca se ve directamente afectado por los costes de transporte. Este factor es de especial importancia ya que en muchos casos supone un valor adicional equivalente al propio coste del producto que se transporta, lo que obliga a considerar esta circunstancia en función de la distancia que exista entre el punto de origen y el de consumo.

Como se ha visto al comienzo del Documento, la concentración de la industria de la acería se agrupa en núcleos geográficos muy concretos, que no permiten una distribución rentable del producto. Por este motivo se estudian varias distancias razonables desde el punto de vista de la utilización competitiva del residuo: 100 km, 150 km y 200 km.

Como se ha señalado anteriormente, el transporte es uno de los factores clave que condicionan el estudio económico del producto final. Esto se debe a que cuanto mayor sea la distancia existente entre el lugar de generación del residuo, de extracción del árido natural o fabricación del cemento al lugar donde se elabore el mortero industrial, mayores serán los costes de este apartado.

Se ha considerado como coste de transporte el itinerario desde el lugar de generación del residuo hasta la planta de fabricación del “mortero seco industrial”, considerando la suma de la distancia de la ida y la vuelta. El cálculo del coste del transporte es el reflejado en la Tabla 8.6.

Cálculo del coste de transporte	
Camión bañera para transporte de áridos con una capacidad de carga de 24 tn	
€/h del camión (Amortización camión + seguro + gastos de mantenimiento + combustible + chofer)	51,21 €/h
Opción 1: distancia 100km	
Distancia (ida + vuelta)	200 km
Tiempo empleado en desplazamiento ida +vuelta y carga+descarga	4 h
Coste de transporte €/tn	8,54 €/tn
Opción 2: distancia 150km	
Distancia (ida + vuelta)	300 km
Tiempo empleado en desplazamiento ida +vuelta y carga+descarga	6 h
Coste de transporte €/tn	12,80 €/tn
Opción 3: distancia 200km	
Distancia (ida + vuelta)	400 km
Tiempo empleado en desplazamiento ida +vuelta y carga+descarga	8 h
Coste de transporte €/tn	17,07 €/tn

Tabla 8.6 Cálculo coste transporte residuo

8.1.2. Coste de los morteros

El coste de los morteros aparece reflejado en la Tabla 8.7 en función de: las dosificaciones establecidas en las mezclas estudiadas, el coste de las materias primas para elaborar 1 m³ de mortero seco, y en función de la distancia a la cual se encuentra el centro de producción de acero y por consiguiente la escoria.

Coste €/m³ mortero			
	Opción 1: a 100 Km	Opción 2: a 150 km	Opción 3: a 200 km
MR	55,12	55,12	55,12
MEA	53,17	54,92	56,66
MEB	50,82	54,44	58,06
MEC	48,44	54,08	59,72
MED	45,08	52,77	60,46
MR-C22	50,24	50,24	50,24
MEA-C22	47,88	49,38	50,88
MEB-C22	45,51	48,58	51,64
MEC-C22	43,47	48,24	53,01
MED-C22	42,31	49,08	55,84
MR-201	51,13	51,13	51,13
MEA-201	50,33	51,91	53,49
MEB-201	48,56	51,85	55,14
MEC-201	46,92	52,10	57,27
MED-201	44,75	51,95	59,14
MR-202	46,13	46,13	46,13
MEA-202	46,27	47,71	49,14
MEB-202	45,01	48,02	51,03
MEC-202	44,27	49,09	53,90
MED-202	41,73	48,34	54,94

Tabla 8.7 Coste m³ de mortero

En el Gráfico 8.1 y Gráfico 8.2 se muestra la comparativa del coste de las materias primas por m³ de mortero seco.

Cuando la distancia al centro de producción de la escoria al de fabricación del “mortero seco industrial” es de 100 km (opción 1), los morteros elaborados con árido natural tienen un coste superior a los fabricados con escorias negras y blancas, entre un 10% y un 22% mayor, por lo que quedaría justificado su utilización, teniendo en cuenta el criterio económico.

Cuando la distancia es de 150 km (opción 2), se puede apreciar que el margen en el precio del mortero se reduce, apenas un 4% si las mezclas no llevan aditivo, un 2% si incorporan C22 y aumentando el coste cuando se utiliza PM201 y PM202.

Al incrementar la distancia del centro de producción de residuos hasta los 200 km, se comprueba que en todas las familias de estudio, tanto las

que incorporan aditivo a las mezclas como las que no, aumentan el coste de las materias primas del mortero por m³ de mezcla. Cuando los morteros no llevan aditivo aumentan alrededor del 9,5%, si el aditivo empleado es el retenedor C22, un 11%, un 15% si es PM201 y un 19% si es PM202.

Con estos datos se puede afirmar que la distancia razonable, a partir de la cual el precio final de los morteros elaborados con residuos siderometalúrgicos ya no es rentable, es la de 150 km. A partir de esta distancia, no se justificaría su empleo a nivel expresamente cuantitativo.

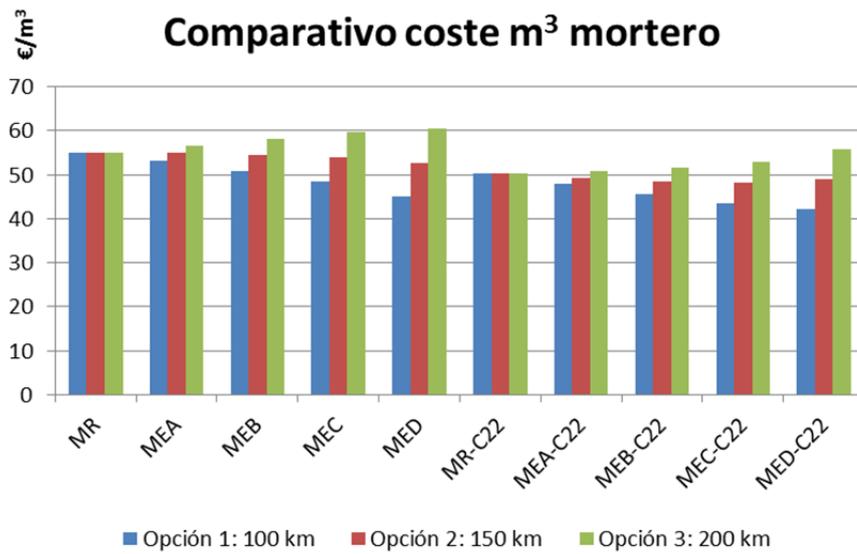


Gráfico 8.1 Coste m³ morteros (sin aditivos y C22)

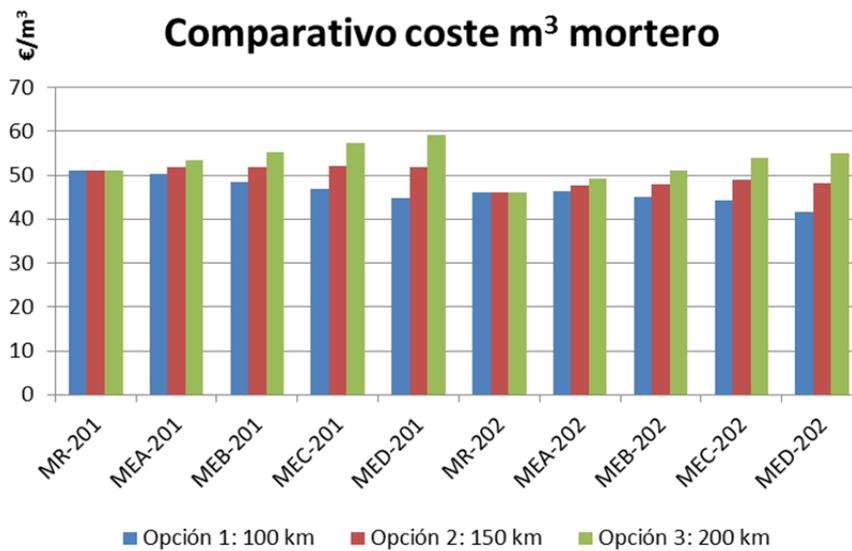


Gráfico 8.2 Coste m³ morteros (PM201 y PM202)

Como conclusión del estudio económico se puede afirmar que la utilización de la escoria siderúrgica puede resultar rentable si se dan las siguientes circunstancias:

- Que el centro de producción de escorias o acerías, se encuentren a una distancia razonable, e inferior a 150 km del lugar de elaboración del mortero seco industrial, para que el precio del transporte no suponga una barrera de entrada a su empleo.
- Que el residuo se entregue sin coste adicional alguno, ya que cualquier incremento producido en el mismo determinaría un coste final superior al calculado y no resultaría competitivo.

Si se establece una comparativa entre el coste de las materias primas y la resistencia a compresión a los 28 días de los morteros (Gráfico 8.3 a Gráfico 8.5), se comprueba que, aunque el precio de las mezclas es muy similar cuando empleamos aditivos, la resistencia normalizada a 28 días en el caso de usar PM202 es bastante inferior al de sus homólogos con aditivo C22 y PM201.

En función de estos datos, los morteros que emplean PM202 serían menos rentables desde el punto de vista coste/resistencia que los que utilizan C22 ó PM201.

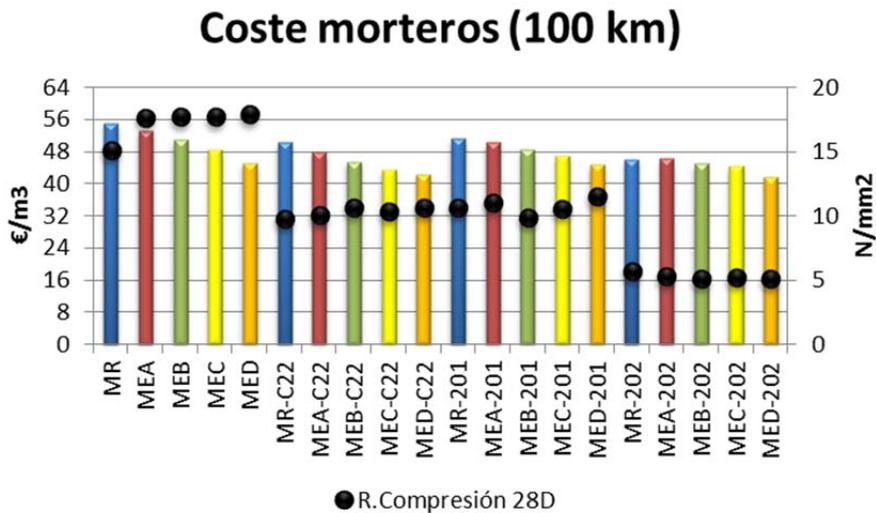


Gráfico 8.3 Comparativa coste-resistencia (100km)

Coste morteros (150 km)

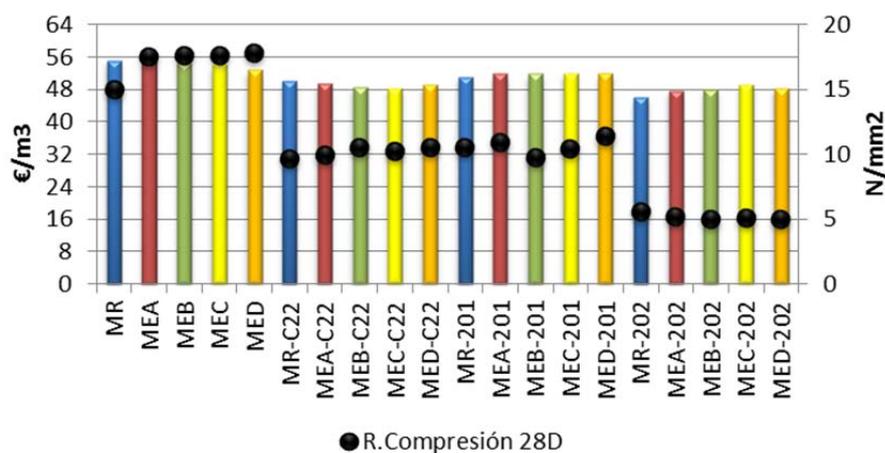


Gráfico 8.4 Comparativa coste-resistencia (150km)

Coste morteros (200 km)

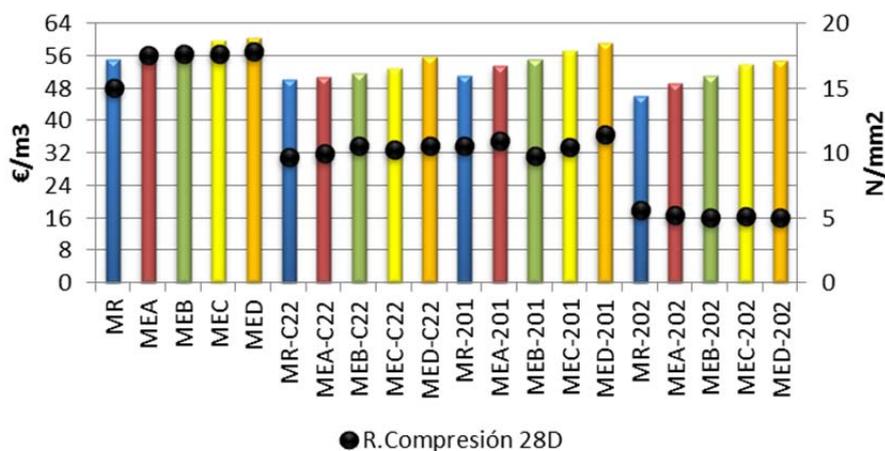


Gráfico 8.5 Comparativa coste-resistencia (200km)

Si se realiza una selección de morteros de albañilería con propiedades técnicas adecuadas y precio final razonable, el resultado sería el siguiente:

- MED-C22 (opción 1): resistencia a 28 días de 10,62 N/mm² (un 9,5% superior a su homólogo con árido natural), y un coste de materias primas de 42,31 €/m³ (un 15,7% inferior al MR-C22).
- MED-201 (opción 1): resistencia de 11,47 N/mm² (un 8% superior al MR-201) y un coste de 44,75 €/m³ (un 12,5% inferior al MR-201).

8.2. VALORACIÓN CUALITATIVA

El empleo de residuos en la obtención de materiales útiles para el hombre, como es el caso que nos ocupa, no sólo debe analizarse desde el punto de vista cuantitativo, considerando el precio final del producto, sino también desde una perspectiva cualitativa, considerando una nueva filosofía productiva de bienes y servicios orientada a sistemas de producción sostenibles y respetuosos con el medio ambiente.

Las razones que justifican la utilización de escorias negras y blancas, obtenidas en los procesos de fabricación de acero, en sustitución del árido natural en la elaboración de morteros de albañilería son las siguientes:

- Se evita el impacto ambiental y paisajístico que se genera en los entornos de producción, muy deteriorados y degradados por esta actividad, lo que supone una oportunidad de recuperar el entorno natural en el que se ubican las acerías.
- Los residuos no se depositarían en el vertedero, con lo que habría un ahorro importante de recursos destinados al transporte al mismo, así como la tasa o canon de vertido.
- Con la reutilización de las escorias, las acerías resuelven un problema medioambiental grave, con importantes costes económicos adicionales, repercutidos en el precio final del acero producido. Las empresas que opten por políticas de valorización y reutilización resultarán más competitivas frente a sus competidoras.
- Los terrenos y acopios utilizados como depósitos de las escorias podrían ponerse en valor, bien como solares, zonas de ocio o espacios naturales.
- Por otro lado, al disminuir la extracción de los áridos naturales, se reduciría la problemática económica y ambiental creciente debido tanto al progresivo agotamiento de los recursos naturales obtenidos en las canteras, como por la aplicación de normativas cada vez más exigentes por parte de las Administraciones Públicas.

Capítulo IX

Conclusiones finales y futuras líneas de investigación

9. CONCLUSIONES FINALES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

9.1. CONCLUSIONES FINALES

El trabajo de investigación realizado en la presente Tesis Doctoral demuestra que la utilización conjunta de escorias negras EAF y blancas LF como carga mineral en sustitución de los áridos naturales, es una apuesta posible para la reutilización de estos residuos industriales como materia prima en la fabricación de morteros de albañilería.

Los resultados del procedimiento experimental desarrollado permiten extraer las conclusiones que se detallan en los apartados siguientes:

De las escorias,

1. Para poder emplear la escoria negra de horno eléctrico de arco EAF y la escoria blanca de horno cuchara LF en la fabricación de morteros de albañilería, es preciso un acondicionamiento previo que contemple su homogenización y estabilización, para poder valorizar los residuos y, de esta manera, reintegrarse en un nuevo ciclo productivo.
2. Realizado el estudio químico de la escoria negra EAF (fundamentalmente compuestas por Fe_2O_3 , SiO_2 y CaO) y la escoria blanca LF (SiO_2 y CaO), así como de sus propiedades, características y granulometría, se puede afirmar que estos residuos se pueden utilizar como carga mineral en la elaboración de morteros de albañilería, con prestaciones semejantes a los áridos naturales tradicionales.
3. Los áridos siderúrgicos presentan mayor densidad que los áridos naturales. Por una parte la escoria negra EAF presenta una densidad de $3,65 \text{ gr/cm}^3$, la escoria blanca LF $2,86 \text{ gr/cm}^3$, mientras que la de la arena silícica es $2,6 \text{ gr/cm}^3$.
4. Las escorias empleadas en la presente investigación cumplen las especificaciones recogidas en la norma UNE 13139 de áridos para morteros.

Del estudio previo de dosificación,

5. Los morteros fabricados con áridos siderúrgicos presentan una gran exudación de agua, por lo que se hace imprescindible dosificar las mezclas con aditivos retenedores de agua (Cimsil C22) o aireantes-plastificantes (PremorterMix 201 y PremorterMix 202).
6. Se comprueba que una relación de componentes en peso 1/6 (1 parte de cemento, 6 partes de árido) es suficiente para conseguir

morteros con una resistencia normalizada a 28 días de 5 N/mm² (M-5a).

De las mezclas en estado fresco,

7. Al incorporar aditivos aireantes-plastificantes (PM201 y PM202), se reduce considerablemente la cantidad de agua de amasado respecto a sus análogos de referencia sin aditivos; sin embargo, al emplear retenedor de agua Cimsil C22 la cantidad de agua a añadir en las mezclas es prácticamente la misma que en aquellos que no utilizan aditivo.

Al emplear aditivos, la naturaleza del árido influye poco o muy poco en la cantidad de agua de amasado, siendo más significativa la influencia que el propio aditivo tiene en las mezclas.

8. En el estudio de la densidad del mortero en estado fresco se constata que ésta aumenta en función del grado de sustitución del árido natural por escorias, tanto en las mezclas dosificadas sin aditivos como las que los incorporan.

Al incorporar aditivos la densidad disminuye en todas las familias de estudio. Cuando el aditivo es el retenedor de agua Cimsil C22 es un 14% menor respecto de los morteros análogos sin aditivos, si es PM201 es un 10% inferior y con el PM202 se alcanzan los valores más bajos, un 20% menores.

9. El contenido de aire ocluido es similar en cada serie de estudio, independientemente del árido empleado. No obstante, cuando los morteros se dosifican con aditivos, el contenido de aire ocluido aumenta.

Los morteros dosificados sin aditivos alcanzan un contenido de aire del 8,5%. Cuando el aditivo es C22 y PM201, los valores son 2,5 veces superiores a los morteros de referencia sin aditivos, obteniendo contenidos de aire del 22%.

Los contenidos superiores de aire ocluido se consiguen con el aditivo aireante-plastificante PM202 (29%).

10. Se confirma la relación que existe que entre el contenido de aire ocluido y la densidad aparente en estado fresco de los morteros: a mayor contenido de aire ocluido menor es la densidad.

11. Los morteros fabricados únicamente con árido siderúrgico presentan tiempos de utilización menores en cada serie de estudio. Esto puede corroborar el comportamiento hidráulico de las escorias blancas descrito en la bibliografía.

El fraguado de los morteros que no incorporan aditivos sigue una tendencia lineal, sin embargo en las muestras fabricadas con aditivos, el fraguado se produce a una velocidad más lenta en las primeras horas, siguiendo una tendencia exponencial.

Las mezclas cuyo tiempo de utilización es mayor son aquellas dosificadas con Cimsil C22, provocando efectos similares a los retardadores de fraguado.

12. Los valores de retención de agua son prácticamente iguales en cada serie de estudio, independientemente del árido empleado. Así los morteros sin aditivos apenas retienen el 66% de agua. Cuando se utilizan aireantes-plastificantes PM201 y PM202 se registran valores cercanos al 80%. Los valores mayores se obtienen cuando se dosifican con retenedor de agua C22, con valores próximos al 85-90%.

De las mezclas de mortero en estado endurecido,

13. De la misma manera que la densidad en estado fresco, la densidad de los morteros en estado endurecido aumenta de valor en función del grado de sustitución del árido natural por árido siderúrgico. Así mismo, las mezclas con aditivos tienen densidades menores que los morteros análogos fabricados sin aditivos.

14. Los morteros fabricados con escoria negra EAF y blanca LF muestran buen comportamiento cuando son sometidos a esfuerzos mecánicos de flexión y compresión, superando las resistencias obtenidas en el mortero de referencia fabricado con árido silíceo y filler calizo.

Cuando los morteros incorporan aditivos, las resistencias disminuyen, alcanzado en todas las ocasiones una resistencia a compresión a los 28 días superior a 5 N/mm^2 .

Los valores más bajos se obtienen al emplear PM202, mientras que cuando se utiliza C22 o PM201, se alcanzan unos valores alrededor de 10 N/mm^2 .

15. Los morteros que poseen más adherencia a un soporte son los de referencia elaborados con áridos naturales y sin aditivos, quedándose el resto de mezclas por debajo de estos valores, especialmente las que incorporan aditivo PM202, en los que la adherencia es un 78% inferior.
16. La absorción de agua a presión atmosférica es similar en todos los casos, oscilando entre el 6,25% y el 10%.
17. En el ensayo de absorción de agua por capilaridad se comprueba que todos los morteros diseñados tienen una clasificación según normativa W2, excepto el mortero elaborado únicamente con árido siderúrgico y sin aditivos MED, por lo que los morteros tienen un buen comportamiento frente a la filtración contra la penetración del agua.
18. La altura de penetración de agua por capilaridad de los morteros con PM202 es de apenas 2 o 3 mm, mientras que en el resto de mezclas es de 15-20 mm. Esto puede deberse a la cantidad de

aire ocluido de estos morteros, que favorece la rotura de su red capilar intersticial.

19. De la misma manera, el coeficiente de permeabilidad al vapor de agua en los morteros con PM202 es inferior al de sus homólogos, alcanzando valores de μ de 7-9, mientras que el resto de mezclas tiene un μ de 15-20.
20. La caracterización microestructural del mortero endurecido muestra una buena cohesión entre todos los componentes y una distribución homogénea de los materiales y poros.
21. En las tomografías realizadas se comprueba que el volumen y distribución de poros de los morteros dosificados con aditivos es superior a los de referencia que no incorporan aditivos.

De los ensayos de durabilidad,

22. Los morteros dosificados con escorias negras EAF y blancas LF muestran un buen comportamiento a los ensayos de durabilidad. Los resultados obtenidos son aceptables, ya que todas las mezclas tienen una resistencia a compresión después de los ensayos de envejecimiento acelerado superior a 5N/mm^2 . Cabe destacar que los ensayos más agresivos, en los que las resistencias han disminuido, son la exposición al choque térmico y al agua salina.
23. El aspecto final de las probetas sometidas a ensayos de durabilidad apenas sufre variaciones, pudiendo afirmar que los morteros ensayados son estables frente a las acciones de envejecimiento acelerado.

Del estudio económico,

24. El coste de los morteros fabricados con escoria es rentable cuando la distancia al centro de producción es de 100km. Cuando ésta se aproxima a los 150 km, los precios de los morteros de referencia y los fabricados con residuos siderúrgicos se equilibran, obteniéndose precios no competitivos cuando esta distancia es superior y alcanza los 200 km.

Se han cumplido los objetivos de la presente investigación pues se han diseñado morteros elaborados con áridos siderúrgicos con consistencias plásticas y unas resistencias a compresión superiores a 5N/mm^2 . Además, se puede afirmar que los morteros tienen un comportamiento similar a los morteros de referencia elaborados con árido natural.

Si hubiera que elegir alguna de las mezclas estudiadas para su empleo en albañilería, con garantía y viabilidad técnica y un precio razonable, éstas deberían tener el centro de producción de escorias a una distancia de no más de 100 km y serían:

- MED-C22 [$R_{ck}=10,62\text{N/mm}^2$, coste materias primas $42,31\text{€/m}^3$]
- MED-PM201 [$R_{ck}=11,47\text{N/mm}^2$, coste materias primas $44,75\text{€/m}^3$]

9.2. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

En la presente Tesis Doctoral no se ha profundizado en el conocimiento de algunas características de los morteros, por lo que se proponen las siguientes Líneas de Investigación para el futuro:

1. Analizar el comportamiento frente al fuego de los morteros elaborados con escorias, con el objeto de obtener una clasificación normativa de este tipo de mezclas.
2. Se podría investigar el comportamiento de estos residuos en otro tipo de mezclas elaboradas con diferentes conglomerantes, como los diferentes tipos de cales y yesos, bien en morteros bastardos, morteros de cal o morteros de yeso.
3. Siguiendo el mismo criterio por innovar la composición de las mezclas, es posible estudiar también el comportamiento de los morteros cuando se utilicen otro tipo de aditivos, con el objetivo de mejorar alguna de las características de los morteros estudiados.
4. Sería interesante conocer el comportamiento real de los morteros en su aplicación y puesta en obra, ejecutando muros de fábrica de ladrillo con mortero de referencia y con árido siderúrgico, ensayando y comparando los resultados de ambos.

Capítulo X

Bibliografía

10. BIBLIOGRAFÍA

Referencias bibliográficas por orden alfabético

- (1998). Ley 10/1998, de 21 de abril, de Residuos, BOE N°96 22 de abril 1998.
- (2000). Decisión 2000/532/CE "Decisión de la Comisión de 3 de mayo de 2000, 2000/532/CE, que sustituye a la Decisión 94/3/CE por la que se establece una lista de residuos de conformidad con la letra a) del artículo 1 de la Directiva 75/442/CEE del Consejo relativa a los residuos y a la Decisión 94/904/CE del Consejo por la que se establece una lista de residuos peligrosos en virtud del apartado 4 del artículo 1 de la Directiva 91/689/CEE del Consejo relativa a los residuos peligrosos".
- (2003). Decreto 34/2003, de 18 de febrero, por el que se regula la valorización y posterior utilización de escorias procedentes de la fabricación de acero en hornos de arco eléctrico, en el ámbito de la Comunidad Autónoma del País Vasco.
- (2006). Decreto 104/2006, de 19 de octubre, de valorización de escorias en la Comunidad Autónoma de Cantabria.
- (2008). Directiva 2008/98/CE "Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de noviembre de 2008, sobre residuos y por la que se derogan determinadas Directivas", Parlamento Europeo.
- (2009). Decreto 32/2009, de 24 de febrero, sobre la valorización de escorias siderúrgicas en la comunidad de Cataluña.
- Adolfsson, D., R. Robinson, F. Engström and B. Björkman (2011). "Influence of mineralogy on the hydraulic properties of ladle slag." Cement and Concrete Research vol 41(8): p.865-871.
- AENOR (1993). "UNE 83-816-93 EX Morteros. Métodos de ensayo. Morteros frescos. Determinación de la capacidad de retención de agua", Madrid, Aenor.
- AENOR (1996). "UNE-EN 933-2 Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 2: Determinación de la granulometría de las partículas. Tamices de ensayo, tamaño nominal de las aberturas", Madrid, Aenor.
- AENOR (1996). "UNE-EN 6988 Recubrimientos metálicos y otros recubrimientos no orgánicos. Ensayo al dióxido de azufre con condensación general de la humedad", Madrid, Aenor.
- AENOR (1996). "UNE 83841 EX Adiciones al hormigón. Escorias granuladas molidas de horno alto. Recomendaciones de uso para las escorias granuladas

molidas utilizadas en los hormigones y morteros fabricados con cemento portland tipo I". Madrid, Aenor.

AENOR (1997). "UNE-EN 1097-6 Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 6: Determinación de la densidad de partículas y la absorción de agua", Madrid, Aenor.

AENOR (1998). "UNE-EN 933-1 Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 1: Determinación de la granulometría de las partículas. Método del tamizado", Madrid, Aenor.

AENOR (1998). "UNE-EN 1015-7 Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 7: Determinación del contenido de aire en el mortero fresco", Madrid, Aenor.

AENOR (1999). "UNE-EN 1015-2 Métodos de ensayo de los morteros de albañilería. Parte 2: Toma de muestra total de morteros y preparación de los morteros para ensayo", Madrid, Aenor.

AENOR (1999). "UNE-EN 1015-6 Métodos de ensayo de los morteros de albañilería. Parte 6: Determinación de la densidad aparente del mortero fresco", Madrid, Aenor.

AENOR (1999). "UNE-EN 1015-19 Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 19: Determinación de la permeabilidad al vapor de agua de los morteros de revoco y enlucido", Madrid, Aenor.

AENOR (1999). "UNE-EN 12370 Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la resistencia a la cristalización de sales", Madrid, Aenor.

AENOR (2000). "UNE-EN 1015-3 Métodos de ensayo de los morteros de albañilería. Parte 3: Determinación de la consistencia del mortero fresco (por la mesa de sacudidas)", Madrid, Aenor.

AENOR (2000). "UNE-EN 1015-9 Métodos de ensayo de los morteros de albañilería. Parte 9: Determinación del periodo de trabajabilidad y del tiempo abierto del mortero fresco", Madrid, Aenor.

AENOR (2000). "UNE-EN 1015-10 Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 10: Determinación de la densidad aparente en seco del mortero endurecido", Madrid, Aenor.

AENOR (2000). "UNE-EN 1015-11 Métodos de ensayo de los morteros de albañilería. Parte 11: Determinación de la resistencia a flexión y a compresión del mortero endurecido", Madrid, Aenor.

AENOR (2000). "UNE-EN 1015-12 Métodos de ensayo de los morteros de albañilería. Parte 12: Determinación de la resistencia a la adhesión de los morteros para revoco y enlucido endurecidos aplicados sobre soporte", Madrid, Aenor.

AENOR (2003). "UNE-EN 998-1 Especificaciones de los morteros para albañilería. Parte 1: Morteros para revoco y enlucido", Madrid, Aenor.

AENOR (2003). "UNE-EN 1015-18 Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 18: Determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad del mortero endurecido", Madrid, Aenor.

AENOR (2003). "UNE-EN 13139 Áridos para morteros", Madrid, Aenor.

AENOR (2003). "UNE-EN 14066 Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la resistencia al envejecimiento por choque térmico", Madrid, Aenor.

AENOR (2004). "UNE-EN 998-2 Especificaciones de los morteros para albañilería. Parte 2: Morteros para albañilería", Madrid, Aenor.

AENOR (2005). "UNE-EN 197-1:2000/A1 Cemento. Parte1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes", Madrid, Aenor.

AENOR (2008). "UNE EN 13755 Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la absorción de agua a presión atmosférica", Madrid, Aenor.

AENOR (2010). "UNE-EN 934-3 Aditivos para hormigones, morteros y pastas. Parte 3: Aditivos para morteros para albañilería. Definiciones, requisitos, conformidad, marcado y etiquetado", Madrid, Aenor.

AENOR (2011). "UNE-EN 12371 Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la resistencia a la heladicidad", Madrid, Aenor.

AENOR (2011). "UNE-EN 22202-1 Productos de piedra natural. Construcción de pavimentos con piedra natural. Parte 1: Baldosas para pavimentación de suelos y escaleras", Madrid, Aenor.

AENOR (2011). "UNE-EN 22203 Productos de piedra natural. Construcción de aplacados de fachadas con piedra natural", Madrid, Aenor.

AENOR (2013). "UNE-EN 1744-1. Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos. Parte 1: Análisis químico". Madrid, Aenor.

AFAM (2004). "Morteros para fábricas". Madrid, Asociación Nacional de Fabricantes de Mortero.

Akin Altun, I. and I. Yilmaz (2002). "Study on steel furnace slags with high MgO as additive in Portland cement." Cement and Concrete Research. vol 32(8): p. 1247-1249.

Alejandro Sánchez, F. J. (2002). "Historia, caracterización y restauración de morteros". Sevilla, Universidad de Sevilla.

Amaral de Lima, L. (1999). "Hormigones con escorias de horno eléctrico como áridos: propiedades, durabilidad y comportamiento ambiental", Politécnica de Catalunya.

Anastasiou, E. K., I. Papayianni and M. Papachristoforou (2014). "Behavior of self compacting concrete containing ladle furnace slag and steel fiber reinforcement." Materials and Design **vol 59**: p.454-460.

ANEFA (2014). "El sector de los áridos en 2013." Revista anual Anefa 2014(Asociación Nacional de Empresarios Fabricantes de Áridos).

ARCERLORMITTAL. from <http://spain.arcelormittal.com/>.

Arribas García, I. (2011). "Estudio y diseño de hormigones estructurales basados en la incorporación de subproductos siderúrgicos: viabilidad técnica", Universidad del País Vasco.

Arribas, I., I. Vegas, J. T. San-José and J. M. Manso (2014). "Durability studies on steelmaking slag concretes." Materials and Design **vol 63**: p.168-176.

ASTM (2000). "D 4792 Standard test method for potential expansion of aggregates from hydration reactions", American Society for Testing and Materials. Philadelphia, PA. Annual Book of ASTM Standard.

Balcázar, N. (1992). "La gestión medioambiental de la escoria LD: su utilización en agricultura y silvicultura", Universidad de Alcalá.

Barra, M., E. V. Ramonich and M. A. Muñoz (2001). Stabilization of soils with steel slag and cement for application in rural and low traffic roads. Beneficial Use of Recycled Materials in Transportation Applications. RMCR University of Durham, Arlington, Va: p.423-432.

Bonnot, J., G. Colombier, N. D. Chi, A. Panis, M. Baillie, A. Astesan, J. J. Chauvin, G. Morel, A. Rigot and B. Bivert (1980). Utilisation du laitier granule en construction routiere. RAPPORT FINAL CONVENTION N 7210-XA/3/301 (EUR6553FR).

Burström, G., E. Ye and A. M. Fällman (1995). "Utilisation and stabilisation of steelmaking slags." AFR-report **vol 57**.

Bustillo Revuelta, M. (2008). ""Hormigones y morteros"." Fueyo editores. Madrid.

Capodilupo, D. "Development of the foamy slag method in the electric arc furnace for melting and treatment of high-chrome steel." Final report CSM European Commission. Eds. In press.

CEDEX (2011). Catálogo de Residuos utilizables en construcción. Escorias de horno alto [<http://www.cedexmateriales.vsf.es/view/archivos/residuos/255.pdf>],

Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. Ministerio de Medio Ambiente Rural y Marino. Ministerio de Fomento.

CEDEX (2012). "Catálogo de Residuos utilizables en construcción. Escorias de acería LD"[\[http://www.cedexmateriales.vsf.es/view/archivos/residuos/282.pdf\]](http://www.cedexmateriales.vsf.es/view/archivos/residuos/282.pdf), Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. Ministerio de Medio Ambiente Rural y Marino. Ministerio de Fomento.

CEDEX (2013). "Catálogo de Residuos utilizables en construcción. Escorias de acería de horno eléctrico de arco"[\[http://www.cedexmateriales.vsf.es/view/archivos/residuos/217.pdf\]](http://www.cedexmateriales.vsf.es/view/archivos/residuos/217.pdf), Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. Ministerio de Medio Ambiente Rural y Marino. Ministerio de Fomento.

Chatterjee, A. (2003). High-belite Portland cement—An update on development, characterization and applications. Proceedings of the 11th International Congress on the Chemistry of Cements, Durban, South Africa.

Das, B., S. Prakash, P. S. R. Reddy and V. N. Misra (2007). "An overview of utilization of slag and sludge from steel industries." Resources Conservation and Recycling **vol 50**(1): p.40-57.

Diamond, S. (1976). Cement paste microstructure—an overview at several levels. Proc. Conf. hydraulic cement pastes: their structure and properties, Sleafield.

DIN (1997). "DIN 50018 Sulfur dioxide corrosion testing in a saturated atmosphere", Berlin, Deutsches Institut für Normung.

Dussart, J. (1986). Utilisation de la scorie LD en technique routiere: rapport final, Office des publications officielles des Communautés européennes, Eds. EUR 10244 FR.

Etxeberria, M., C. Pacheco, J. M. Meneses and I. Berridi (2010). "Properties of concrete using metallurgical industrial by-products as aggregates." Construction and Building Materials **24**(9): p.1594-1600.

EUROSLAG. "The European Association representing metallurgical slag producers and processors [\[http://www.euroslag.com/\]](http://www.euroslag.com/)."

Ferrer, F. J. (2006). "El refractario en la fabricación de acero inoxidable." Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio **vol 45**(5): p.363-366.

Formoso, A. (1994). Use of Blast furnace and steelwork slags as fertilizer. 5th EC Conference RTD on Industrial Technologies. Proceedings. Brussels 6-9 December 1994: p. 71-72.

Formoso, A., F. López, F. Medina and N. Balcázar (1996). "Utilización agrícola de la escoria LD." Informe Final CENIM. Comisión Europea EUR(Luxembourg) **EUR 15591**.

Frías, M., J. T. San-Jose and I. Vegas (2010). "Steel slag aggregate in concrete: the effect of ageing on potentially expansive compounds." Materiales de Construcción **vol 60**(297): p.33-46.

Frías, M., M. I. Sánchez and A. Uría (2002). "Study of the instability of black slags from electric arc furnace steel industry." Materiales de Construcción **vol 52**(267): p.79-83.

Frías Rojas, M. and M. I. Sánchez de Rojas (2004). "Chemical assessment of the electric arc furnace slag as construction material: Expansive compounds." Cement and Concrete Research **vol 34**(10): p.1881-1888.

Gárate Rojas, I. (1993). "Artes de la cal". Madrid, Ministerio de Cultura. Dirección General de Bellas Artes y Archivos. Instituto de Conservación y Restauración de Bienes Culturales.

Geiseler, J. (1991). Verwertung der Stahlwerksschlacken. Stahl und Eisen 111, Nr 1. Düsseldorf. **vol 1**: p.133-138.

Geiseler, J. (1994). "Der bustoff electroofenshalacke. Entstehung, nutzung, erfahrungen." Schiriftenreihe der forschungsgemeinschaft Eisenhüttenschlacken **vol 3**: p.1-8.

Geiseler, J. (1996). "Use of steelworks slag in Europe." Waste Management **vol 16**(1-3): p.59-63.

Geiseler, J. and R. Schlosser (1986). Criteria for the Utilization of Electric Furnace Slags.(Retroactive Coverage). European Electric Steel Congress(Congresso Europeo sull' Acciaio Elettrico). II, Florence.

Goldring, D. C. and L. M. Juckes (1997). "Petrology and stability of steel slags." Ironmaking & Steelmaking **vol 24**(6): p.447-456.

González Martínez, J. J. (1999). Estudio del hinchamiento de la escoria de horno eléctrico de arco. Valoración como material de construcción. Informe final Proyecto de Investigación Universidad-Empresa UE 97-19. Bilbao 1999.

Goñi, S., A. Guerrero, F. Puertas, M. Hernández, M. Palacios, J. Dolado, W. Zhu and T. Howind (2011). "Textural and mechanical characterization of CSH gels from hydration of synthetic T1-C3S, β -C2S and their blends." Materiales de Construcción **vol 61**(302): pp.169-183.

Grupo-Etxeberria. "Hormor Áridos." from <http://www.grupoetxeberria.com/>.

IHOBE, S. A. (1999). "Libro Blanco de Minimización de Residuos y Emisiones de Escorias de Acería", Departamento de Ordenación del Territorio, Vivienda y Medio Ambiente del Gobierno Vasco.

Industria Comercio y Turismo, M. d. (2004). "Instrucción sobre criterios para la puesta en práctica del mercado CE de los morteros para albañilería".

ITeC. (2014). "Base de precios de la construcción." from <http://itec.es/nouBedec.e/bedec.aspx>.

Japan-society-of-Civil-Engineers (2004). Recommendations for design and construction of concrete structures using electric arc furnace oxidizing slag aggregate. ISBN-4-8106-0478-0.

Jawed, I., J. Skalny and J. Young (1983). Structure and Performance of Cements, edited by P. Barnes. Chapter 6, Applied Science Publishers, London: 237-317.

Jones, N. (2001). The successful use of EAF slag in asphalt. Proc., 2nd European Slag Conf: p.123-135.

Juckes, L. M. (2003). "The volume stability of modern steelmaking slags." Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy Section C-Mineral Processing and Extractive Metallurgy **vol 112**(3): p.C177-C197.

Klemm, W. A. and F. Miller (1997). Plausibility of delayed ettringite formation as a distress mechanism—Considerations at ambient and elevated temperatures. Proceedings of the 10th International Congress on the Chemistry of Cement.

Koros, P. J. (2003). "Dusts, scale, slags, sludges... Not wastes, but sources of profits." Metallurgical and Materials Transactions **vol 34**(6): p.769-779.

Lopez, F. A., N. Balcazar, A. Formoso, M. Pinto and M. Rodriguez (1995). "The recycling of Linz-Donawitz (LD) converter slag by use as a liming agent on pasture land." Waste Management & Research **Vol.13**(6): p.555-568.

López, F. A. and F. Medina (1989). "Escorias LD: co-productos de la industria siderúrgica." C y E.

Losáñez, M. (2005). "Aprovechamiento integral de escorias blancas y negras de acería eléctrica en construcción y obra civil", Universidad del País Vasco.

Luxán, M. P. (1995). Tipificación de escorias producidas por la siderurgia de horno eléctrico, como material utilizable en la construcción. I Caracterización previa de las escorias. Informe técnico 16.939-I. CSIC. Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja. Madrid.

Luxán, M. P., R. Sotolongo, F. Dorrego and E. Herrero (2000). "Characteristics of the slags produced in the fusion of scrap steel by electric arc furnace." Cement and Concrete Research. **vol 30**(4): p.517-519.

Mahieux, P. Y., J. E. Aubert and G. Escadeillas (2009). "Utilization of weathered basic oxygen furnace slag in the production of hydraulic road binders." Construction and Building Materials. **vol 23**(2): p.742-747.

Manso, J. M., J. J. González and J. A. Polanco (2004). "Electric Arc Furnace Slag in Concrete." Journal of Materials in Civil Engineering. **vol. 16(6)**: p.639-645.

Manso, J. M., D. Hernández, M. M. Losáñez and J. J. González (2011) "Design and elaboration of concrete mixtures using steelmaking slags." ACI Materials Journal **vol 108(6)**, p.673-681.

Manso, J. M., M. Losañez, J. A. Polanco and J. J. González (2005). "Ladle Furnace Slag in Construction." Journal of Materials in Civil Engineering. **vol. 17(5)**: p.513-518.

Manso, J. M., V. Ortega-Lopez, J. A. Polanco and J. Setien (2013). "The use of ladle furnace slag in soil stabilization." Construction and Building Materials **vol 40**: p.126-134.

Manso, J. M., J. A. Polanco, M. Losañez and J. J. González (2006). "Durability of concrete made with EAF slag as aggregate." Cement & Concrete Composites **vol. 28**: p.528-534.

Manso, J. M., A. Rodríguez, Á. Aragón and J. J. González (2011). "The durability of masonry mortars made with ladle furnace slag." Construction and Building Materials **vol 25(8)**: p.3508-3519.

Manso, J. M. and J. Setien (2006). "Investigación de nuevos usos de las escorias de horno eléctrico de arco (EAF): la oportunidad de los hormigones." Hormigón y acero (**241**): p.51-57.

Manso Villalaín, J. M. (2001). "Fabricación de hormigón hidráulico con escoria negra de horno eléctrico de arco" Tesis doctoral, Universidad de Burgos.

Medio Ambiente, M. (2002). ORDEN MAM/304/2002, de 8 de febrero, por la que se publican las operaciones de valorización y eliminación de residuos y la lista europea de residuos.

Medio Ambiente Medio Rural y Marino, M. (2009). Resolución de 20 de enero de 2009, de la Secretaría de Estado de Cambio Climático, por la que se publica el Acuerdo del Consejo de Ministros por el que se aprueba el Plan Nacional Integrado de Residuos para el período 2008-2015.

Mehta, P. (1986). Hardened cement paste— microstructure and its relationship to properties. International Congress on the Chemistry of Cement, (Río de Janeiro) Vol 8.

Mehta, P. K. (2001). "Reducing the environmental impact of concrete. Concrete can be durable and enviromentaly friendly." Concrete international **vol 23(10)**: p.61-66.

Ministerio-Fomento (2008). "Instrucción de Hormigón Estructural. EHE-08". Madrid, Ministerio de Fomento. Centro de publicaciones.

Ministerio-Fomento (2009). "RC-08 Instrucción para la recepción de cementos". Madrid, Centro de Publicaciones, Secretaría General Técnica, Ministerio de Fomento.

Montenegro, J. M., M. Celemín-Matachana, J. Cañizal and J. Setién (2013). "Ladle furnace slag in the construction of embankments: Expansive behavior." Journal of Materials in Civil Engineering **vol 25**(8): p.972-979.

Motz, H. and J. Geiseler (2001). "Products of steel slags an opportunity to save natural resources." Waste Management **vol 21**(3): p.285-293.

Nicolae, M., I. Vilciu and F. Zaman (2007). "X-ray diffraction analysis of steel slag and blast furnace slag viewing their use for road construction." UPB Scientific Bulletin, Series B: Chemistry and Materials Science **vol 69**(2): p.99-108.

Obras Públicas y Transportes, M. d. (1990). "Norma Básica de la Edificación NBE FL-90. Muros resistentes de fábrica de ladrillo", Secretaría General Técnica. Centro de Publicaciones.

Okumura, H. (1993). Recycling of iron and steelmaking slags in Japan" Minerals, Metals & Materials Soc. First International Conference on Processing Materials for Properties. H. Henein and T. Oki. Warrendale, Minerals, Metals & Materials Soc: p.803-806.

Ortega-López, V., J. M. Manso, I. I. Cuesta and J. J. González (2014). "The long-term accelerated expansion of various ladle-furnace basic slags and their soil-stabilization applications." Construction and Building Materials **vol 68**(0): p. 455-464.

Ortega López, V. (2011). "Aprovechamiento de escorias blancas (LFS) y negras (EAFS) de acería eléctrica en la estabilización de suelos y en capas de firmes de caminos rurales", Universidad de Burgos.

Papayianni, I. and E. Anastasiou (2012). "Effect of granulometry on cementitious properties of ladle furnace slag." Cement & Concrete Composites **34**(3): p.400-407.

Pasetto, M. and N. Baldo (2010). "Experimental evaluation of high performance base course and road base asphalt concrete with electric arc furnace steel slags." Journal of hazardous materials **vol 181**(1): p. 938-948.

Pellegrino, C. and V. Gaddo (2009). "Mechanical and durability characteristics of concrete containing EAF slag as aggregate." Cement and Concrete Composites **vol 31**(9): p.663-671.

Poh, H. Y., G. S. Ghataora and N. Ghazireh (2006). "Soil stabilization using basic oxygen steel slag fines." Journal of Materials in Civil Engineering **vol 18**(2): p.229-240.

Polanco, J. A., J. M. Manso, J. Setién and J. J. González (2011). "Strength and durability of concrete made with electric steelmaking slag." ACI Materials Journal **vol 108**(2): p.196-203.

Posch, W., H. Presslinger and H. Hiebler (2002). "Mineralogical evaluation of ladle slags at voestalpine Stahl GmbH." Ironmaking & Steelmaking **vol 29**(4): p.308-312.

Powers, T. C. (1958). "Structure and physical properties of hardened Portland cement paste." Journal of the American Ceramic Society **41**(1): 1-6.

Prieto Barrio, M. I. (2012). "Análisis del comportamiento a corrosión de armaduras embebidas en probetas de mortero, con sustitución parcial de áridos y cemento por escorias blancas de horno cuchara", Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica de Madrid.

Prieto Barrio, M. I., A. Cobo, A. Rodríguez Sáiz and J. M. Manso Villalaín (2011). Estudio de la corrosión de armaduras embebidas en morteros prefabricados con sustitución parcial y total de áridos por escorias blancas de horno cuchara. V Congreso de la Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural, . Octubre 2011.

Prieto, M. I., A. Cobo, A. Rodriguez and V. Calderon (2013). "Corrosion behavior of reinforcement bars embedded in mortar specimens containing ladle furnace slag in partial substitution of aggregate and cement." Construction and Building Materials **38**: p.188-194.

Puertas, M., F. Blanco and S. Palomo (1989). "Microestructura del hormigón-Influencia sobre sus propiedades." Instituto de Ciencias de la construcción Eduardo Torroja. Madrid n°398.

Qian, G. R., D. D. Sun, J. H. Tay and Z. Y. Lai (2002). "Hydrothermal reaction and autoclave stability of Mg bearing RO phase in steel slag." British Ceramic Transactions **vol 101**(4): p.159-164.

Reddy, A. S., R. K. Pradhan and S. Chandra (2006). "Utilization of Basic Oxygen Furnace (BOF) slag in the production of a hydraulic cement binder." International Journal of Mineral Processing **79**(2): p.98-105.

Richardson, I. G. and J. G. Cabrera (2000). "The nature of C-S-H in model slag-cements." Cement & Concrete Composites **vol 22**(4): p.259-266.

Robinson, H. L. (2002). The utilization of blastfurnace and steel making slags as aggregates for construction. Industrial Minerals and Extractive Industry Geology. P. W. Scott and C. M. Bristow. Bath, Geological Soc Publishing House (36th Forum on the Geology of Industrial Minerals/11th Extractive Industry Geology Conference): 327-330.

Rodríguez-Mora, O. (2003). "Morteros: guía general", AFAM, Asociación Nacional de Fabricantes de Mortero.

Rodríguez, A., J. M. Manso, Á. Aragón and J. J. González (2009). "Strength and workability of masonry mortars manufactured with ladle furnace slag." Resources, Conservation and Recycling **vol. 53**: p.645-651.

Rodríguez Sáiz, A. (2008). "Fabricación de morteros de albañilería con escoria blanca de horno cuchara y su utilización en construcción" Tesis doctoral, Universidad de Burgos.

Rubio, A. R. and J. G. Carretero (1991). "La aplicación de las escorias de acería en carreteras." Ingeniería Civil **vol 80**: p.5-9.

Rubio, M. D., F. Contreras, M. A. Parrón and F. Rubio (2011). Resistencia mecánica de hormigones con sustitución de un porcentaje de cemento por polvos de humo y escoria de horno de arco eléctrico. V Congreso ACHE. Octubre 2011. Barcelona.

Ruiz-Cuevas López-Para, F. and J. Ibarzabal (1988). Presentación del producto escoria-escoria. Materiales básicos, fabricación, características y propiedades. Jornadas sobre escorias Tratadas. Oviedo.

Salas García, M. Á. (2014). Morteros aligerados con propiedades mejoradas fabricados con residuos de poliamida, Universidad de Burgos.

San-José, J. T., I. Vegas, I. Arribas and I. Marcos (2014). "The performance of steel-making slag concretes in the hardened state." Materials & Design **60(0)**: 612-619.

San José, J. (2000). "Reutilización y valorización en obra civil de escorias de horno de arco eléctrico producidas en la CAPV." Arte y Cemento **124 (6)**: p.124-126.

Santos, R. M., D. Ling, A. Sarvaramini, M. X. Guo, J. Elsen, F. Larachi, G. Beaudoin, B. Blanpain and T. Van Gerven (2012). "Stabilization of basic oxygen furnace slag by hot-stage carbonation treatment." Chemical Engineering Journal **203**: p.239-250.

Schmitt, H. and A. Heene (2004). "Tratado de Construcción", Editorial Gustavo Gili, SA.

Schoenberger, H. (2001). Final draft: best available techniques reference document on the production of iron and steel. European Comision, Joint Research Centre, IPTS. European IPPC Bureau.

Setién, J., D. Hernández and J. J. González (2009). "Characterization of ladle furnace basic slag for use as a construction material." Construction and Building Materials **vol 23**: p.1788-1794.

Shen, D.-H., C.-M. Wu and J.-C. Du (2009). "Laboratory investigation of basic oxygen furnace slag for substitution of aggregate in porous asphalt mixture." Construction and Building Materials. **vol 23(1)**: p.453-461.

Shi, C. J. (2002). "Characteristics and cementitious properties of ladle slag fines from steel production." Cement and Concrete Research **32**(3): p.459-462.

Shi, C. J. (2004). "Steel slag - Its production, processing, characteristics, and cementitious properties." Journal of Materials in Civil Engineering **vol 16**(3): p.230-236.

Shi, C. J. and J. S. Qian (2000). "High performance cementing materials from industrial slags - a review." Resources Conservation and Recycling **29**(3): p.195-207.

Sidorova, A. (2013). Estudio del efecto de la naturaleza del árido reciclado en la microestructura y propiedades de la zona de transición árido-pasta de cemento, Universidad Politécnica de Cataluña.

Smolczyk, H. (1980). Slag structure and identification of slags. Proceedings, 71st International Congress on the Chemistry of Cement.

Suer, P., J. E. Lindqvist, M. Arm and P. Frogner-Kockum (2009). "Reproducing ten years of road ageing - Accelerated carbonation and leaching of EAF steel slag." Science of the Total Environment **407**(18): p.5110-5118.

Thomas, G. H. (1983). Investigations on LD slag with particular reference to its use for road construction. Final report British Steel Corporation. Commission of the European Communities, Eds. EUR 8622 EN.

Tomasiello, S. and M. Felitti (2010). "EAF Slag in self-compacting concretes." Architecture and Civil Engineering **vol 8** (1): p.13-21.

Topcu, I. B. and A. R. Boga (2010). "Effect of ground granulate blast-furnace slag on corrosion performance of steel embedded in concrete." Materials & Design **31**(7): p.3358-3365.

Tossavainen, M., F. Engstrom, Q. Yang, N. Menad, M. Lidstrom Larsson and B. Bjorkman (2007). "Characteristics of steel slag under different cooling conditions." Waste Management. **vol 27**(10): p.1335-1344.

Tsakiridis, P. E., G. D. Papadimitriou, S. Tsvilis and C. Koroneos (2008). "Utilization of steel slag for Portland cement clinker production." Journal of Hazardous Materials. **vol 152**(2): p.805-811.

Tüfekçi, M., A. Demirbaş and H. Genç (1997). "Evaluation of steel furnace slags as cement additives." Cement and Concrete Research **vol 27**(11): p.1713-1717.

UNESID. "Unión de Empresas siderúrgicas.", from <http://www.unesid.org>.

UNESID. (2013). "IRIS 2013 Informe 2013 sobre el Reciclaje del acero en la Industria Siderúrgica Española." from

<http://www.unesid.org/iris2013/IRISINFORMERECICLAJEACERO2013.pdf>

Fecha de consulta: septiembre 2014.

UNESID. (2013). "La industria siderúrgica española en 2013." Unión de empresas siderúrgicas, from <http://blog.unesid.org/wp-content/uploads/2014/07/Folleto2013.pdf> Fecha de consulta: septiembre 2014.

Valdehita Rosello, M. T. (1976). "Morteros de cemento para albañilería". Madrid, Patronato Juan de la Cierva de Investigación Técnica. Instituto Eduardo Torroja de la Construcción y del Cemento. Consejo Superior de Investigaciones Científicas.

Vázquez Ramonich, E. and M. Barra (2001). "Reactivity and expansion of electric arc furnace slag in their application in construction." Materiales De Construccion **51**(263-64): p.137-148.

Vilanova Fernández, Á. (2009). "Influencia de la dosificación y empleo de diferentes tipos de cemento y adiciones en las propiedades mecánicas del hormigón autocompactante", Universidad Politécnica de Madrid.

Vivienda, M. d. (2006). "Documento Básico SE-F Seguridad Estructural: Fábrica".

Wachsmuth, F., J. Geiseler, W. Fix, K. Koch and K. Schwerdtfeger (1981). "Contribution to the structure of BOF-slugs and its influence on their volume stability." Canadian Metallurgical Quarterly **20**(3): p.279-284.

Waligora, J., D. Bulteel, P. Degrugilliers, D. Damidot, J. L. Potdevin and M. Measson (2010). "Chemical and mineralogical characterizations of LD converter steel slags: A multi-analytical techniques approach." Materials Characterization. **vol 61**(1): p.39-48.

World-Steel-Association. (2012). "Steel statistical year book 2012."

World-Steel-Association (2014) "World Steel in Figures 2014." **ISBN: 978-2-930069-73-9**.

Xie, J., S. P. Wu, J. T. Lin, J. Cai, Z. W. Chen and W. Wei (2012). "Recycling of basic oxygen furnace slag in asphalt mixture: Material characterization & moisture damage investigation." Construction and Building Materials **36**: p.467-474.

Xuequan, W., Z. Hong, H. Xinkai and L. Husen (1999). "Study on steel slag and fly ash composite Portland cement." Cement and Concrete Research **vol 29**(7): p.1103-1106.

Yildirim, I. Z. and M. Prezzi (2011). "Chemical, mineralogical, and morphological properties of steel slag." Advances in Civil Engineering **vol 2011** (Article ID 463638).

Anexo

Índice de Tablas, Figuras y Gráficos

Índice de Tablas

Tabla 2.1 Producción siderúrgica básica en España.....	12
Tabla 2.2 Calidad del acero producido en España	13
Tabla 2.3 Acerías españolas	15
Tabla 2.4 Producción de escorias en Europa año 2010	16
Tabla 2.5 Tipos de escorias de alto horno BF	19
Tabla 2.6 Reparto de producción de acero por comunidades.	25
Tabla 2.7 Estimación orientativa de la generación de escorias en Hornos Eléctricos de Arco en España	25
Tabla 2.8 Composición química escorias BOF, EAF y LF (I)	29
Tabla 2.9 Composición química escorias BOF, EAF y LF (II)	30
Tabla 2.10 Composición química escoria negra.....	31
Tabla 2.11 Composición química escoria blanca	31
Tabla 2.12 Constituyentes cristalinos detectados por DRX.....	32
Tabla 2.13 Composición mineralógica escoria	33
Tabla 2.14 Características físicas de las escorias negras.....	34
Tabla 2.15 Propiedades físicas de las escorias blancas	34
Tabla 2.16 Límites superior e inferior de tamaño de árido.	47
Tabla 2.17 Requisitos de granulometría para el filler del árido.....	48
Tabla 2.18 Límites del contenido en finos	48
Tabla 2.19 Categorías de aplicación	48
Tabla 2.20 Requisitos físico-mecánicos de los áridos según EHE.....	49
Tabla 2.21 Limitaciones químicas de los áridos según EHE	50
Tabla 2.22 Clases de mortero diseñados.	53
Tabla 2.23 Resistencia característica a compresión de fábricas usuales f_k (N/mm ²).....	54
Tabla 3.1 Tipos de consistencia en función del escurrimiento	66
Tabla 3.2 Valor de escurrimiento definido para diferentes tipos de mortero relacionado con la densidad aparente del mortero fresco	67

Índice de Tablas, Figuras y Gráficos

Tabla 4.1 Certificado de características técnicas CEM I 42,5 R.....	96
Tabla 4.2 Componentes del cemento referidos al núcleo del cemento, excluido el regulador de fraguado.....	96
Tabla 4.3 Análisis químico del cemento FRX.....	97
Tabla 4.4 Análisis del agua potable de la ciudad de Burgos	98
Tabla 4.5 FRX Arena [AIMSA]	99
Tabla 4.6 Granulometría del árido natural.....	99
Tabla 4.7 Granulometría del árido siderúrgico.	102
Tabla 4.8 Caracterización física escoria negra EAF.....	103
Tabla 4.9 Caracterización química escoria negra EAF	103
Tabla 4.10 Difracción de Rayos X. Escoria negra.....	104
Tabla 4.11 Fluorescencia de rayos X. Escoria negra.....	104
Tabla 4.12 Microanálisis por energía dispersa de rayos X EAF.....	107
Tabla 4.13 Caracterización física escoria blanca LF	110
Tabla 4.14 Caracterización química escoria blanca LF.....	110
Tabla 4.15 Difracción de rayos X (DRX) escoria blanca LF	111
Tabla 4.16 Composición química escoria blanca LF	111
Tabla 4.17 Microanálisis por energía dispersa de rayos X LF.....	114
Tabla 4.18 Características de los aditivos empleados	117
Tabla 5.1 Equipos utilizados para la realización de ensayos	121
Tabla 5.2 Relaciones en peso de morteros para construcción.....	124
Tabla 5.3 Distribución del árido en las familias de ensayo.....	125
Tabla 5.4 Aditivos ensayados	126
Tabla 5.5 Relación de dosificaciones estudiadas para la familia MED	127
Tabla 5.6 Aditivos seleccionados	129
Tabla 5.7 Designación de los morteros ensayados.....	130
Tabla 6.1 Dosificaciones de los morteros.....	133
Tabla 6.2 Relación agua/cemento de los morteros estudiados.....	134
Tabla 6.3 Comparativa relación agua/cemento (w/c).....	135
Tabla 6.4 Densidad del mortero fresco	137
Tabla 6.5 Comparativa densidad aparente mortero fresco	138
Tabla 6.6 Contenido de aire ocluido en el mortero.....	140
Tabla 6.7 Comparativa contenido aire ocluido	141

Tabla 6.8 Tiempo de utilización o de trabajabilidad de los morteros ...	142
Tabla 6.9 Comparativa tiempo de utilización o trabajabilidad.....	143
Tabla 6.10 Retención de agua de los morteros	147
Tabla 6.11 Comparativo retención de agua de los morteros	148
Tabla 6.12 Densidad aparente en seco del mortero endurecido	149
Tabla 6.13 Comparativo densidad aparente seca mortero endurecido	150
Tabla 6.14 Resistencias mecánicas flexión y compresión MR	152
Tabla 6.15 Resistencias mecánicas flexión y compresión MEA.....	152
Tabla 6.16 Resistencias mecánicas flexión y compresión MEB	153
Tabla 6.17 Resistencias mecánicas flexión y compresión MEC.....	153
Tabla 6.18 Resistencias mecánicas flexión y compresión MED.....	153
Tabla 6.19 Resistencias mecánicas flexión y compresión MR-C22	154
Tabla 6.20 Resistencias mecánicas flexión y compresión MEA-C22 ..	154
Tabla 6.21 Resistencias mecánicas flexión y compresión MEB-C22 ..	155
Tabla 6.22 Resistencias mecánicas flexión y compresión MEC-C22 ..	155
Tabla 6.23 Resistencias mecánicas flexión y compresión MED-C22 ..	155
Tabla 6.24 Resistencias mecánicas flexión y compresión MR-201.....	156
Tabla 6.25 Resistencias mecánicas flexión y compresión MEA-201...	156
Tabla 6.26 Resistencias mecánicas flexión y compresión MEB-201...	156
Tabla 6.27 Resistencias mecánicas flexión y compresión MEC-201 ..	157
Tabla 6.28 Resistencias mecánicas flexión y compresión MED-201 ..	157
Tabla 6.29 Resistencias mecánicas flexión y compresión MR-202.....	158
Tabla 6.30 Resistencias mecánicas flexión y compresión MEA-202...	158
Tabla 6.31 Resistencias mecánicas flexión y compresión MEB-202...	158
Tabla 6.32 Resistencias mecánicas flexión y compresión MEC-202 ..	159
Tabla 6.33 Resistencias mecánicas flexión y compresión MED-202 ..	159
Tabla 6.34 Resumen resistencias morteros sin aditivos.....	160
Tabla 6.35 Resumen resistencias morteros C22.....	162
Tabla 6.36 Resumen resistencias morteros PM201	164
Tabla 6.37 Resumen resistencias morteros PM202	166
Tabla 6.38 Comparativo resistencia a flexión a los 28 días.....	168
Tabla 6.39 Comparativo resistencia a compresión a los 28 días	170
Tabla 6.40 Resistencia a la adhesión del mortero endurecido	174

Índice de Tablas, Figuras y Gráficos

Tabla 6.41 Comparativo resistencia a la adhesión.....	176
Tabla 6.42 Absorción de agua a presión atmosférica	178
Tabla 6.43 Comparativa absorción de agua a presión atmosférica	179
Tabla 6.44 Coeficiente de absorción por capilaridad de los morteros y altura de agua alcanzada.....	181
Tabla 6.45 Comparativo coeficiente de absorción por capilaridad	182
Tabla 6.46 Permeabilidad al vapor de agua de los morteros	188
Tabla 6.47 Macroporosidad de los morteros	201
Tabla 6.48 Porosimetría de intrusión de mercurio MIP	207
Tabla 7.1 Variación en peso y volumen ensayo heladicidad.....	213
Tabla 7.2 Resistencias mecánicas ensayo heladicidad	216
Tabla 7.3 Variación de peso ensayo choque térmico.....	218
Tabla 7.4 Resistencias mecánicas ensayo choque térmico	220
Tabla 7.5 Variación del peso seco. Ensayo agua salina	222
Tabla 7.6 Expansión. Ensayo agua salina	223
Tabla 7.7 Resistencias mecánicas ensayo agua salina	226
Tabla 7.8 Variación del peso seco. Ensayo cristalización de sales.....	228
Tabla 7.9 Resistencias mecánicas ensayo cristalización de sales.....	231
Tabla 7.10 Variación del peso seco. Ensayo Kesternich.....	232
Tabla 7.11 Resistencias mecánicas ensayo Kesternich.....	234
Tabla 8.1 Dosificación 1m ³ morteros sin aditivos	242
Tabla 8.2 Dosificación 1m ³ morteros C22	242
Tabla 8.3 Dosificación 1m ³ morteros PM201	243
Tabla 8.4 Dosificación 1m ³ morteros PM202	243
Tabla 8.5 Coste materias primas	244
Tabla 8.6 Cálculo coste transporte residuo	245
Tabla 8.7 Coste m ³ de mortero	246

Índice de Gráficos

Gráfico 2.1 Producción mundial de acero (Unesid).....	11
Gráfico 2.2 Producción de acero en España.....	13
Gráfico 2.3 Producción de escorias en Europa año 2010.....	17
Gráfico 2.4 Usos de las escorias en España.....	17
Gráfico 4.1 Curva granulométrica de la arena.....	100
Gráfico 4.2 Curvas granulométricas de referencia.....	100
Gráfico 4.3 Curva granulométrica del árido siderúrgico.....	102
Gráfico 4.4 Degradación por temperatura en la escoria negra EAF....	108
Gráfico 4.5 Curva derivada TGA de la escoria negra EAF.....	108
Gráfico 4.6 Degradación por temperatura en la escoria blanca LF.....	115
Gráfico 4.7 Curva derivada TGA de la escoria blanca LF.....	115
Gráfico 5.1 Resistencia a compresión 7D dosificaciones experimentales	128
Gráfico 6.1 Evolución relación agua/cemento.....	136
Gráfico 6.2 Evolución densidad aparente mortero fresco.....	139
Gráfico 6.3 Evolución contenido de aire ocluido.....	142
Gráfico 6.4 Tiempo de utilización morteros sin aditivos.....	144
Gráfico 6.5 Tiempo de utilización morteros con Cimsil C22.....	145
Gráfico 6.6 Tiempo de utilización morteros con PM 202.....	145
Gráfico 6.7 Tiempo de utilización morteros con PM201.....	146
Gráfico 6.8 Evolución Retención de agua de los morteros.....	148
Gráfico 6.9 Evolución densidad aparente seca mortero endurecido ...	151
Gráfico 6.10 Resistencias a flexión morteros sin aditivos.....	160
Gráfico 6.11 Resistencias a compresión morteros sin aditivos.....	161
Gráfico 6.12 Resistencias a flexión morteros C22.....	162
Gráfico 6.13 Resistencias a compresión morteros C22.....	163
Gráfico 6.14 Resistencias a flexión morteros PM201.....	164
Gráfico 6.15 Resistencias a compresión morteros PM201.....	165
Gráfico 6.16 Resistencias a flexión morteros PM202.....	166
Gráfico 6.17 Resistencias a compresión morteros PM202.....	167

Índice de Tablas, Figuras y Gráficos

Gráfico 6.18 Comparativo resistencias a flexión a los 28 días	169
Gráfico 6.19 Comparativo resistencias a compresión a los 28 días	170
Gráfico 6.20 Relación entre la resistencia a compresión a 28 D y los kg de cemento por m ³ de mortero	171
Gráfico 6.21 Comparativa adherencia mortero endurecido	175
Gráfico 6.22 Adherencia mortero endurecido por familia de estudio ...	176
Gráfico 6.23 Evolución absorción de agua a presión atmosférica	180
Gráfico 6.24 Coeficiente de absorción por capilaridad	181
Gráfico 6.25 Comparativo coef. absorción de agua por capilaridad	183
Gráfico 6.26 Altura de penetración por capilaridad	185
Gráfico 6.27 Flujo de vapor de agua (kg/seg) Morteros sin aditivos	186
Gráfico 6.28 Flujo de vapor de agua (kg/seg) Morteros con C22	186
Gráfico 6.29 Flujo de vapor de agua (kg/seg) Morteros con PM201 ...	187
Gráfico 6.30 Flujo de vapor de agua (kg/seg) Morteros con PM202 ...	187
Gráfico 6.31 Comparativo coef. permeabilidad al vapor de agua	189
Gráfico 6.32 Comparativo coef. permeabilidad al vapor de agua	189
Gráfico 6.33 Volumen intrusivo acumulado	207
Gráfico 6.34 Curvas derivadas de volumen intrusivo	208
Gráfico 7.1 Envejecimiento acelerado. Flexión mortero sin aditivos ...	235
Gráfico 7.2 Envejecimiento acelerado. Flexión morteros C22	236
Gráfico 7.3 Envejecimiento acelerado. Flexión morteros PM201	236
Gráfico 7.4 Envejecimiento acelerado. Flexión morteros PM202	236
Gráfico 7.5 Envejecimiento acelerado. Comp. morteros sin aditivos ..	237
Gráfico 7.6 Envejecimiento acelerado. Compresión morteros C22	237
Gráfico 7.7 Envejecimiento acelerado. Compresión morteros PM201	237
Gráfico 7.8 Envejecimiento acelerado. Compresión morteros PM202	238
Gráfico 8.1 Coste m ³ morteros (sin aditivos y C22)	247
Gráfico 8.2 Coste m ³ morteros (PM201 y PM202)	247
Gráfico 8.3 Comparativa coste-resistencia (100km)	248
Gráfico 8.4 Comparativa coste-resistencia (150km)	249
Gráfico 8.5 Comparativa coste-resistencia (200km)	249

Índice de Figuras

Figura 2.1 Proceso siderúrgico.....	9
Figura 2.2 Distribución de acerías de horno eléctrico en España (ampliación País Vasco Figura 2.3)	14
Figura 2.3 Acerías de Horno eléctrico localizadas en el País Vasco.....	16
Figura 2.4 Producción de aceros inoxidables con afino en convertidor AOD	21
Figura 2.5 Proceso de fabricación de acero con hornos EAF-LF	23
Figura 2.6 Proceso de transformación de acero en hornos EAF-LF	23
Figura 2.7 Tamices de ensayo según UNE-EN 933-2.....	47
Figura 3.1 Mesa de sacudidas	66
Figura 3.2 Determinación de la consistencia.....	66
Figura 3.3 Moldes para el ensayo de trabajabilidad	68
Figura 3.4 Balanza de ensayo Trabajabilidad	68
Figura 3.5 Útiles necesarios ensayo retención agua.....	69
Figura 3.6 Ensayo retención de agua.....	69
Figura 3.7 Molde densidad aparente	70
Figura 3.8 Determinación de la densidad aparente del mortero fresco .	71
Figura 3.9 Molde metálico cilíndrico	72
Figura 3.10 Determinación del aire ocluido	72
Figura 3.11 Saturación progresiva de las probetas hasta saturación	73
Figura 3.12 Balanza hidrostática	73
Figura 3.13 Prensa para realizar ensayos de flexión y compresión.	74
Figura 3.14 Detalle rotura a flexión	75
Figura 3.15 Detalle rotura a compresión	75
Figura 3.16 Probetas sometidas al ensayo de compresión.....	76
Figura 3.17 Preparación probetas	77
Figura 3.18 Inmersión probetas parafinadas en agua	77
Figura 3.19 Rotura de probetas longitudinalmente.....	78
Figura 3.20 Altura de penetración del agua ensayo absorción agua capilaridad.....	78
Figura 3.21 Saturación de probetas	79

Índice de Tablas, Figuras y Gráficos

Figura 3.22 Realización de pastillas circulares de 50 mm de diámetro .	80
Figura 3.23 Ensayo adhesión.....	80
Figura 3.24 Elaboración probetas cilíndricas de 16 mm de espesor	81
Figura 3.25 Disolución de Nitrato de Potasio (KNO_3).....	81
Figura 3.26 Sellado de probetas y pesado de las mismas	82
Figura 3.27 Microscopio electrónico de barrido.....	83
Figura 3.28 Preparación de muestras	83
Figura 3.29 Ubicación de las muestras dentro del microscopio	84
Figura 3.30 Equipo TAC.....	85
Figura 3.31 Probetas en cámara frigorífica	86
Figura 3.32 Horno a 105°C.....	87
Figura 3.33 Inmersión de probetas en agua destilada a 20°C	88
Figura 3.34 Detalle de separación de probetas sumergidas	88
Figura 3.35 Probetas en agua salina.....	89
Figura 3.36 Solución de sulfato de sodio decahidratado al 14%	90
Figura 3.37 Probetas sumergidas en solución salina	90
Figura 3.38 Período de enfriamiento de probetas	91
Figura 3.39 Cámara de ensayo	92
Figura 3.40 Probetas de mortero sometidas a ensayo Kesternich.....	92
Figura 4.1 Cemento empleado CEM I 42,5 R	95
Figura 4.2 Escoria Negra	101
Figura 4.3 Microscopía electrónica de barrido EAF (zona 1)	105
Figura 4.4 Microscopía electrónica de barrido EAF (zona 2)	105
Figura 4.5 Microscopía electrónica de barrido EAF (zona 3)	106
Figura 4.6 Microanálisis por energía dispersa de rayos X EAF.....	107
Figura 4.7 Escoria Blanca	109
Figura 4.8 Microscopía electrónica de barrido LF (zona 1)	112
Figura 4.9 Microscopía electrónica de barrido LF (zona 2)	112
Figura 4.10 Microscopía electrónica de barrido LF (zona 3)	113
Figura 4.11 Microanálisis por energía dispersa de rayos X (LF)	113
Figura 4.12 Aditivos empleados	116
Figura 5.1 Determinación cantidad de cemento, arena y escoria	122
Figura 5.2 Preparación árido mortero con escorias	122

Figura 5.3 Amasadora mecánica programable.....	122
Figura 5.4 Molde para elaboración probetas	123
Figura 5.5 Elaboración de probetas	123
Figura 5.6 Cámara húmeda.....	124
Figura 5.7 Probetas de mortero.....	124
Figura 5.8 Áridos empleados.....	126
Figura 6.1 Rotura adherencia mortero sin aditivos	173
Figura 6.2 Rotura adherencia mortero con C22	173
Figura 6.3 Rotura adherencia mortero con PM202	173
Figura 6.4 Rotura adherencia mortero con PM201	174
Figura 6.5 Altura penetración de agua morteros sin aditivos.....	183
Figura 6.6 Altura penetración de agua morteros C22.....	184
Figura 6.7 Altura penetración de agua morteros PM 202	184
Figura 6.8 Altura penetración de agua morteros 201	184
Figura 6.9 Microscopía electrónica de barrido MR (zona1).....	194
Figura 6.10 Microscopía electrónica de barrido MR (zona2).....	194
Figura 6.11 Microscopía electrónica de barrido MR (zona3).....	195
Figura 6.12 Microscopía electrónica de barrido MR (zona4).....	195
Figura 6.13 Microscopía electrónica de barrido MR (zona5).....	195
Figura 6.14 Microscopía electrónica de barrido MEB (zona1).....	196
Figura 6.15 Microscopía electrónica de barrido MEB (zona2).....	196
Figura 6.16 Microscopía electrónica de barrido MED (zona1).....	197
Figura 6.17 Microscopía electrónica de barrido MED (zona2).....	197
Figura 6.18 Microscopía electrónica de barrido MED (zona3).....	197
Figura 6.19 Microscopía electrónica de barrido MEB-C22 (zona1).....	198
Figura 6.20 Microscopía electrónica de barrido MEB-C22 (zona2).....	198
Figura 6.21 Microscopía electrónica de barrido MEB-C22 (zona3).....	198
Figura 6.22 Microscopía electrónica de barrido MEB-C22 (zona4).....	199
Figura 6.23 Microscopía electrónica de barrido MEB-C22 (zona5).....	199
Figura 6.24 Microscopía electrónica de barrido MEB-201 (zona1).....	200
Figura 6.25 Microscopía electrónica de barrido MEB-201 (zona2).....	200
Figura 6.26 Tomografías axiales de los morteros	202
Figura 6.27 Imágenes 3D mortero MR	203

Índice de Tablas, Figuras y Gráficos

Figura 6.28 Imágenes 3D mortero MEA.....	203
Figura 6.29 Imágenes 3D mortero MEB.....	204
Figura 6.30 Imágenes 3D mortero MEC.....	204
Figura 6.31 Imágenes 3D mortero MED.....	205
Figura 6.32 Imágenes 3D mortero MEB-C22	205
Figura 6.33 Imágenes 3D mortero MEB-201.....	206
Figura 6.34 Imágenes 3D mortero MEB-202.....	206
Figura 7.1 Antes y después ensayo heladicidad morteros sin aditivos	214
Figura 7.2 Mortero sin aditivos. Daños mínimos en probetas	214
Figura 7.3 Antes y después ensayo heladicidad morteros C22	215
Figura 7.4 Antes y después ensayo heladicidad morteros PM201.....	215
Figura 7.5 Antes y después ensayo heladicidad morteros PM 202.....	215
Figura 7.6 Antes y después ensayo choque térmico mortero sin aditivos	219
Figura 7.7 Antes y después ensayo choque térmico mortero C22.....	219
Figura 7.8 Antes y después ensayo choque térmico mortero PM201 .	219
Figura 7.9 Antes y después ensayo choque térmico mortero PM202 .	219
Figura 7.10 Mortero sin aditivos. Antes y después ensayo agua salina	224
Figura 7.11 Mortero C22. Antes y después ensayo agua salina	224
Figura 7.12 Mortero PM201. Antes y después ensayo agua salina	224
Figura 7.13 Mortero PM202. Antes y después ensayo agua salina	224
Figura 7.14 Depósito de sales en superficie	225
Figura 7.15 Mortero sin aditivos. Antes y después ensayo cristalización de sales.....	229
Figura 7.16 Mortero con C22. Antes y después ensayo cristalización de sales	229
Figura 7.17 Mortero con PM201. Antes y después ensayo cristalización de sales.....	230
Figura 7.18 Mortero con PM202. Antes y después ensayo cristalización de sales.....	230
Figura 7.19 Cambio de color del perímetro de la probeta por inclusión de sales	230
Figura 7.20 Antes y después ensayo Kesternich	233
Figura 7.21 Visualización cambios en probetas dentro de la cámara .	233

Figura 7.22 Detalle cambio color mortero y aparición manchas oxido	233
Figura 7.23 Aspecto interior morteros	234
Figura 8.1 Esquema del proceso de fabricación de un mortero seco..	241

