



UNIVERSIDAD DE BURGOS

TESIS DOCTORAL

ELABORACIÓN DE MORTEROS DE CAL
Y BASTARDOS PARA ALBAÑILERÍA
FABRICADOS CON ÁRIDOS
SIDERÚRGICOS

Juan García Cuadrado

Directores:

Dr. Ángel Rodríguez Sáiz

Dra. Verónica Calderón Carpintero

Burgos, 2017





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

TESIS DOCTORAL

ELABORACIÓN DE MORTEROS DE CAL Y
BASTARDOS PARA ALBAÑILERÍA FABRICADOS CON
ÁRIDOS SIDERÚRGICOS

Burgos, 2017

Autor:

Juan García Cuadrado

Directores:

Dr. Ángel Rodríguez Sáiz

Dra. Verónica Calderón Carpintero



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 “**ELABORACIÓN DE MORTEROS DE CAL Y BASTARDOS PARA ALBAÑILERÍA FABRICADOS CON ÁRIDOS SIDERÚRGICOS**” se ha realizado en el Departamento de Construcciones Arquitectónicas e Ingeniería de la Construcción y del Terreno de la Universidad de Burgos, bajo su dirección, por el Graduado en Arquitectura Técnica D. **Juan García Cuadrado** y autorizan su presentación para que sea calificada como TESIS DOCTORAL.

Burgos, 18 de diciembre de 2017

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

Gracias a todas las personas a mi alrededor,
en especial a mis padres, Juan Carlos y María
Cruz, que han sido cómplices en esta aventura
y sin los cuales no hubiese podido lograrla.

A Julián, Flora, Juan y Pilar.

Agradecimientos

Este trabajo no es fruto de un simple compromiso individual, sino que es el resultado de una suma de apoyos y esfuerzos. Concluir esta Tesis Doctoral sólo ha sido viable tras un largo periodo de trabajo, por lo que espero poder reflejar en estas líneas toda mi gratitud hacia aquellos que han ayudado a que sea posible, incluso a todas las personas que han demostrado su apoyo, aunque no sean conscientes de ello.

En primer lugar, he de agradecer la dirección y orientación realizadas por mis dos directores:

A Ángel Rodríguez Sáiz, por la confianza depositada en mí durante todos estos años, por el apoyo incondicional, consejos, dedicación y trabajo, no solo durante el doctorado, si no también durante toda la estancia desde que empecé a estudiar en la universidad. Por estar siempre ahí, gracias Ángel.

A Verónica Calderón Carpintero, por su inestimable ayuda en el desarrollo científico de este trabajo, por el tiempo dedicado, por su experiencia y conocimientos, sin los cuales no hubiera podido desarrollar esta Tesis.

A los miembros del Grupo de Investigación en Ingeniería de Edificación, en especial a Isabel Santamaría Vicario y Sara Gutiérrez González, por su colaboración y apoyo en la labor científica, aportando siempre otro punto de vista a la investigación, a Carlos Junco Petrement y Jesús Gadea Sáinz por el ánimo transmitido y la preocupación mostrada en todo momento por los avances en mi trabajo.

A José Luis Díez Campo y Pablo Campos de la Fuente del Laboratorio de Materiales de Construcción y Construcciones Arquitectónicas, donde tanto tiempo he pasado. Gracias por vuestra ayuda en la realización de los ensayos, por estar siempre para echar una mano y por supuesto, por vuestra paciencia conmigo. También a María Cristina Martínez Antón y Francisco Rodríguez González por los “buenos momentos” en el primer año, lo que sin duda ayudó a tomar la decisión de emprender este reto.

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, Calcasa, BASF Construction Chemicals España, S.L.

GRACIAS A TODOS

Resumen

Este trabajo de investigación quiere servir como referencia para concienciar a la sociedad sobre el uso racional de los recursos naturales y para buscar alternativas de uso a los subproductos generados en la industria, apostando por una economía circular que contribuya a evitar el deterioro ambiental.

Con el desarrollo de la industria y la tecnología en las últimas décadas, es evidente que la actividad humana está causando un impacto negativo en todo el Planeta, haciendo un uso desaforado de recursos naturales no renovables y provocando impactos ambientales que afectan directamente a los entornos naturales.

Para minimizar el impacto de los residuos resulta necesario disponer de procesos cíclicos, en los que los desechos de una actividad constituyen la materia prima de entrada de otra. En el Sector de la Construcción las técnicas y procedimientos utilizados son todavía en muchos casos artesanales, siendo la construcción una actividad en la que la economía circular todavía precisa de desarrollo.

En el presente trabajo se estudia cómo afecta a las propiedades de los morteros la adición de áridos siderúrgicos, escorias blancas y negras, en sustitución parcial o total del árido en morteros con cal, ya sea en combinación con cemento o utilizando tan solo la cal como conglomerante. Para ello, se han realizado los ensayos requeridos para caracterizar los morteros, utilizando tanto un proceso experimental como analítico, mediante el Diseño de Experimentos basado en Superficies de Respuesta (RSM).

Tras el exhaustivo estudio realizado a los morteros de cal y a los morteros bastardos, se seleccionan las dosificaciones que por sus características precisan ser mejoradas mediante la adición de aditivos. Posteriormente, siguiendo criterios de calidad en la prestación se seleccionan cuatro morteros definitivos, sometiendo estas mezclas a ensayos de envejecimiento acelerado con el fin de determinar su durabilidad y observar su comportamiento frente a los agentes atmosféricos agresivos externos.

La utilización de escoria de acería en sustitución de áridos silíceos permite obtener morteros de albañilería para construcción con propiedades equivalentes a las obtenidas con los morteros tradicionales.

Los morteros de albañilería obtenidos proporcionan una alternativa con mayor viabilidad medioambiental, ya que la cal es un conglomerante que precisa menor cantidad de energía para su fabricación en comparación al cemento, lo cual puede suponer también una ventaja competitiva frente a otros conglomerantes. Además, suponen una alternativa de valorización y puesta en valor de las escorias de acería como árido siderúrgico.

Tras finalizar la fase analítica y haber obtenido todos los datos de caracterización, se realiza un estudio económico de los morteros elaborados con áridos siderúrgicos, para buscar también una alternativa económicamente competitiva frente a los morteros tradicionales utilizados en construcción.

Palabras clave: Mortero de cal, mortero bastardo, escoria blanca, escoria negra, residuo siderúrgico, diseño de experimentos, Método de Superficie de Respuesta (MSR), Diseño Central Compuesto (DCC).

Abstract

This research work aims to serve as a reference to raise awareness of the rational use of natural resources and to seek alternative uses to the by-products generated in industry, betting on a circular economy that avoiding environmental deterioration.

With the increasing evolution of industry and technology in the last decades, it is obvious that human activity is causing a negative impact on the entire planet, making unbridled use of non-renewable natural resources and causing environmental impacts that directly affect natural environments.

To minimize the impact of waste, it is necessary to have cyclical processes, where waste from one activity constitutes the input raw material of another. In the Construction Sector the techniques and procedures used are still in many cases handcrafted, construction being an activity in which the circular economy still needs development.

This Thesis studies the effects in properties of the inclusion of steel aggregates, white and black slags, in lime mortar, totally or partially substitutes natural sand, either in combination with cement or only using lime as binder. For this, the tests required to characterize the mortars, using both an experimental and an analytical process, have been carried out through the design of experiments based on response surfaces (RSM).

After the exhaustive study of lime mortars and bastard mortars, dosages were selected which, because of their characteristics, needed to be improved by adding additives. Subsequently, following quality criteria in the performance, four final mortars are selected, subjecting these mixtures to tests of accelerated aging to observe their behaviour against external atmospheric agents.

The use of steel slag in substitution of silicic aggregates allows obtaining masonry mortars for construction with properties equivalent to those obtained with traditional mortars.

The obtained masonry mortars provide an alternative with greater environmental feasibility, since lime is a binder that requires less amount of energy necessary for its manufacture in comparison to cement, which can also imply a competitive advantage over other binders. In addition, they represent an alternative and putting in value of steelmaking slag as steel aggregate.

After finishing the analytical phase and obtaining all the characterization data, an economic study of the mortars made with aggregate steel will be carried out, to also look for an economically competitive alternative to the traditional mortars used in construction.

Keywords: Lime mortar, lime-cement mortar, electric arc furnace slag, ladle furnace slag, steel waste, design of experiments, Response Surface Methodology (RSM), Central Composite Design (CCD).

Producción científica ligada a la Tesis Doctoral

Artículos

Santamaría-Vicario, I., Rodríguez-Saiz, A., García-Cuadrado, J., Junco-Petrement, C., & Gutiérrez-González, S. (2017). **“The influence of porosity on the behaviour in humid environments of mortars made with steelmaking slags and additives”**. *DYNA*, 92(2), 220-225.

García-Cuadrado, J., Rodríguez, A., Cuesta, I. I., Calderón, V., & Gutiérrez-González, S. (2017). **“Study and analysis by means of surface response to fracture behaviour in lime-cement mortars fabricated with steelmaking slags”**. *Construction and Building Materials*, 138, 204-213.

García-Cuadrado, J., Gutiérrez-González, S., Santamaría-Vicario, I., Rodríguez, A., & Calderón, V. (En revisión). **“Characterization of lime-cement mortars manufactured with steel-making waste aggregate and the study of their properties by means of response surface methodology”**. *Construction and Building Materials*.

Patentes

García-Cuadrado, J., Zarzosa, R., Rodríguez, Á., Gutiérrez-González, S., Calderón, V. & Arroyo, R. (2015). **“Procedimiento de obtención de mortero de cal para construcción y rehabilitación fabricado con residuos siderúrgicos”**. P201400382.

Congresos

García-Cuadrado, J., Rodríguez, A. & Calderón, V. (2014). **“Morteros de cal para albañilería fabricados con escoria negra de acería”**. XXX Encuentro de Jóvenes Investigadores. Salamanca, España.

García-Cuadrado, J., Rodríguez, A., Calderón, V. & Gutiérrez-González, S. (2014). **“Morteros de cal fabricados con escorias blancas y negras para su uso en construcción”**. I Jornadas de Doctorandos de la Universidad de Burgos. Burgos, España.

García-Cuadrado, J., Cuesta I.I., Rodríguez, A., & Calderón, V. (2015). **“Aplicación de superficies de respuesta para la estimación de las propiedades a fractura de morteros bastardos fabricados con escoria negra para usos en construcción”**. XXXII Congreso Español de Fractura e Integridad Estructural. Edición Internacional. Zamora, España.

García-Cuadrado, J., Rodríguez, A. & Calderón, V. (2015). **“Aplicación de superficies de respuesta para la estimación de las propiedades a fractura de morteros bastardos fabricados con escoria blanca para usos en construcción”**. II Jornadas de Doctorandos de la Universidad de Burgos. Burgos, España.

Santamaría-Vicario, I., Rodríguez, A., Calderón, V. & García Cuadrado, J. (2015). **“Dry industrial mortars dosed with slags”**. III International congress on construction and building research (COINVEDI). Madrid, España.

Santamaría-Vicario, I., Rodríguez, A., García-Cuadrado, J. & Alonso-Díez, A. (2016). **“Influencia de la porosidad en el comportamiento de morteros fabricados con escorias de acería en ambientes húmedos”**. Congreso Internacional de Innovación Tecnológica en Edificación. (CITE2016). Madrid, España.

Santamaría-Vicario, I., Calderón, V., Rodríguez, A., Gadea, J. Arroyo, R. & García-Cuadrado, J. (2016). **“Mortars dosed with slag aggregates for application in edification and restoration”**. Congreso Euroamericano REHABEND 2016. Patología de la Construcción, Tecnología de la Rehabilitación y Gestión del Patrimonio. Burgos, España.

García-Cuadrado, J., Calderón, V. & Rodríguez, A. (2017). **“Comportamiento de las escorias de acería en morteros de cal”**. III Jornadas de Doctorados de la Universidad de Burgos. Burgos, España.

García-Cuadrado, J., Calderón, V., Rodríguez, A. & Gutiérrez-González, S. (2017). **“Caracterización de morteros bastardos para rehabilitación fabricados con residuos de escoria y estudio de su comportamiento a fractura mediante superficies de respuesta”**. Congreso Internacional de Innovación Tecnológica en Edificación. (CITE2017). Madrid, España.

Rodríguez, A., Santamaría-Vicario, I., Calderón, V. & García-Cuadrado, J. (2017) **“Study of the expansivity of cement mortars of high performance manufactured with steelmaking slag”**. (COINVEDI). La Laguna, España.

Concursos

Participación en “II Concurso de Ideas y Proyectos de Innovación para Jóvenes. INNOVACIENCIA”, con **“Caracterización de morteros de cal con residuos siderúrgicos”**. (2014). Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) y Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología (FECYT).

Participación en “Convocatoria Prototipos Orientados al Mercado. Plan TCUE”, con **“Mortero con residuos siderúrgicos aligerado con otros subproductos industriales para la obtención de materiales prefabricados”**. (2015). Vicerrectorado de Investigación de la Universidad de Burgos. Fundación Universidad de Burgos.

Finalista en “Programa YUZZ. Jóvenes con ideas”, con **“ConcreECO. Empresa de morteros sostenibles”** (2015). Fundación Banesto y CEEi Burgos.

Finalista en “Three Minutes Thesis (3MT)”, con **“Elaboración de morteros de cal y bastardos para albañilería con áridos siderúrgicos”**. (2017) Campus de Excelencia Internacional (CEI)-Triangular E³.

Índice

1. Introducción y justificación	3
1.1. Introducción.....	3
1.2. Justificación del tema elegido	5
1.3. Estructura de la tesis.....	7
2. Estado del arte. Antecedentes y objetivos	13
2.1. Producción de acero y generación de escoria siderúrgica.....	14
2.1.1. Producción de acero.....	14
2.1.2. Generación de escorias de acería	18
2.1.3. Valorización de los residuos de acería	21
2.1.4. Escorias siderúrgicas: escoria negra EAF y escoria blanca LF.....	23
2.2. Introducción a los morteros.....	29
2.2.1. Reseña histórica	29
2.2.2. Tipos de morteros.....	32
2.2.3. Morteros con residuos	33
2.2.4. Morteros con residuos siderúrgicos	37
2.3. Morteros de cal	38
2.3.1. Reseña histórica de los morteros de cal	39
2.3.2. La cal	40
2.3.3. Morteros de cal con residuos	43
2.3.4. Morteros de cal con residuos siderúrgicos.....	46
2.4. Antecedentes y objetivos	46
2.4.1. Antecedentes.....	46
2.4.2. Objetivos.....	49
3. Metodología	53
3.1. Definición del diseño de experimentos	53
3.2. Ensayos para las materias primas.....	59
3.2.1. Granulometría de los áridos	59
3.2.2. Módulo de finura de los áridos	61
3.3. Ensayos para el mortero en estado fresco	61

3.3.1.	Consistencia	61
3.3.2.	Densidad aparente	63
3.3.3.	Contenido de aire ocluido.....	64
3.3.4.	Trabajabilidad	65
3.3.5.	Retención de agua	66
3.4.	Ensayos para el mortero en estado endurecido.....	67
3.4.1.	Densidad aparente en seco	67
3.4.2.	Absorción de agua a presión atmosférica.....	68
3.4.3.	Absorción de agua por capilaridad.....	70
3.4.4.	Permeabilidad al vapor de agua.....	72
3.4.5.	Conductividad térmica	74
3.4.6.	Absorción acústica.....	76
3.4.7.	Reacción al fuego.....	77
3.5.	Ensayos del comportamiento mecánico de los morteros.....	78
3.5.1.	Dureza superficial	78
3.5.2.	Energía de fractura.....	79
3.5.3.	Resistencia a flexión y compresión	82
3.5.4.	Adherencia.....	85
3.5.5.	Resistencia inicial a cortante en fábricas de albañilería ..	88
3.6.	Ensayos de envejecimiento acelerado	91
3.6.1.	Heladicidad	92
3.6.2.	Choque térmico	93
3.6.3.	Carbonatación acelerada	94
3.6.4.	Agua salina	96
3.6.5.	Atmósferas industriales. Ensayo Kesternich.....	96
3.6.6.	Cristalización de sales.....	97
3.7.	Técnicas industriales.....	99
3.7.1.	Difracción de rayos X (DRX)	99
3.7.2.	Fluorescencia de rayos X (FRX)	99
3.7.3.	Microscopía electrónica de barrido (MEB) y microanálisis por energía dispersa de rayos X	100
3.7.4.	Porosimetría de intrusión de mercurio (MIP)	101
3.7.5.	Tomografía axial computarizada (TAC)	101

4. Caracterización de las materias primas.....	105
4.1. Conglomerantes.....	105
4.1.1. Cemento	106
4.1.2. Cal aérea	108
4.1.3. Cal hidráulica natural.....	110
4.2. Aridos	112
4.2.1. Arena silícica	113
4.2.2. Escoria blanca de Horno de Cuchara LF	115
4.2.3. Escoria negra de Horno Eléctrico de Arco EAF	120
4.3. Aditivos.....	126
4.3.1. MasterSeal 600.....	127
4.3.2. MasterRheobuild 2100	127
4.4. Agua.....	127
5. Fase experimental previa.....	131
5.1. Introducción.....	131
5.2. Aplicación del diseño de experimentos	133
5.3. Selección de las dosificaciones	136
5.4. Procedimiento operatorio	138
5.4.1. Preparación de los materiales.....	138
5.4.2. Amasado del mortero	139
5.4.3. Preparación de las muestras.....	140
5.5. Estudio de la tenacidad a la fractura	143
5.5.1. Realización del ensayo a tracción indirecta	146
5.5.2. Obtención de resultados mediante superficies de respuesta	149
5.5.3. Análisis de los resultados	155
5.6. Estudio de la resistencia a compresión	158
5.6.1. Realización del ensayo de resistencia a compresión	158
5.6.2. Obtención de resultados mediante superficies de respuesta	160
5.6.3. Análisis de los resultados	164
5.7. Conclusiones.....	167

6. Caracterización de los morteros con áridos siderúrgicos	171
6.1. Estado fresco	174
6.1.1. Consistencia y relación agua/conglomerante	175
6.1.2. Densidad aparente	178
6.1.3. Cantidad de aire ocluido.....	181
6.1.4. Tiempo de utilización o trabajabilidad	186
6.1.5. Capacidad de retención de agua	189
6.2. Estado endurecido	192
6.2.1. Densidad aparente en seco	192
6.2.2. Absorción de agua a presión atmosférica.....	195
6.2.3. Absorción de agua por capilaridad.....	198
6.2.4. Permeabilidad al vapor de agua.....	201
6.3. Comportamiento mecánico de los morteros	204
6.3.1. Dureza superficial	205
6.3.2. Resistencia a flexión.....	211
6.3.3. Resistencia a compresión	217
6.3.4. Adherencia.....	225
6.4. Conclusiones.....	229
7. Modificación de morteros mediante la inclusión de aditivos..	235
7.1. Selección y modificación de dosificaciones.....	235
7.2. Caracterización de los morteros con aditivos	239
7.2.1. Estado fresco.....	240
7.2.2. Estado endurecido.....	242
7.2.3. Comportamiento mecánico.....	244
7.2.4. Estudio de la porosidad	246
7.2.5. Microscopía electrónica de barrido (M.E.B.) y microanálisis por energía dispersa de rayos X	250
7.2.6. Otros ensayos.....	255
7.3. Durabilidad	260
7.3.1. Heladicidad	261
7.3.2. Choque térmico	266
7.3.3. Carbonatación acelerada	271

7.3.4. Agua salina	280
7.3.5. Atmósferas industriales. Ensayo Kesternich.....	284
7.3.6. Cristalización de sales.....	289
7.4. Conclusiones.....	294
8. Puesta en obra.....	299
8.1. Revestimiento en paramento vertical	299
8.2. Fábrica de albañilería.....	302
8.3. Conclusiones.....	306
9. Estudio económico	309
9.1. Estudio económico.....	309
9.1.1. Coste de transformación	309
9.1.2. Coste del material.....	313
9.1.3. Coste de transporte	315
9.2. Valoración cualitativa	317
9.3. Conclusiones.....	318
10. Conclusiones finales y estudios futuros	323
10.1. Conclusiones finales	323
10.2. Estudios futuros	327
Bibliografía	331
Anexo: Índice de tablas, gráficos y figuras.....	353



CAPITULO I

Introducción y justificación

1. INTRODUCCIÓN Y JUSTIFICACIÓN

1.1. INTRODUCCIÓN

Un mortero es un agregado compuesto por diferentes materiales que es utilizado para determinados usos en la construcción. Normalmente se compone de uno o varios conglomerantes, áridos y agua, pudiendo llevar también adiciones y aditivos.

Los morteros se utilizan en albañilería como elemento de unión de piezas individuales, tales como ladrillos, bloques de diversos materiales, tejas... así como para recubrir superficies verticales, cerramientos interiores y exteriores, hojas de cámaras de aire, etc.



Gráfico 1.1 Consumo de áridos (millones de toneladas) para la construcción 1980 – 2017 (previsión). (ANEFA).

De acuerdo con la información facilitada por la Asociación Nacional de Empresarios Fabricantes de Áridos (ANEFA), el consumo total de áridos naturales para la construcción en el año 2016 (Gráfico 1.1) fue de 96,6 millones de toneladas, o lo que es lo mismo, una repercusión por habitante durante este tiempo 5,3 kilogramos diarios¹. Esta gran cantidad de áridos son utilizados en su mayoría en construcción: fabricación de hormigones, morteros, aglomerados asfálticos, construcción de carreteras, balasto para ferrocarriles...

Por todo ello y a pesar de la caída acumulada del consumo de áridos de más del 84,0% desde el año 2007, debido fundamentalmente a la crisis del sector de la construcción, siguen siendo la segunda materia prima más consumida por el hombre después del agua.

¹ ANEFA (2017). "Datos básicos del sector." *Revista anual Anefa 2016 -2017*(Asociación Nacional de Empresarios Fabricantes de Áridos).



Gráfico 1.2 Consumo de áridos por habitante y año (toneladas) en Europa. (ANEFA).

Actualmente, España es el noveno país de Europa en producción total de áridos, ocupando el antepenúltimo puesto por habitante y año, únicamente por delante de Macedonia y Grecia (Gráfico 1.2).

Por otra parte, las escorias siderúrgicas son un subproducto obtenido en el proceso industrial de producción de acero, hierro u otras aleaciones. Tienen un carácter residual en el proceso, no siendo intencionada su obtención, así como tampoco la de muchos otros productos residuales que se obtienen finalmente. Sin embargo, su generación, a todos los niveles (tanto nacional, como a nivel europeo o mundial...) es muy elevada, adquiriendo gran importancia.

Hasta hace unos años, las escorias no tenían un uso definido y se acumulaban en acopios y vertederos, dando lugar a importantes problemas de carácter logístico (ocupación de grandes superficies) y medioambiental (impacto visual y contaminación de suelos).

Las escorias se pueden valorizar como árido siderúrgico e introducirlas de nuevo en la cadena de producción, tal y como acreditan las investigaciones realizadas, dejando así de ser consideradas como un residuo problemático contaminante que es preciso eliminar.

De este modo resulta evidente pensar que, entre ambas industrias, la metalúrgica y la de la construcción, existen una serie de afinidades con necesidades recíprocas. Por ello, si se investiga y se desarrolla en ambos campos conjuntamente, se podría evitar tanto la acumulación de la escoria siderúrgica en acopios y vertederos, como la extracción y consumo de recursos naturales.

Por esta razón, 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 útiles a un coste razonable, tanto desde el punto de vista técnico como económico.

En el presente trabajo se pretende estudiar cómo afecta en la **elaboración de morteros de cal y bastardos para albañilería** la incorporación de **áridos siderúrgicos**, en concreto *escorias negras de Horno Eléctrico de Arco (EAF-Electric Arc Furnace Slags)* y *escorias blancas de Horno Cuchara (LF-Ladle Furnace Slags)*.

1.2. JUSTIFICACIÓN DEL TEMA ELEGIDO

A finales de la década de los 80 del siglo XX surge el concepto de sostenibilidad a partir del informe Brundtland². Esta definición inicial ha evolucionado dependiendo de los diversos puntos de vista de los agentes institucionales, sociales y económicos implicados.

Actualmente, el respeto por el medio ambiente es un valor social que cada vez se protege más, al ser sinónimo de “*calidad de vida*”. Es evidente que la actividad humana está causando un impacto negativo importante en todo el planeta, ya que el progreso y riqueza alcanzada en los países industrializados genera, además de consecuencias positivas, efectos no deseados, especialmente desde el punto de vista medioambiental.

En el Sector de la Construcción, el concepto de sostenibilidad se puede orientar desde varios puntos de vista, como el impacto que las construcciones generan en la superficie e interior de la Tierra o de la utilización de materiales sostenibles a partir de subproductos industriales, siempre salvaguardando la viabilidad técnica de las soluciones en el conjunto del ciclo de vida de las construcciones. Ambos aspectos presentan condicionantes medioambientales, normativos, sociales y económicos.

Además, tal y como afirman algunos autores³, se requiere de un enfoque que aglutine dichos ámbitos, objetivando aspectos, impacto ambiental y recursos alternativos viables, con rigor y transparencia. El “*valor de lo sostenible*” ya viene reflejado en la propia EHE (Anejo 13)⁴.

La gestión de residuos se está convirtiendo día a día en un problema estructural para la humanidad, y se prevé que con los años adquiera mayor importancia, debido principalmente al aumento incesante de la población

² Brundtland, G., M. Khalid, S. Agnelli, S. Al-Athel, B. Chidzero, L. Fadika, V. Hauff, I. Lang, M. Shijun and M. M. de Botero (1987). "Our common future."

³ San-José Lombera, J. T. and J. Cuadrado Rojo (2010). "Industrial building design stage based on a system approach to their environmental sustainability." Construction and Building Materials **24**(4): 438-447.

⁴ Ministerio-Fomento (2008). "Anejo 13." Índice de contribución de la estructura a la sostenibilidad.

mundial y por ser uno de los síntomas más evidentes de la insostenibilidad de los estilos de vida occidentales como el nuestro⁵.

Por todo ello, resulta necesario incorporar a los sistemas de producción el concepto de “economía circular”, es decir, procesos cíclicos en los que los desechos de una actividad industrial puedan utilizarse como materia prima para otra (Figura 1.1). De este modo, se conseguiría reducir el volumen de residuos, evitando que sólo sea la Naturaleza la responsable de transformar los residuos de la actividad humana, haciendo responsable al propio ser humano como consumidor, de la gestión de los residuos que genera.

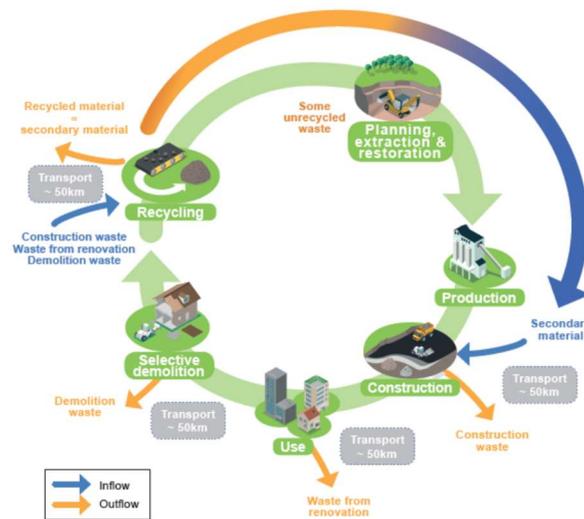


Figura 1.1 Ciclo de vida de los productos. (ANEFA).

Se reafirma la voluntad de las instituciones europeas y los estados miembros de potenciar el reciclado y la valoración de residuos, con actos como el del Comisario de Medio Ambiente de la Comisión Europea, Janez Potočnik, comprometido en la elaboración de un conjunto de medidas para impulsar la “economía circular” como una *“respuesta estratégica a la nueva realidad de la globalización y crecientes presiones sobre los recursos naturales que son escasos y limitados”*. Aunque reconoce que *“incluso una economía circular optimizada exigiría algunos insumos de materia prima virgen y producir pequeñas cantidades de residuos”*, aboga por un cambio radical de los patrones de producción y consumo⁶.

⁵ Villoria-Saez, P., V. W. Tam, M. del Río Merino, C. V. Arrebola and X. Wang (2016). "Effectiveness of greenhouse-gas Emission Trading Schemes implementation: a review on legislations." *Journal of Cleaner Production* **127**: 49-58.

⁶ ANEFA (2015). "Presentación." *Revista anual Anefa 2014-2015*(Asociación Nacional de Empresarios Fabricantes de Áridos).

Esta iniciativa establece un enfoque global hacia la economía circular, mantiene el valor añadido de los productos el mayor tiempo posible y excluye los residuos.

Para la reducción de los residuos generados en la actividad humana, la primera referencia a tener en cuenta es la adecuada gestión de los recursos, tratando de prolongar el ciclo de vida de los mismos. Si se trata de materias primas de origen natural hay que asegurar la continuidad de su renovación, y si son de origen industrial deben ser convenientemente reciclados. Por otro lado, hay que reducir el consumo de materiales no renovables, gestionando su uso de forma eficaz y responsable.

En la temática que se trata en esta Tesis Doctoral, al utilizar las escorias blancas y negras como producto sustitutivo de los áridos naturales, se evitaría su acopio en vertederos de difícil gestión. Esto invita a plantear el desarrollo de un modelo de consumo de áridos más sostenible, en el que a la vez que se minimicen las actividades extractivas, tan degradantes para el entorno, se dé salida a aquellos subproductos que mediante la experiencia y el desarrollo de una acción científica coherente han acreditado ser válidos para determinadas aplicaciones, en concreto el árido siderúrgico.

La premisa en la que basarse debe ser la búsqueda de soluciones que cumplan con las exigencias de proteger el medio ambiente y que además no comporten un coste elevado. De esta forma, el impacto del desarrollo social se vería notablemente minimizado e incluso, anulado totalmente. Se ahorrarían importantes cantidades de energía, lo que daría lugar a un ahorro económico y una mejora del entorno natural.

Por otro lado, la cal como conglomerante es uno de los materiales más sostenibles. La cantidad de energía necesaria para su fabricación es inferior a la del cemento, lo cual puede suponer una ventaja competitiva. También, resulta interesante contemplar la idea de que, en el caso de la cal aérea, parte del CO₂ liberado en el proceso de obtención de dicho material se fija de nuevo durante la carbonatación del hidróxido cálcico una vez puesto en obra, lo que puede considerarse como un comportamiento similar al de las emisiones de la madera o la biomasa, por ejemplo.

Con todo lo referido anteriormente, y si los resultados permiten albergar cierta esperanza, esta solución ayudaría a encontrar un sustituto a los actuales morteros de albañilería empleados en construcción.

1.3. ESTRUCTURA DE LA TESIS

La estructura de la Tesis Doctoral está basada en diferentes análisis y estudios llevados a cabo durante el proceso de investigación. El documento se articula en torno a diez capítulos de desarrollo, tal y como se muestra a continuación:

Capítulo I: Introducción y justificación.

En el primer capítulo se resume el problema que justifica la investigación elaborada, se define su estructura y se motivan las razones por la que se ha elegido esta temática.

Capítulo II: Estado del arte. Antecedentes y objetivos.

En este capítulo se hace una retrospectiva de la cal como material de construcción y se estudia el estado del conocimiento, referenciando las investigaciones previas relativas a la caracterización y la aplicación de los áridos siderúrgicos.

Además, y debido a la orientación de la Tesis, se realiza una breve reseña histórica de los morteros de albañilería y se analiza el concepto de mortero.

Por último, se establecen los objetivos que se quieren conseguir con las investigaciones realizadas.

Capítulo III: Metodología.

En el tercer apartado de la Tesis Doctoral se describen los ensayos, tanto físicos como químicos, para conocer las propiedades de las materias primas y las mezclas de mortero elaboradas.

Se define el Plan de Experimentación aplicado, utilizando la Metodología de Estudio RSM (Métodos de Superficie de Respuesta).

Capítulo IV: Caracterización de las materias primas.

En el cuarto capítulo se estudian las características físicas, químicas y mineralógicas de los diferentes materiales que se utilizan en los capítulos experimentales.

Capítulo V: Fase experimentación previa.

Se estudia y describe todo el proceso experimental previo llevado a cabo para una primera caracterización de los morteros bastardos fabricados con áridos siderúrgicos. Para ello se utiliza el Método de Superficies de Respuesta.

De igual modo, se referencian las primeras conclusiones que permiten continuar con el estudio.

Capítulo VI: Caracterización de los morteros con árido siderúrgico.

Una vez finalizado el estudio previo, y elegidas las mezclas que se ajustan a los objetivos marcados, se desarrolla el proceso completo de caracterización de los morteros, tanto en estado fresco como en estado endurecido.

Como segundo campo de estudio, en este capítulo se desarrolla la caracterización, tanto en estado fresco como en estado endurecido, de morteros de cal aérea y cal hidráulica, dosificados con mayores cantidades de cal, buscando conseguir mejores resultados.

Capítulo VII: Modificación de morteros mediante la inclusión de aditivos.

Tras la caracterización de todas las mezclas, se realiza una selección de dosificaciones con el fin de intentar mejorar sus propiedades y características mediante la incorporación de aditivos.

Tras un breve estudio, se procede de nuevo a la caracterización completa de las dosificaciones con mejores resultados, incluyendo el estudio de su durabilidad frente a los agentes agresivos externos.

Capítulo VIII: Puesta en obra.

Para concluir con la parte experimental, se realiza la puesta en obra de los cuatro morteros seleccionados, con su aplicación en revestimientos sobre paramentos verticales y fábricas de ladrillo.

Capítulo IX: Estudio económico.

Se realiza un estudio económico de los morteros elaborados con áridos siderúrgicos, planteando para ello varias opciones de distancias al centro de producción de escorias.

Capítulo X: Conclusiones finales y estudios futuros.

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

Y, por último, se proponen líneas de trabajo para continuar con la investigación desarrollada y estudios que no han podido abordarse en el transcurso de esta Tesis Doctoral.

Bibliografía.

Las referencias bibliográficas aparecen recopiladas mediante un listado ordenado de todos los autores referenciados por orden alfabético. Además, estas referencias se recogen a pie de página, en todo el documento de la Tesis Doctoral, según se citan en el texto.

CAPITULO II

Estado del arte

Antecedentes y objetivos



2. ESTADO DEL ARTE. ANTECEDENTES Y OBJETIVOS

La gestión de residuos es un tema de importancia creciente y se prevé que con los años adquiera mayor atención, por ser uno de los síntomas más evidentes de la insostenibilidad de los estilos de vida occidentales como el nuestro.

En este segundo capítulo se presenta el estudio sobre la viabilidad del uso de los residuos siderúrgicos en morteros para albañilería.

La investigación realizada hasta el momento es importante, y con los años va adquiriendo mayor relevancia. Sin embargo, son escasas las referencias en el caso concreto de morteros de cal, por lo que la investigación desarrollada es novedosa al no existir precedentes. Para ello, se han seguido las siguientes actuaciones:

- En primer lugar, se ha realizado una aproximación al problema medioambiental que presenta la generación de la escoria en los procesos de fabricación del acero. Debido a la numerosa bibliografía que se puede encontrar sobre esta temática, no se entra en detalles sobre su composición, características y tipos de la misma.
- A continuación, en la segunda parte, se hace una introducción analizando la importancia que tienen los morteros de albañilería como material de construcción, realizando tan solo un esquema somero de los tipos de morteros existentes, de acuerdo con la normativa. No obstante, sí se realiza una revisión bibliográfica sobre los morteros fabricados con residuos, tanto siderúrgicos como de otra naturaleza y origen.
- Debido a la temática de esta Tesis Doctoral, en la tercera parte se hace un estudio pormenorizado de los morteros cal, y más concretamente de los morteros de cal fabricados con escorias de acería, campo de investigación poco desarrollado hasta el momento.
- Por último, y para marcar las bases que fundamentan esta Tesis Doctoral, se recoge un resumen de los antecedentes a este documento y se plantean los objetivos que se pretenden alcanzar en esta investigación.

2.1. PRODUCCIÓN DE ACERO Y GENERACIÓN DE ESCORIA SIDERÚRGICA

2.1.1. Producción de acero

Las aleaciones de acero, incluyendo el acero inoxidable, se realizan generalmente en nuestro país a través del Horno de Arco Eléctrico. Tras el proceso de reconversión industrial de la siderurgia en España, se abandonó la vía del proceso integral y se apostó de forma decidida por la obtención de acero a través de los hornos eléctricos.

La chatarra es la materia prima principal de este proceso. La fabricación del acero en Horno de Arco Eléctrico se basa en la fusión de esta chatarra por medio de una corriente eléctrica, y al afino posterior.

El proceso de fabricación del acero en las acerías de Horno de Arco Eléctrico se compone de dos etapas⁷:

Metalurgia primaria o de fusión, donde se produce la fusión de las materias primas que se realiza en Hornos de Arco Eléctrico.

El horno eléctrico consiste en un cilindro grueso forrado de un material refractario para soportar altas temperaturas. La solera del horno alberga el acero líquido y la escoria. Una bóveda deslizante permite la entrada de la chatarra mediante unas cestas diseñadas para ello.

Esta bóveda está dotada con unos orificios por donde se introducen tres electrodos conectados a un transformador, que proporciona unas condiciones de voltaje e intensidad apropiadas para hacer saltar el arco, con intensidad variable, en función de la fase de operación del horno.

Mediante estos electrodos, se hace saltar el arco hasta fundir la chatarra cargada. El proceso se repite hasta completar la capacidad del horno, constituyendo este acero lo que se conoce como “*colada*”.

Metalurgia secundaria o afino del baño fundido, se lleva a cabo en dos etapas.

El primer afino se realiza en el Horno Eléctrico, en él se analiza la composición del baño fundido y se procede a la eliminación de impurezas y elementos indeseables. Además, se realiza un primer ajuste de la composición química por medio de la adición de ferroaleaciones que contienen los elementos necesarios.

El acero obtenido en la primera fase es trasladado al Horno Cuchara, donde se produce el ajuste de la composición y se le da la temperatura adecuada para la siguiente fase en el proceso de fabricación.

⁷ IHOBE, S. (1999). Libro Blanco de minimización de residuos y emisiones de escorias de acería, Sociedad Pública de Gestión Ambiental, Departamento de Ordenación del Territorio, Vivienda y Medio Ambiente del Gobierno Vasco.

Paralelamente, se realiza la desulfuración del líquido fundido, que se produce por simple contacto con la cal existente en la escoria blanca LF.

En la Figura 2.1 se muestra el proceso de fabricación del hierro y el acero, así como las etapas de metalurgia primaria y secundaria. En ambos procesos, se hace referencia al tipo de escorias que se generan, en función de la fase y tipo de horno en que se encuentren los materiales.

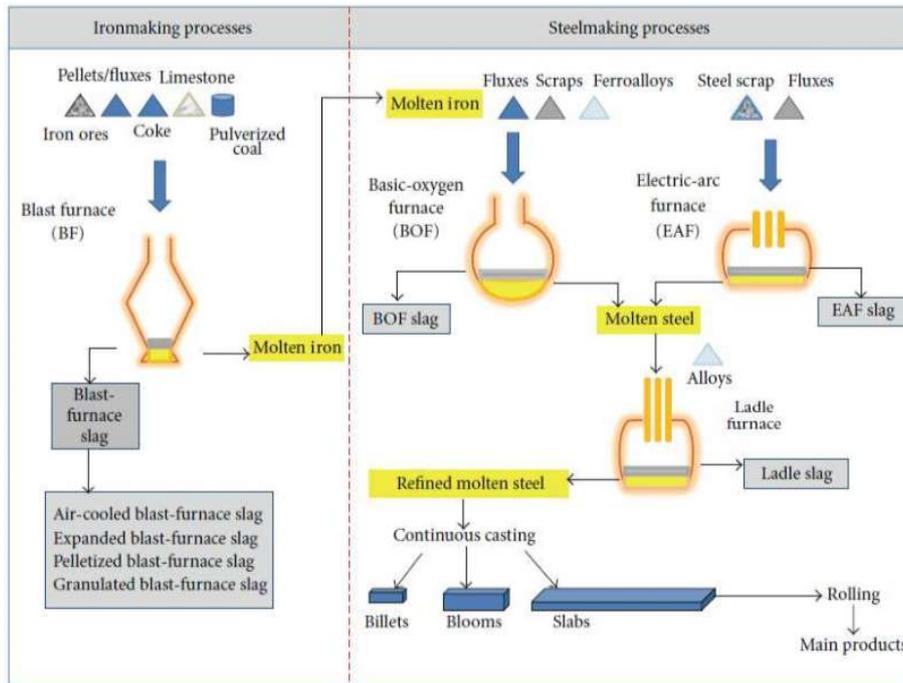


Figura 2.1 Proceso de producción del acero. (H. Schoenber)⁸.

A finales del s. XX y durante la primera década del s. XXI, se ha producido un crecimiento importante en el número de instalaciones siderúrgicas, y consiguientemente y de forma paralela, un incremento de la fabricación de fundición y acero.

La producción mundial, que en 1900 era de 28 millones de toneladas, ascendía en 2005 a 1.149 millones de toneladas. Se estima que la producción mundial de acero bruto en el año 2015 fue 1.620,9 Mtn⁹.

El incremento (aunque con un breve descenso este último año) es debido principalmente a los países que, a pesar de la crisis económica mundial, están en continuo crecimiento, empleando el acero para la

⁸ Schoenberger, H. (2001). Final draft: best available techniques reference document on the production of iron and steel, European IPPC Bureau.

⁹ World-Steel-Association (2016). World Steel in Figures 2016. ISBN 978-2-930069-87-6

construcción de infraestructuras, tanto industriales como de obra civil. El Gráfico 2.1 muestra la producción mundial de los últimos años:



Gráfico 2.1 Evolución de la producción mundial de acero bruto (1950-2015). (World Steel Association).

Este incremento no ha sido proporcional en todos los países (Gráfico 2.2), aumentando considerablemente las toneladas en países como China, con una producción total en 2015 de 803,8 millones de toneladas, lo que supone el 49,6% del acero mundial producido.

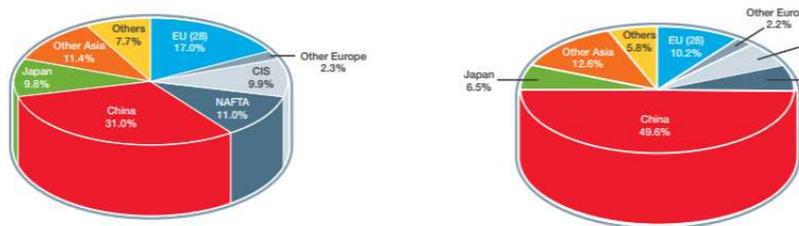


Gráfico 2.2 Comparativo de la producción mundial de acero año 2005 (izquierda) y 2015 (derecha). (World Steel Association).

Después de China, el ranking de países que más toneladas de acero producen también son asiáticos: Japón e India, con 105,2 Mtn (6,4%) y 89,4 Mtn (5,52%) respectivamente. Los puestos cuarto y quinto lo ocupan dos grandes potencias mundiales, los Estados Unidos de América, con un total de 78,8 Mtn (4,86%) y Rusia con 70,9 Mtn (4,37%).

Alemania es el primer país europeo que aparece en la lista de mayores productores, situándose en el puesto número 7 con un total de 42,7 Mtn

(2,63%), mientras que España, con 14,8 Mtn (0,91%), se sitúa en el puesto número 16.

En España, el contexto es bastante heterogéneo debido a localización desigual de las plantas de acería con Hornos Eléctricos de Arco.

Según información facilitada por la empresa Arcelormittal Asturias, S.A. para el Cedex,¹⁰ los dos únicos Altos Hornos se encuentran en la Comunidad Autónoma de Asturias, con plantas en Avilés y Gijón. Para la producción de acero en Horno Eléctrico de Arco hay instaladas y en funcionamiento 24 plantas de acería en España (Figura 2.2), de las cuales 14 de ellas están situadas en la Comunidad Autónoma del País Vasco¹¹.



Figura 2.2 Distribución de acerías de horno eléctrico en España (izquierda) y ampliación País Vasco (derecha). (I. Santamaría).

Estas 24 plantas españolas produjeron en el 2007 un total de 14,2 Mtn de acero, de las que 13,1 Mtn fueron de acero común o especial y 1,1 Mtn de acero inoxidable. La distribución de la producción por Comunidades Autónomas se muestra en la Tabla 2.1:

Producción de acero por Comunidades Autónomas	
País Vasco	48,0%
Cataluña	15,4%
Andalucía	11,3%
Cantabria	7,6%
Madrid	6,7%
Galicia	5,0%
Extremadura	4,0%
Aragón	1,5%

Tabla 2.1 Porcentaje de producción de acero por Comunidades Autónomas (2007). (UNISED).

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.

¹¹ UNESID Unión de Empresas siderúrgicas. [http://www.unesid.org].

2.1.2. Generación de escorias de acería

Durante el proceso de fabricación de hierro y de acero se generan una serie de productos, por la reacción de los reactivos utilizados con la materia prima. Estos subproductos no tienen un uso definido, por lo que pueden considerarse residuos del proceso de fabricación del acero y pueden agruparse en cinco grandes grupos: escorias siderúrgicas, polvo de acería, productos refractarios, arenas de fundición y cascarilla de laminado. De todos ellos, las escorias y los polvos de acería son los más voluminosos.

La escoria de acería se puede definir como: *“producto obtenido del enfriamiento y solidificación del material que sobrenada y flota sobre los caldos líquidos de las aleaciones férreas en cualquier estado intermedio o final de la fabricación”*¹².

Debido a la producción masiva del acero en el último siglo se ha creado una descompensación en el proceso, al no poder asimilar toda la producción de escoria en otras actividades industriales, por lo que el exceso producido constituye un problema medioambiental importante¹³.

En función de las técnicas y procesos de fabricación empleados existen diferentes tipos de escorias siderúrgicas, que se pueden clasificar en varios grupos:

- 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 AOD

Producción de escoria en Europa		
BF- granulada	19,270 Mtn	42,69%
BF- vitrificada	4,230 Mtn	9,37%
BOF o LD	10,464 Mtn	23,18%
EAF	6,665 Mtn	14,76%
LF	2,795 Mtn	6,19%
AOD	1,720 Mtn	3,81%

Tabla 2.2 Producción de escoria en Europa (2010). (EUROSLAG).

¹² Manso, J. M. (2001). "Fabricación de hormigón hidráulico con escoria negra de Horno Eléctrico de Arco", Tesis doctoral, Universidad de Burgos, España.

¹³ Motz, H. and J. Geiseler (2001). "Products of steel slags an opportunity to save natural resources." Waste Management **21**(3): 285-293.

La Tabla 2.2 muestra la producción de escoria en Europa en el año 2010 en función de su tipología, según datos publicados por Euroslag¹⁴.

En España la producción de acero mediante Horno Eléctrico de Arco representa aproximadamente un 75% de la producción total. Por esta razón, dentro de los tipos existentes de escoria, la investigación desarrollada en esta Tesis Doctoral se centra en la *escoria negra de Horno Eléctrico de Arco* (EAF) y la *escoria blanca de Horno Cuchara* (LF).

Se puede hacer un cálculo estimado orientativo de la cantidad de escoria negra y blanca generada en nuestro país (Tabla 2.3).

Se estima que la fabricación de acero en Horno Eléctrico de Arco implica la producción de escoria negra (EAF) en una proporción de 110 a 150 kg por tonelada de acero. Por su parte, la escoria blanca (LF), procedente de la fase de afino en el Horno Cuchara, se produce en una proporción de entre 20 y 30 kg / tonelada de acero⁷.

Estimación orientativa de la generación de escoria en España				
Año	Acero total en España (Miles de toneladas)	Producción en horno eléctrico ≈ 75%	EAF (toneladas)	LF (toneladas)
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
2014	14.200	10.650	1.385.000	266.000
2015	14.800	11.100	1.444.000	277.000
2016	13.616	10.212	1.329.000	255.000

Tabla 2.3 Estimación orientativa de la generación de escoria en España.

Al contrario que en España, en Europa la mayor parte del acero se produce mediante Convertidor de Oxígeno (aproximadamente un 60%), así como en el resto del mundo (71%). Por esta razón, la mayor parte de las

¹⁴ EUROSLAG. The European Association representing metallurgical slag producers and processors. [<http://www.euroslag.com/>].

⁷ IHOBE, S. (1999). Libro Blanco de minimización de residuos y emisiones de escorias de acería, Sociedad Pública de Gestión Ambiental, Departamento de Ordenación del Territorio, Vivienda y Medio Ambiente del Gobierno Vasco.

investigaciones realizadas para su aprovechamiento se realiza sobre la escoria generada en este tipo de hornos^{15,16,17}.

Sin embargo, cada vez son más numerosas las investigaciones sobre la escoria negra de Horno Eléctrico de Arco (EAF)^{18,19,20} y de la escoria blanca generada en Hornos Cuchara (LF)^{21,22}.

La gran cantidad de escoria generada y la problemática que entraña la gestión hace necesario incrementar las investigaciones para su posible reutilización y valorización, buscando alternativas a su disposición y acumulación en vertederos sin un uso definido.

Las investigaciones realizadas hasta ahora han encontrado cuatro alternativas de valorización de las escorias negras: Introducción en cementera como aporte de hierro en el proceso de fabricación del Clinker²³, utilización en la capa de rodadura de firmes con pavimento de mezcla bituminosa, como material para explanadas, subbases y bases de carreteras y como árido para hormigón.

La única alternativa de valorización de las escorias blancas, confirmada por experiencias realizadas a escala industrial, es su utilización en las fábricas de cemento en sustitución de la marga arcillosa.

-
- ¹⁵ Xue, Y., H. Hou and S. Zhu (2009). "Characteristics and mechanisms of phosphate adsorption onto basic oxygen furnace slag." Journal of Hazardous Materials **162**(2): 973-980.
- ¹⁶ Gautier, M., J. Poirier, F. Bodéan, G. Franceschini and E. Veron (2013). "Basic oxygen furnace (BOF) slag cooling: laboratory characteristics and prediction calculations." International Journal of Mineral Processing **123**: 94-101.
- ¹⁷ Xue, P., D. He, A. Xu, Z. Gu, Q. Yang, F. Engström and B. Björkman (2017). "Modification of industrial BOF slag: Formation of MgFe₂O₄ and recycling of iron." Journal of Alloys and Compounds **712**: 640-648.
- ¹⁸ Drizo, A., C. Forget, R. P. Chapuis and Y. Comeau (2006). "Phosphorus removal by electric arc furnace steel slag and serpentinite." Water Research **40**(8): 1547-1554.
- ¹⁹ Barca, C., C. Gérente, D. Meyer, F. Chazarenc and Y. Andrès (2012). "Phosphate removal from synthetic and real wastewater using steel slags produced in Europe." Water research **46**(7): 2376-2384.
- ²⁰ Oluwasola, E. A., M. R. Hainin and M. M. A. Aziz (2015). "Evaluation of asphalt mixtures incorporating electric arc furnace steel slag and copper mine tailings for road construction." Transportation Geotechnics **2**: 47-55.
- ²¹ Menéndez, G., V. Bonavetti and E. Irassar (2003). "Strength development of ternary blended cement with limestone filler and blast-furnace slag." Cement and Concrete Composites **25**(1): 61-67.
- ²² Bonenfant, D., L. Kharoune, S. Sauve, R. Hausler, P. Niquette, M. Mimeault and M. Kharoune (2008). "CO₂ sequestration potential of steel slags at ambient pressure and temperature." Industrial & engineering chemistry research **47**(20): 7610-7616.
- ²³ Adolfsson, D., R. Robinson, F. Engström and B. Björkman (2011). "Influence of mineralogy on the hydraulic properties of ladle slag." Cement and concrete research **41**(8): 865-871.

2.1.3. Valorización de los residuos de acería

Tras un proceso de acondicionamiento, las escorias de acería pueden ser utilizadas como áridos siderúrgicos. Para ello, es necesario que sean tratadas previamente mediante procesos de machaqueo, separación de metales, cribado y clasificación y, en su caso, un adecuado envejecimiento. En el procesamiento de las escorias es necesario tener en cuenta medidas que eviten la contaminación atmosférica y medioambiental, tales como situar los acopios sobre una superficie pavimentada, recoger las aguas pluviales e instalar un sistema de depuración de lixiviados, entre otros.

Obras de tierra y terraplenes. Firmes de carreteras:

Aún en fase de investigación, se pueden utilizar las escorias de acería en obras de estabilización de suelos y como material para la construcción de terraplenes^{24,25}.

Las especificaciones técnicas que tienen que cumplir los áridos para ser utilizados en capas granulares en coronación de explanadas, subbases y bases de carreteras vienen recogidas en el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3)²⁶. Las escorias negras tratadas adecuadamente con anterioridad a su utilización cumplen con creces estas especificaciones. Sin embargo, es conveniente evaluar su potencial expansivo y limitar su uso, por su riesgo de expansión y de hinchamiento^{27,28}.

Poseer un buen Coeficiente de Los Ángeles y de Pulimiento Acelerado, hace que estos áridos puedan ser incorporados en mezclas bituminosas especialmente útiles en capas de rodadura, tras un adecuado tratamiento. Si bien, éstos pueden presentar alguna dificultad debido a su elevada densidad y mayor absorción, en comparación con los áridos convencionales. También, aunque resulte positivo para el rodamiento, el

²⁴ 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 Sci. Bull. Ser. B* **69**(2): 99-108.

²⁵ Kambole, C., P. Paige-Green, W. Kupolati, J. Ndambuki and A. Adeboje (2017). "Basic oxygen furnace slag for road pavements: A review of material characteristics and performance for effective utilisation in southern Africa." *Construction and Building Materials* **148**: 618-631.

²⁶ Bustos, G. (2004). Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes. M. d. Fomento.

²⁷ Ramonich, E. V. and M. Barra (2001). "Reactivity and expansion of electric arc furnace slag in their application in construction." *Materiales de Construcción* **51**(263-264): 137-148.

²⁸ Shu, C.-Y., W.-T. Kuo and C.-U. Juang (2016). "Analytical model of expansion for electric arc furnace oxidizing slag-containing concrete." *Computers and Concrete* **18**(5): 937-950.

cambio de textura superficial puede ser un inconveniente a la hora de dosificar las mezclas^{29,30}.

Asimismo, se han realizado estudios, con resultados satisfactorios, de las propiedades de los áridos siderúrgicos en hormigones para firmes. Estos hormigones presentan buena resistencia a compresión, flexión y tracción y también muestran un buen comportamiento a la tenacidad, resistencia al impacto y a la abrasión^{31,32}.

Utilización en cementera de escorias negras y blancas:

Es posible el reciclaje de las escorias negras como aporte de hierro, silicio y cal en el proceso de fabricación del Clinker de Cemento Portland, sin presentar ninguna limitación ambiental. Se ha comprobado que los únicos elementos que incrementan su concentración son el cromo y el manganeso. No obstante, este aumento no presenta problemas de calidad técnica, ya que la legislación española no recoge limitaciones para estos dos elementos.

La incorporación de escoria negra al polvo de cemento conlleva un incremento de su resistencia mecánica. Un contenido de escoria comprendido entre el 15% y el 45% otorgaría una categoría resistente al cemento de 32,5 N/mm² o incluso 42,5 N/mm². Además, estos cementos presentan una menor demanda de agua, por lo que mejora su trabajabilidad, aunque presentan un mayor tiempo de fraguado³³.

La escoria blanca por el contrario solo se puede utilizar en las cementeras como materia prima en sustitución de la marga, debido al bajo contenido en hierro. Sin embargo, la gran cantidad de fluoruros y los altos contenidos en manganeso determina que la máxima dosificación sea del 5%. No superando este porcentaje, el análisis de las resistencias mecánicas muestra valores muy similares a los convencionales⁷.

²⁹ Li, Q., H. Ding, A. Rahman and D. He (2016). "Evaluation of Basic Oxygen Furnace (BOF) material into slag-based asphalt concrete to be used in railway substructure." Construction and Building Materials **115**: 593-601.

³⁰ Skaf, M., J. M. Manso, Á. Aragón, J. A. Fuente-Alonso and V. Ortega-López (2017). "EAF slag in asphalt mixes: A brief review of its possible re-use." Resources, Conservation and Recycling **120**: 176-185.

³¹ Bosela, P., N. Delatte, R. Obratil and A. Patel (2009). "Propiedades para firmes del hormigón fabricado con áridos siderúrgicos." Carreteras: Revista técnica de la Asociación Española de la Carretera(166): 55-66.

³² 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 **181**(1): 938-948.

³³ Kourounis, S., S. Tsivilis, P. Tsakiridis, G. Papadimitriou and Z. Tsibouki (2007). "Properties and hydration of blended cements with steelmaking slag." Cement and Concrete Research **37**(6): 815-822.

⁷ IHOBE, S. (1999). Libro Blanco de minimización de residuos y emisiones de escorias de acería, Sociedad Pública de Gestión Ambiental, Departamento de Ordenación del Territorio, Vivienda y Medio Ambiente del Gobierno Vasco.

Utilización de escorias negras y blancas como árido para hormigón:

Tras una correcta trituración y tamizado, al igual que un adecuado proceso de estabilización y envejecimiento, la escoria negra puede ser reutilizada en hormigones como árido grueso o fino^{34,35}.

Estos hormigones presentan una mayor densidad ($\approx 2.770 \text{ kg/m}^3$) pudiendo alcanzar incluso valores de 3.000 kg/m^3 , si bien presentan similares resistencias a compresión que los hormigones con arena natural.

Los hormigones con escorias de acería presentan un comportamiento adecuado durante su puesta en obra. Además, debido al bajo contenido de sílice de las escorias negras, el riesgo de que se presenten fenómenos de reacción álcali-árido es muy reducido. Se deben utilizar aditivos aireantes para obtener un adecuado comportamiento de durabilidad frente a los ciclos hielo-deshielo³⁶.

También resultan muy valiosas las conclusiones obtenidas en diferentes artículos de investigación relacionados con hormigones fabricados con escorias. En el artículo "*Production of durable self-compacting concrete using ladle furnace slag (LFS) as filler material*"³⁷ se muestra como la durabilidad de los hormigones con escoria negra aumentan en torno al 30% respecto a los hormigones calizos.

Mientras que en el artículo "*Strength and durability of concrete made with electric steelmaking slag*"³⁸, se concluye que el empleo de escorias blancas no muestra resultados positivos frente a los ensayos de durabilidad cuando se emplea como árido.

2.1.4. Escorias siderúrgicas: escoria negra EAF y escoria blanca LF

Tal y como se ha indicado anteriormente en varias ocasiones, las escorias negras se forman durante las operaciones básicas de fabricación

³⁴ Morino, K. and E. Iwatsuki (2001). Properties of concrete using electric arc furnace oxidizing slag aggregates. JSCE second international conference on engineering materials, California, USA.

³⁵ Santamaría, A., A. Orbe, M. Losañez, M. Skaf, V. Ortega-Lopez and J. J. González (2017). "Self-compacting concrete incorporating electric arc-furnace steelmaking slag as aggregate." Materials & Design **115**: 179-193.

³⁶ Pellegrino, C. and V. Gaddo (2009). "Mechanical and durability characteristics of concrete containing EAF slag as aggregate." Cement and Concrete Composites **31**(9): 663-671.

³⁷ Sideris, K. K., C. Tassos and A. Chatzopoulos (2015). "Production of durable self-compacting concrete using ladle furnace slag (LFS) as filler material." Procedia Engineering **108**: 592-597.

³⁸ 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 **108**(2).

del acero en los Hornos de Arco Eléctrico, mientras que las escorias blancas se forman tras el afino del acero en los Hornos de Cuchara.

Como la materia prima utilizada en la fabricación del acero es en su mayor parte chatarra, recortes de prensas, guillotinas o máquinas herramientas, la composición química y mineralógica de la escoria negra de Horno de Arco Eléctrico estará condicionada por las propiedades y características de estos materiales.

En el caso de las escorias blancas obtenidas en el proceso de afino en el Horno Cuchara, su composición también dependerá de la calidad del acero producido en la primera fase del proceso de fabricación.

En general, la composición química y mineralógica de la escoria contiene principalmente hierro (25-40%), sílice (10-17%) y calcio (25-40%)²⁷.

En el siguiente apartado se recoge la composición química y mineralógica de la escoria española. Además, se realiza un estudio exhaustivo de las distintas composiciones investigadas por otros científicos, como ya recopilan Yildirim y Prezzi³⁹.

2.1.4.1. Composición química

La Tabla 2.4 muestra la composición química de la escoria negra en España, recogida en el *"Catálogo de Residuos utilizables en construcción; Escorias de acería de horno eléctrico de arco eléctrico"* (procedente del estudio de varios autores)^{40,41}. Por su parte, la composición química de la escoria blanca de acería se indica en la Tabla 2.5.

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

Tabla 2.4 Composición química escoria negra EAF española.

²⁷ Ramonich, E. V. and M. Barra (2001). "Reactivity and expansion of electric arc furnace slag in their application in construction." *Materiales de Construcción* **51**(263-264): 137-148.

³⁹ Yildirim, I. Z. and M. Prezzi (2011). "Chemical, mineralogical, and morphological properties of steel slag." *Advances in Civil engineering* **2011**.

⁴⁰ Etxeberria, M., C. Pacheco, J. Meneses and I. Berridi (2010). "Properties of concrete using metallurgical industrial by-products as aggregates." *Construction and Building Materials* **24**(9): 1594-1600.

⁴¹ 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*. Barcelona.

Composición química (%) escoria blanca LF española			
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 2.5 Composición química escoria blanca LF española.

La Tabla 2.6 muestra la composición química de la escoria negra EAF obtenida por varios investigadores, mientras que la Tabla 2.7 hace referencia a la composición química de la escoria blanca LF.

Composición química (%) escoria negra EAF						
	Barra 2001 ⁴²	Luxán 2000 ⁴³	Manso 2006 ⁴⁴	Shi 2004 ⁴⁵	Tossavainen 2007 ⁴⁶	Tsakiridis 2008 ⁴⁷
CaO	29,5	24,4	23,9	35,0-60,0	38,8	35,7
SiO ₂	16,1	15,4	15,3	9,0-20,0	14,1	17,5
Al ₂ O ₃	7,6	12,2	7,4	2,0-9,0	6,7	6,3
MgO	5,0	2,9	5,1	5,0-15,0	3,9	6,5
FeO	-	34,4	-	15,0-30,0	5,6	-
Fe ₂ O ₃	32,56	-	-	-	20,3	36,4
Fe _{total}	-	-	42,5	-	-	-
SO ₃	0,6	-	0,1	0,1-0,2	-	-
MnO	4,5	5,6	4,5	3,0-8,0	5,0	2,5
TiO ₂	0,78	0,56	-	-	-	0,8
P ₂ O ₅	0,6	1,2	-	0,0-0,3	-	-
CaO libre	-	-	0,5	-	-	-

Tabla 2.6 Composición química escoria negra EAF. (Yildirim y Prezzi).

- ⁴² Barra, M., E. Ramonich and M. Munoz (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, University of Durham.
- ⁴³ Luxán, M., 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 **30**(4): 517-519.
- ⁴⁴ Manso, J. M., J. A. Polanco, M. Losanez and J. J. González (2006). "Durability of concrete made with EAF slag as aggregate." Cement and Concrete Composites **28**(6): 528-534.
- ⁴⁵ Shi, C. (2004). "Steel slag—its production, processing, characteristics, and cementitious properties." Journal of Materials in Civil Engineering **16**(3): 230-236.
- ⁴⁶ Tossavainen, M., F. Engstrom, Q. Yang, N. Menad, M. L. Larsson and B. Bjorkman (2007). "Characteristics of steel slag under different cooling conditions." Waste management **27**(10): 1335-1344.
- ⁴⁷ Tsakiridis, P., G. Papadimitriou, S. Tsvilis and C. Koroneos (2008). "Utilization of steel slag for Portland cement clinker production." Journal of Hazardous Materials **152**(2): 805-811.

Composición química (%) escoria blanca LF					
	Nicolae 2007 ²⁴	Shi 2004 ⁴⁵	Qian 2002 ⁴⁸	Setién 2009 ⁴⁹	Tossavainen 2007 ⁴⁶
CaO	49,6	30,0-60,0	49,5	50,5-57,5	42,5
SiO ₂	14,7	2,0-35,0	19,6	12,6-19,8	14,2
Al ₂ O ₃	25,6	5,0-35,0	12,3	4,3-18,6	22,9
MgO	7,9	1,0-10,0	7,4	7,5-11,9	12,6
FeO	0,44	0,0-15,0	-	-	0,5
Fe ₂ O ₃	0,22	-	0,9	1,6-3,3	1,1
Fe _{total}	0,17	-	-	-	0,4
SO ₃	0,8	0,1-1,0	-	-	-
MnO	0,4	0-5,0	1,4	0,4-0,5	0,2
TiO ₂	-	-	-	0,3-0,9	-
P ₂ O ₅	0,2	0,1-0,4	0,4	-	-
CaO libre	-	-	2,5	3,5-19,0	-

Tabla 2.7 Composición química escoria blanca LF. (Yildirim y Prezzi).

La escoria negra EAF puede presentar una relación Fe₂O₃ de hasta un 38%, coincidiendo con la cantidad del hierro oxidado y la chatarra utilizada como materia prima. Si bien la presencia de FeO en la escoria blanca LF es mucho más baja (<10%).

Las escorias negras EAF contienen SiO₂ en cantidades comprendidas entre el 9% y el 20%, mientras que tiene una presencia entre el 2% y el 9% de Al₂O₃. El MgO se encuentra en valores comprendidos entre el 2,9% y el 15%. Los contenidos de Al₂O₃ y CaO son más altos en las escorias blancas LF.

La Cal Libre o lima no combinada presente en la escoria negra EAF es casi mínima alcanzando como mucho el 0,5%. Sin embargo, en la escoria blanca LF puede ascender hasta un 19%.

La presencia de metales pesados en la escoria blanca LF es también más acusada, encontrando contenidos importantes de cromo, zinc y plomo (<1%).

²⁴ 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 Sci. Bull. Ser. B* **69**(2): 99-108.

⁴⁵ Shi, C. (2004). "Steel slag—its production, processing, characteristics, and cementitious properties." *Journal of Materials in Civil Engineering* **16**(3): 230-236.

⁴⁸ Qian, G., D. Sun, J. Tay and Z. Lai (2002). "Hydrothermal reaction and autoclave stability of Mg bearing RO phase in steel slag." *British ceramic transactions* **101**(4): 159-164.

⁴⁹ Setién, J., D. Hernández and J. González (2009). "Characterization of ladle furnace basic slag for use as a construction material." *Construction and Building Materials* **23**(5): 1788-1794.

⁴⁶ Tossavainen, M., F. Engstrom, Q. Yang, N. Menad, M. L. Larsson and B. Bjorkman (2007). "Characteristics of steel slag under different cooling conditions." *Waste management* **27**(10): 1335-1344.

2.1.4.2. Composición mineralógica

La composición mineralógica de la escoria negra EAF y la escoria blanca LF se muestran en la Tabla 2.8 y Tabla 2.9.

Composición mineralógica escoria negra EAF	
Barra 2001 ⁴²	CaCO ₃ , FeO, MgO, Fe ₂ O ₃ , Ca ₂ Al(AlSiO ₇), Ca ₂ SiO ₄
Geiseler 1996 ⁵⁰	2CaO·SiO ₂ , 3CaO·SiO ₂ , 2CaO·Fe ₂ O ₃ , FeO, (Ca, Fe)O (calciowusita), (Mg, Fe)O (Magnesiowusita), MgO, CaO
Luxan 2000 ⁴³	Ca ₂ SiO ₅ , Ca ₂ Al(AlSiO ₇), Fe ₂ O ₃ , Ca ₁₄ Mg ₂ (SiO ₄) ₈ , MgFe ₂ O ₄ , Mn ₃ O ₄ , MnO ₂
Nicolae 2007 ²⁴	MnO ₂ , MnO, Fe ₂ SiO ₄ , Fe ₇ SiO ₁₀
Qian 2002 ⁴⁸	γ-Ca ₂ SiO ₄ , C ₃ MS ₂ , CFMS, FeO-MnO-MgO solid solution
Tossavainen 2007 ⁴⁶	Ca ₃ Mg(SiO ₄) ₂ , β-Ca ₂ SiO ₄ , Spinel solid solution (Mg,Mn) (Cr,Al) ₂ O ₄ , wustite-type solid solution ((Fe,Mg,Mn)O), Ca ₂ (Al,Fe) ₂ O ₅
Tsakiridis 2008 ⁴⁷	Ca ₂ SiO ₄ , 4CaO·Al ₂ O ₃ , Ca ₂ Al(AlSiO ₇), Ca ₃ SiO ₅ , 2CaO·Al ₂ O ₃ ·SiO ₂ , FeO, Fe ₃ O ₄ , MgO, SiO ₂

Tabla 2.8 Composición mineralógica escoria negra EAF. (Yildirim y Prezzi).

Composición mineralógica escoria blanca LF	
Manso 2005 ⁵¹	Al ₂ O ₄ Mg, Ca(OH) ₂ , Si ₂ O ₆ CaMg, MgO, Ca ₃ SiO ₅ , β-Ca ₂ SiO ₄ , γ-Ca ₂ SiO ₄ , SO ₄ Ca
Nicolae 2007 ²⁴	CaO·SiO ₂ , CaOAl ₂ O ₃ ·2SiO ₂ , CaS, Al ₂ O ₅
Qian 2002 ⁴⁸	γ-Ca ₂ SiO ₄ , C ₃ MS ₂ , MgO
Tossavainen 2007 ⁴⁶	Ca ₁₂ Al ₁₄ O ₃₃ , MgO·β-Ca ₂ SiO ₄ , γ-Ca ₂ Al ₂ SiO ₇

Tabla 2.9 Composición mineralógica escoria blanca LF. (Yildirim y Prezzi).

Desde el punto de vista mineralógico, se observa en la escoria negra EAF importantes concentraciones de Silicato Bicálcico (C₂S), Silicato Tricálcico (C₃S), Cal Libre (CaO), Espinela (MgAl₂O₄), Ferrita Dicálcica (2 CaO Fe₂O₃) y fases magnéticas (Fe₃O₄ y Fe₂O₃). Además, contiene

⁴² Barra, M., E. Ramonich and M. Munoz (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, University of Durham.

⁵⁰ Geiseler, J. (1996). "Use of steelworks slag in Europe." Waste management **16**(1-3): 59-63.

²⁴ 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 Sci. Bull. Ser. B **69**(2): 99-108.

⁴⁸ Qian, G., D. Sun, J. Tay and Z. Lai (2002). "Hydrothermal reaction and autoclave stability of Mg bearing RO phase in steel slag." British ceramic transactions **101**(4): 159-164.

⁴⁶⁴⁶ Tossavainen, M., F. Engstrom, Q. Yang, N. Menad, M. L. Larsson and B. Bjorkman (2007). "Characteristics of steel slag under different cooling conditions." Waste management **27**(10): 1335-1344.

⁵¹ Manso, J. M., M. Losañez, J. A. Polanco and J. J. Gonzalez (2005). "Ladle furnace slag in construction." Journal of materials in civil engineering **17**(5): 513-518,

importantes concentraciones de óxido de hierro, una de cuyas fases minerales es la Wüsite (FeO).

El contenido de este óxido de hierro en la escoria blanca LF es menor, dando mayor importancia a la presencia de diversas formas cristalinas de Silicato Bicálcico (C₂S)⁴⁷. La combinación de la sílice con la cal a altas temperaturas es la causante de una mayor presencia de C₂S en la escoria blanca LF⁴³.

2.1.4.3. Propiedades físicas

Sobre las propiedades físicas de la escoria cabe destacar que la densidad de las escorias negras EAF es muy elevada con respecto a los áridos naturales, entre 3,1 y 4,5 (gr/cm³). La absorción de agua presenta valores del 1% y 7% en volumen, lo que puede influir en la durabilidad del árido, especialmente frente a ciclos hielo-deshielo o humedad-sequedad^{52,53}.

La Tabla 2.10 recoge las propiedades físicas de las escorias negras y blancas estudiadas en España, incluidas en el Catálogo de Residuos utilizables en Construcción.

Características físicas de las escorias			
Propiedad	Escoria negra EAF		Escoria blanca
	Árido grueso	Árido fino	
Tamaño (mm)	4,76-25,0	0-4,76	-
Densidad aparente (g/cm ³)	3,35	3,70	2,65
Superficie específica (cm ² /g)	-	-	2064
Absorción (%)	3,29	2,84	-
Porosidad (%)	10,5	-	-
Desgaste de los ángeles (%)	≅ 20	-	-

Tabla 2.10 Características físicas de las escorias.

⁴⁷ Tsakiridis, P., G. Papadimitriou, S. Tsvilis and C. Koroneos (2008). "Utilization of steel slag for Portland cement clinker production." *Journal of Hazardous Materials* **152**(2): 805-811.

⁴³ Luxán, M., 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* **30**(4): 517-519.

⁵² Etxeberria, M., C. Pacheco, J. Meneses and I. Berridi (2010). "Properties of concrete using metallurgical industrial by-products as aggregates." *Construction and Building Materials* **24**(9): 1594-1600.

⁵³ Tomasiello, S. and M. Felitti (2010). "EAF slag in self-compacting concretes." *Facta universitatis-series: Architecture and Civil Engineering* **8**(1): 13-21.

2.2. INTRODUCCIÓN A LOS MORTEROS

*“Mezcla compuesta de uno o varios conglomerantes inorgánicos, de áridos, de agua y, a veces, de adiciones y/o aditivos”*⁵⁴. Esta es la definición que da AENOR de un mortero. Además, la normativa específica los usos que este material puede tener en construcción. *“El mortero puede ser utilizado en el rejuntado y trabazón de piezas de albañilería, para revoco y enlucido de superficies exteriores o interiores, o bien usos especiales...”*

Este material ha experimentado una evolución en el tiempo, motivada por el progreso de la técnica, especialmente en lo referido a la selección de las materias primas, los medios técnicos utilizados, la adición de aditivos y los requerimientos de calidad y prestaciones exigidos.

Para su fabricación se emplean materiales tradicionales como el yeso, la cal o el cemento, los cuales se utilizan desde tiempos inmemoriales. Aunque el empleo de estos conglomerantes ha variado a lo largo de la historia, los usos y prestaciones sí han estado definidos de un modo preciso, experimentando pocos cambios hasta nuestros días.

2.2.1. Reseña histórica

El origen de los morteros hay que buscarlo en los comienzos de la civilización y su arquitectura, resultante del asentamiento en ciudades de grupos humanos dedicados a la agricultura y la artesanía durante el neolítico^{55,56}.

Vitrubio, en su primer libro de *“Los diez libros de la Arquitectura”*⁵⁷, habla sobre el origen de la arquitectura, considerando que los primeros materiales de construcción fueron la madera y el mortero. La piedra o el ladrillo se incorporaron en etapas posteriores: *“En un primer momento, levantaron paredes entrelazando pequeñas ramas con barro...”*, *“Otros levantaban las paredes, después de secar terrones de tierra arcillosa, uniéndolos y asegurándolos con maderos atravesados”*, y finalmente, *“fueron potenciando su habilidad en sus obras y se consiguió que, quienes fueron más diligentes y constantes, profesaran ser artesanos...”*

Por lo tanto, parece indiscutible que el uso de los morteros se remonta a la época de la prehistoria, cuando se utilizaban como base en la construcción de viviendas o defensas, como mezcla de áridos, barro y materia vegetal. Al ser aplicados como revestimientos de paredes y otros elementos, desde el primer momento también confieren un sentido estético.

⁵⁴ AENOR (2003). "UNE-EN 998-1 Especificaciones de los morteros para albañilería. Parte 1: Morteros para revoco y enlucido", Madrid, Aenor.

⁵⁵ Sánchez, F. J. A. (2002). Historia, caracterización y restauración de morteros, Universidad de Sevilla.

⁵⁶ Choisy, A. (2006). Arte de construir en Egipto, Reverte.

⁵⁷ Polión, M. V. (1992). Los diez libros de arquitectura, Ediciones Akal.

En la Figura 2.3 se observa un esquema de los materiales utilizados por el hombre en morteros de construcción.

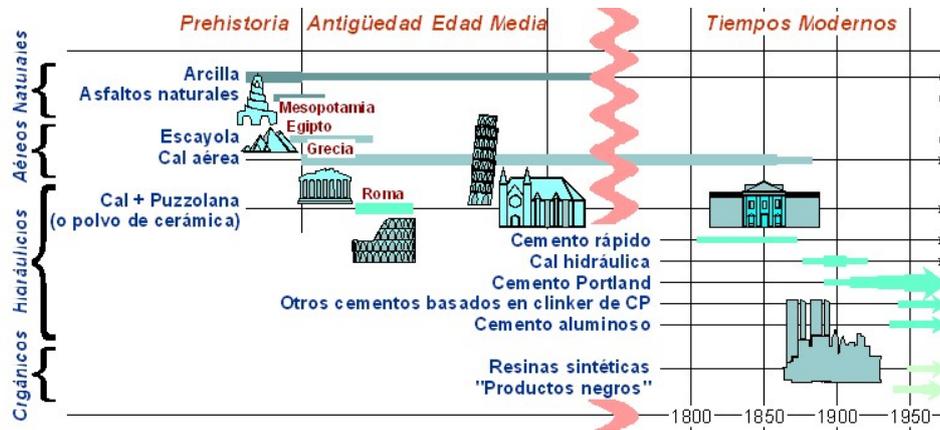


Figura 2.3 Materiales utilizados en morteros de construcción⁵⁸.

Una vez incorporada la arquitectura, se mantiene la práctica de la pavimentación y enlucido, por necesidad humana de decorar y acondicionar interiores, siendo común en los pueblos neolíticos a orillas del Mediterráneo Oriental y Europa.

Se han encontrado muros revestidos y suelos pavimentados en ciudades como Jericó en Palestina (9.000 al 8.000 a.C.)⁵⁹, Nevali Çori (10.000 al 8.000 a.C.) y Çatal Hüyük (6.000 a.C.) en Turquía⁵⁵, y en las pirámides de Kheops también se han hallado restos de mortero de cal como conglomerante, en los aparejos de la gran pirámide en el 4.000 a.C.⁵⁶. Eso indica que la piedra no fue el primer material de construcción, al menos en la arquitectura doméstica de estas culturas.

En Mesopotamia y Egipto, debido a la abundancia de limo en los ríos Éufrates, Tigris y Nilo y la escasez de materiales pétreos en algunas de estas áreas, la arquitectura se basaba en el barro mezclado con productos naturales y artificiales variados. Esta pasta podía estar soportada por estructuras de ramas o juncos, apareciendo así sistemas constructivos como el tapial o piezas independientes como ladrillos, inicialmente no cocidos.

⁵⁸ Casco, A. G. (2007). Morteros de Construcción y Ornamentación [http://www.ugr.es/~agcasco/personal/restauracion/teoria/TEMA04.htm.], Universidad de Granada.

⁵⁹ Garate Rojas, I. (2002). Artes de la Cal, Instituto español de Arquitectura, Madrid.

⁵⁵ Sánchez, F. J. A. (2002). Historia, caracterización y restauración de morteros, Universidad de Sevilla.

⁵⁶ Choisy, A. (2006). Arte de construir en Egipto, Reverte.

Posteriormente, estas dos civilizaciones cambian la tendencia contractiva realizada anteriormente, desviándose a la construcción monumental de templos, palacios o tumbas.

En Egipto se empieza a construir en piedra, uniendo las piezas pétreas a hueso, por lo que no se utilizaba material de unión, aunque se han encontrado restos de yesos entre los sillares de las grandes edificaciones del antiguo Egipto, se sabe que estas pastas se añadían para lubricar las piezas y mejorar el deslizamiento y ajuste de las mismas, no ejerciendo función alguna de trabazón.

Mientras, en Mesopotamia estas grandes construcciones se siguen haciendo durante bastante tiempo con barro y ladrillo. De este modo, la utilización del ladrillo se extiende a todo el área de influencia de la cultura mesopotámica llegando al Imperio Persa, y de ahí al Imperio Islámico.

El barro mezclado con tierra o arena y otros componentes utilizado para tapiales y para unir piezas puede considerarse una aproximación al mortero siendo éste uno de sus orígenes.

Además de las técnicas de tapial, ladrillo, sillería o mampostería de piedra, las técnicas de revestimiento también se sofistican en estas culturas. Las paredes de los edificios se recubren con capas de mortero, para proteger de la intemperie y embellecer la pared. En estos morteros los materiales utilizados eran el yeso y la cal. El yeso se utilizaba sobre todo en interiores, mientras que los morteros de cal se usaban en los exteriores.

Durante la Edad Media no se producen grandes mejoras en los morteros respecto al grado de calidad conseguido por griegos y romanos⁶⁰. Aunque siempre se corre un riesgo al generalizar, éstos materiales tienen peores comportamientos, debido principalmente a la falta de control en las proporciones de las materias primas empleadas y por ser aplicados sin el asentamiento característico de las construcciones romanas⁶¹.

A partir del siglo XII la calidad de los morteros mejora de nuevo, siendo más homogéneos. Sin embargo, razones económicas provocan un nuevo retroceso en el siglo XIII, como se puede comprobar en los morteros utilizados en las catedrales de Laon, Troyes, Chalon-sur-Marne y Sées⁶².

Es en el siglo XVIII cuando se incrementa su calidad con el descubrimiento de los conglomerantes hidráulicos, cuando Smeaton se propuso encontrar una cal que pudiera resistir la acción del agua de mar para la construcción del faro de Eddystone (Plymouth), en el año 1756.

⁶⁰ Garofano, I., M. Robador and A. Duran (2014). "Materials characteristics of Roman and Arabic mortars and stuccoes from the Patio de Banderas in the Real Alcazar of Seville (Spain)." *Archaeometry* **56**(4): 541-561.

⁶¹ Furlan, V. (1996). "Causes, mechanisms and measurement of damage in cultural heritage materials. The state of the art: mortars, bricks and rendering." *LCP publications 1975-1995: Matériaux de construction. Pierre. Pollution atmosphérique. Peinture murale*: 75-83.

⁶² Furlan, V. and P. Bissegger (1975). *Les mortiers anciens. Histoire et essais d'analyse scientifique*, na.

Estos primeros conglomerantes hidráulicos tenían las características de los cementos rápidos actuales, con una gran presencia de aluminatos. Estas cales hidráulicas pueden ser consideradas como materiales intermedios entre la cal aérea y el cemento portland. Vicat, separándose de estas premisas, constituye una base científica para la fabricación y empleo de la cal hidráulica⁶³.

En 1811 se descubre el cemento Portland, obtenido como calcinación lenta de caliza molida y arcilla. El siglo XIX comenzó con múltiples investigaciones sobre estos materiales, aunque desde entonces el procedimiento para la obtención del cemento no ha cambiado. Sin embargo, desde finales del siglo XIX se ha producido una gran evolución técnica y científica, debido a la aparición de morteros aplicables a situaciones específicas, que ha abierto el enorme campo de la investigación.

2.2.2. Tipos de morteros

De acuerdo con la legislación en España y Europa los diferentes tipos de morteros existentes, según su uso, pueden agruparse en:

- Morteros para albañilería: en los que la normativa distingue entre morteros para revoco y enlucido (Norma EN 998-1)⁵⁴ y morteros para albañilería (Norma EN 998-2)⁶⁴.
- Morteros especiales: siendo éstos principalmente los morteros para solados, morteros cola, morteros de reparación y morteros impermeabilizantes, que no se rigen bajo ningún tipo de normativa específica.

Los morteros también pueden ser clasificados, en función del concepto, de la siguiente manera:

- Morteros diseñados: cuya composición y sistema de fabricación se han elegido por el fabricante, con el fin de obtener las propiedades especificadas.
- Mortero de receta o prescrito: los cuales son fabricados en unas proporciones predeterminadas y cuyas propiedades dependen de las proporciones declaradas de los componentes.

La clasificación realizada según el sistema de fabricación es la siguiente⁶⁵:

⁶³ Ashurst, J. (1984). Mortars, plasters and renders in conservation, Ecclesiastical architects' and surveyors' association.

⁵⁴ AENOR (2003). "UNE-EN 998-1 Especificaciones de los morteros para albañilería. Parte 1: Morteros para revoco y enlucido", Madrid, Aenor.

⁶⁴ AENOR (2004). "UNE-EN 998-2 Especificaciones de los morteros para albañilería. Parte 2: Morteros para albañilería", Madrid, Aenor.

- Morteros fabricados "in situ": son dosificados, mezclados y amasados con agua en la obra.
- Morteros industriales semiterminados: son dosificados y mezclados en fábrica y se suministran a su lugar de utilización donde se mezclan siguiendo las especificaciones. Estos pueden ser secos (la mezcla está preparada y solamente requiere añadir agua) o húmedos (suministrados para ser empleados directamente).

Además, tradicionalmente también se ha procedido a clasificar a los morteros según el conglomerante que los integra, dando lugar a morteros de cemento, morteros de cal aérea, y mortero de cal hidráulica o mixtos (también denominados como bastardos).

2.2.3. Morteros con residuos

Debido a la importancia de la interacción de la construcción en el medioambiente, no solo se plantean cambios en la producción y captación de energía, sino también la creación y empleo de nuevos materiales más eficientes y con menor coste energético. Son numerosas las investigaciones que se están realizando por universidades y empresas en los últimos años con residuos de diversos tipos y procedencia.

Los residuos orgánicos (orujillo, cáscara de arroz...), son subproductos de los procesos agroindustriales con aplicaciones muy reducidas en la actualidad. La elevada producción de estos materiales en determinadas zonas hace necesario el aprovechamiento de estos residuos. Su baja densidad y buenas propiedades de aislamiento térmico y acústico podrían, a priori, proporcionar ventajas de carácter constructivo al ser reutilizados en morteros de albañilería⁶⁶.

Desde el siglo XX, después de la Segunda Guerra Mundial (1939-1945), se trabaja en la incorporación de escombros de edificios en los hormigones y morteros^{67,68}. En la actualidad, se llevan a cabo numerosos estudios sobre los productos de construcción y demolición^{69,70,71}. Estos residuos son

⁶⁵ AFAM (2004). Guía Morteros Especiales, Asociación Nacional de Fabricantes de Morteros.

⁶⁶ Roselló, J., L. Soriano, M. P. Santamarina, J. L. Akasaki, J. Monzó and J. Payá (2017). "Rice straw ash: A potential pozzolanic supplementary material for cementing systems." Industrial Crops and Products **103**: 39-50.

⁶⁷ Ploger, R. R. (1947). An Investigation of the Compressive Strength of Concrete in which Concrete Rubble was Used as Aggregate, Cornell University.

⁶⁸ Nixon, P. (1976). "The use of materials from demolition in construction." Resources Policy **2**(4): 276-283.

⁶⁹ del Río Merino, M., P. Izquierdo Gracia and I. S. Weis Azevedo (2010). "Sustainable construction: construction and demolition waste reconsidered." Waste management & research **28**(2): 118-129.

⁷⁰ Villoria-Sáez, P., C. Porras-Amores and M. del Río Merino (2015). "New quantification proposal for construction waste generation in new residential constructions." Journal of Cleaner Production **102**: 58-65.

reutilizados también para la elaboración de nuevos morteros y hormigones^{72,73,74}.

Desde finales de los 70 se investiga en la reutilización de morteros con residuos de piezas de cerámica o piezas de ladrillo^{75,76,77}.

También pueden añadirse al mortero otros materiales reciclados con el objetivo de mejorar otro tipo de propiedades, como el vidrio celular, el corcho natural o el papel reciclado, entre otros.

En el caso del vidrio celular, éste puede considerarse una adición de carácter puzolánico, apropiada en la fabricación de cementos debido a su componente química con sílice y carbonatos sódico y cálcico^{78,79,80}. Aun presentando un elevado grado de retracción, este material confiere al mortero mayores resistencias mecánicas y alto grado de aislamiento a la radiación y apantallamiento de los rayos X^{81,82}.

⁷¹ Villoria-Saez, P., V. W. Tam, M. del Río Merino, C. V. Arrebola and X. Wang (2016). "Effectiveness of greenhouse-gas Emission Trading Schemes implementation: a review on legislations." *Ibid.* **127**: 49-58.

⁷² Cunha, G., A. C. Andrade, J. M. M. Souza, A. C. J. Evangelista and V. C. Almeida (2010). Characterization of Civil Construction Waste and its Incorporation to Mortar. Materials Science Forum, Trans Tech Publ.

⁷³ Lasso, P. R. O., C. M. P. Vaz, A. C. d. C. Bernardi, C. R. d. Oliveira and O. O. S. Bacchi (2013). "Evaluation of correction of soil acidity with recycled construction and demolition debris." *Revista Brasileira de Ciência do Solo* **37**(6): 1659-1668.

⁷⁴ Villoria Sáez, P., M. del Río Merino, A. S.-A. González and C. Porras-Amores (2013). "Best practice measures assessment for construction and demolition waste management in building constructions." *Resources, Conservation and Recycling* **75**: 52-62.

⁷⁵ Butler, A., D. Leek and R. Johnson (2000). "The potential for using some alternative aggregates in structural concrete." *Structural Engineer* **78**(22).

⁷⁶ Souza, L. d. F. and H. Mansur (2004). "Production and characterization of ceramic pieces obtained by slip casting using powder wastes." *Journal of Materials Processing Technology* **145**(1): 14-20.

⁷⁷ Frías, M., R. Vigil de la Villa, R. García, M. I. Sánchez de Rojas and A. Juan Valdés (2013). "The influence of slate waste activation conditions on mineralogical changes and pozzolanic behavior." *Journal of the American Ceramic Society* **96**(7): 2276-2282.

⁷⁸ Ling, T.-C., C.-S. Poon and S.-C. Kou (2011). "Feasibility of using recycled glass in architectural cement mortars." *Cement and Concrete Composites* **33**(8): 848-854.

⁷⁹ Marco, J., E. García, M. Más, V. Alcaraz and A. Luizaga (2012). "Estudio de la resistencia a compresión de morteros fabricados con conglomerante compuesto de polvo de vidrio." *Informes de la Construcción* **64**(528): 529-536.

⁸⁰ Khmiri, A., M. Chaabouni and B. Samet (2013). "Chemical behaviour of ground waste glass when used as partial cement replacement in mortars." *Construction and building materials* **44**: 74-80.

⁸¹ Matos, A. M. and J. Sousa-Coutinho (2012). "Durability of mortar using waste glass powder as cement replacement." *Construction and Building Materials* **36**: 205-215.

⁸² Zhao, H. and W. Sun (2012). "Effect of Cathode Ray Tubes Glass Sand as Fine Aggregate on Properties of Mortar." *Journal of the Chinese Ceramic Society* **40**(2): 240-246.

Por su parte, las ventajas asociadas a la adición del corcho natural, debido a su poca densidad y su estructura celular, son la baja conductividad térmica, una buena absorción acústica y alta impermeabilidad, influyendo principalmente en las propiedades mecánicas, la permeabilidad y la resistencia térmica^{83,84}.

Los éteres de celulosa del papel reciclado se utilizan para la mejora de las propiedades de los morteros en estado fresco, tales como la retención de agua, capacidad de trabajo, y tiempo abierto. Con estos residuos se obtienen también mejoras en la estabilidad térmica y mecánica y se consiguen morteros y hormigones más trabajables e impermeables^{85,86}.

Con el fin de obtener morteros menos densos, y a la vez más flexibles, se realiza la sustitución de áridos tradicionales por agregados polímeros ligeros, ya sea parcial o totalmente. Dentro de este campo, se encuentran como materiales más estudiados el poliestireno expandido, polietileno, el politereftalato de etilo y el polietilvinilacetato de etilo.

En las investigaciones con poliestireno expandido (EPS) se examinan las propiedades de aislamiento térmico y acústico y se busca un material estable ante el ataque de productos químicos comunes, como las soluciones salinas, los ácidos diluidos y el ataque biológico^{87,88,89}.

Los resultados obtenidos en las investigaciones donde se utiliza politereftalato de etilo (PET), indican que al incrementar la proporción de PET añadido se disminuye la densidad, aumenta el aislamiento térmico y se reduce la resistencia mecánica a flexión^{90,91,92}.

⁸³ Nóvoa, P., M. Ribeiro, A. Ferreira and A. Marques (2004). "Mechanical characterization of lightweight polymer mortar modified with cork granulates." Composites science and technology **64**(13): 2197-2205.

⁸⁴ Panesar, D. and B. Shindman (2012). "The mechanical, transport and thermal properties of mortar and concrete containing waste cork." Cement and Concrete Composites **34**(9): 982-992.

⁸⁵ Patural, L., P. Marchal, A. Govin, P. Grosseau, B. Ruot and O. Deves (2011). "Cellulose ethers influence on water retention and consistency in cement-based mortars." Cement and Concrete Research **41**(1): 46-55.

⁸⁶ Visakh, P., S. Thomas, K. Oksman and A. P. Mathew (2012). "Crosslinked natural rubber nanocomposites reinforced with cellulose whiskers isolated from bamboo waste: Processing and mechanical/thermal properties." Composites Part A: Applied Science and Manufacturing **43**(4): 735-741.

⁸⁷ Peng, J., M. Chen and J. Zhang (2002). "Study on waste expanded polystyrene as lightweight aggregate for thermal insulating mortar." Journal of Building Materials **5**: 166.

⁸⁸ Babu, K. G. and D. S. Babu (2003). "Behaviour of lightweight expanded polystyrene concrete containing silica fume." Cement and Concrete Research **33**(5): 755-762.

⁸⁹ Wang, R. and C. Meyer (2012). "Performance of cement mortar made with recycled high impact polystyrene." Cement and Concrete Composites **34**(9): 975-981.

⁹⁰ Rebeiz, K. S., A. S. Banko and A. P. Craft (1995). "Thermal properties of polymer mortar using recycled PET and fly ash." Journal of materials in civil engineering **7**(2): 129-133.

Por último, los avances en la utilización de polietilvinilacetato de etilo (copolímero EVA), ponen de manifiesto que este producto reciclado reduce los niveles del ruido al impacto, la permeabilidad y su fisuración por retracción⁹³.

En la Universidad de Burgos, el Grupo de Investigación de Ingeniería de Edificación (GIIE) investiga sobre el diseño de morteros y hormigones con este tipo de residuos poliméricos.

Se ha experimentado la influencia del polvo de poliamida en las propiedades reológicas de pastas de yeso y se está estudiando la influencia en morteros de cemento y cal^{94,95}. También se ha investigado cómo afecta la inclusión de espumas rígidas de poliuretano procedentes de la industria del automóvil y de la fabricación de productos de refrigeración. Estos resultados sugieren que el uso de yeso que contiene este residuo es comparable a la de yeso aligerado con materiales convencionales. Se ha realizado el estudio sobre el efecto que los procesos de envejecimiento tienen sobre las propiedades mecánicas de morteros de albañilería fabricados con cemento Portland, arena, agua y espuma de poliuretano obtenida a partir de residuos industriales^{96,97}.

Otros investigadores estudian la incorporación de áridos reciclados de construcción, sustituyendo la fracción fina por este tipo de residuos, consiguiendo morteros más ligeros⁹⁸. Se estudian las características de los morteros fabricados con residuos de pizarra, gneis, cuernos, granitos,

⁹¹ Mahdi, F., H. Abbas and A. Khan (2010). "Strength characteristics of polymer mortar and concrete using different compositions of resins derived from post-consumer PET bottles." *Construction and Building Materials* **24**(1): 25-36.

⁹² Reis, J. and E. Carneiro (2012). "Evaluation of PET waste aggregates in polymer mortars." *Ibid.* **27**: 107-111.

⁹³ Tutikian, B., M. Nunes, L. Leal and L. Marquette (2012). "Impact sound insulation of lightweight concrete floor with EVA waste." *Building Acoustics* **19**(2): 75-88.

⁹⁴ Gadea, J., M. A. Salas, S. Gutiérrez-González, A. Rodríguez, M. Horgnies and V. Calderón (2013). "Permeability and porosity on lightweight mortars fabricated with polyamide powder wastes." *Advanced Materials Research* **687**: 527-531.

⁹⁵ Salas, M., J. Gadea, S. Gutiérrez-González, M. Horgnies and V. Calderón (2016). "Recycled polyamide mortars modified with non-ionic surfactant: physical and mechanical strength after durability tests." *Materials and Structures* **49**(8): 3385-3395.

⁹⁶ Gutiérrez-González, S., J. Gadea, A. Rodríguez, C. Junco and V. Calderón (2012). "Lightweight plaster materials with enhanced thermal properties made with polyurethane foam wastes." *Construction and Building Materials* **28**(1): 653-658.

⁹⁷ Junco, C., J. Gadea, A. Rodríguez, S. Gutiérrez-González and V. Calderón (2012). "Durability of lightweight masonry mortars made with white recycled polyurethane foam." *Cement and Concrete Composites* **34**(10): 1174-1179.

⁹⁸ Muñoz-Ruiperez, C., A. Rodríguez, S. Gutiérrez-González and V. Calderón (2016). "Lightweight masonry mortars made with expanded clay and recycled aggregates." *Construction and Building Materials* **118**: 139-145.

cuarcita y serpentina^{99,100}, o se buscan morteros más ligeros aditivados con polvo de residuo de melamina y residuos de poliéster^{101,102}.

Como se observa, son numerosos los esfuerzos en las últimas décadas por impulsar la investigación y el empleo de residuos industriales y escombros de construcción, como materiales alternativos a las materias primas convencionales en el diseño de morteros para albañilería.

2.2.4. Morteros con residuos siderúrgicos

Haciendo referencia únicamente a la utilización de residuos siderúrgicos para morteros de albañilería, en líneas generales se puede afirmar que los morteros confeccionados con escoria negra de Horno Eléctrico de Arco EAF presentan buenas resistencias a compresión y que la durabilidad se ve mejorada con su empleo.

Son importantes las conclusiones aportadas por Losáñez¹⁰³, acerca de la aplicación de escorias blancas LF en morteros de albañilería. En sus investigaciones se determina que las escorias blancas pueden ser utilizadas en la fabricación de morteros de albañilería, ya sea como sustituto del cemento o como árido.

También son alentadores, para el estudio de este tipo de morteros, los resultados obtenidos por Rodríguez^{104,105} y Prieto^{106,107}, respecto de

⁹⁹ Gadea, J., J. Soriano, A. Martín, P. Campos, A. Rodríguez, C. Junco, I. Adán and V. Calderón (2010). "The alkali-aggregate reaction for various aggregates used in concrete." Materiales de Construcción **60**(299): 69-78.

¹⁰⁰ Campos, P., J. Gadea, J. Soriano, A. Martín and V. Calderón (2010). "Alkali-silica and alkali-silicate reactivity in slates." Estudios Geológicos-Madrid **66**(1): 91-98.

¹⁰¹ Rodríguez, A., V. Calderón, S. Gutierrez, J. Gadea, J. Garabito and C. Junco (2013). "Manufacture of Masonry Mortars with Melamine Powder Waste and Melamine Paper from the Manufacture of Agglomerated Particle Boards." Advanced Materials Research **687**: 538-543.

¹⁰² Rodríguez, A., P. L. Campos, J. Garabito, J. García and I. Santamaría (2015). "Manufacture of high-performance concrete made with powdered polyester resin waste and carboxylic-ester based superplasticizer." Ibid. **1129**: 523-529.

¹⁰³ Manso, J. M., M. Losáñez, J. A. Polanco and J. J. Gonzalez (2005). "Ladle furnace slag in construction." Journal of materials in civil engineering **17**(5): 513-518.

¹⁰⁴ Rodríguez, Á., J. M. Manso, Á. Aragón and J. J. Gonzalez (2009). "Strength and workability of masonry mortars manufactured with ladle furnace slag." Resources, conservation and recycling **53**(11): 645-651.

¹⁰⁵ Manso, J. M., Á. Rodríguez, Á. Aragón and J. J. Gonzalez (2011). "The durability of masonry mortars made with ladle furnace slag." Construction and Building Materials **25**(8): 3508-3519.

¹⁰⁶ Prieto, M. I., A. Cobo, Á. Rodríguez and M. de las Nieves González (2014). "The efficiency of surface-applied corrosion inhibitors as a method for the repassivation of corroded reinforcement bars embedded in ladle furnace slag mortars." Construction and building materials **54**: 70-77.

morteros de albañilería fabricados con escoria blanca de Horno Cuchara y los otros componentes convencionales, tales como arena, cemento y aditivos.

Otros estudios se ocupan de las propiedades de una serie de yesos que contienen diferentes proporciones de escoria blanca de Horno Cuchara LF como agregado mineral¹⁰⁸. Los resultados ponen de manifiesto una disminución de la adhesión, durabilidad y resistencia mecánica, proporcionalmente a la cantidad de yeso sustituido por escoria.

Las investigaciones más recientes en esta materia estudian la utilización de los residuos siderometalúrgicos conjuntamente, escoria negra EAF y escoria blanca LF, obteniendo morteros técnicamente viables para su uso en la construcción^{109,110}. Estos morteros presentan buen comportamiento a la absorción de agua por capilaridad y permeabilidad, además de conseguir buenos resultados de durabilidad a largo plazo, para las mezclas con más cantidad de árido siderúrgico^{111,112}.

2.3. MORTEROS DE CAL

El hombre ha empleado la cal como conglomerante desde la más remota antigüedad a partir de la calcinación de rocas carbonatadas, muy abundantes en la corteza terrestre. Actualmente, la necesidad de rehabilitar y restaurar obras monumentales antiguas con materiales originales¹¹³, ha hecho resurgir de nuevo los morteros hechos a base de cal.

¹⁰⁷ Prieto, M., A. Cobo, A. Rodríguez and V. Calderón (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**: 188-194.

¹⁰⁸ Rodríguez, A., S. Gutiérrez-González, M. Horgnies and V. Calderón (2013). "Design and properties of plaster mortars manufactured with ladle furnace slag." *Materials & Design* **52**: 987-994.

¹⁰⁹ Santamaría-Vicario, I., A. Rodríguez, S. Gutiérrez-González and V. Calderón (2015). "Design of masonry mortars fabricated concurrently with different steel slag aggregates." *Construction and Building Materials* **95**: 197-206.

¹¹⁰ Santamaría, A., E. Rojí, M. Skaf, I. Marcos and J. J. González (2016). "The use of steelmaking slags and fly ash in structural mortars." *Ibid.* **106**: 364-373.

¹¹¹ Santamaria-Vicario, I., A. Rodriguez-Saiz, J. Garcia-Cuadrado, C. Junco-Petrement and S. Gutierrez-Gonzalez (2017). "The influence of porosity on the behaviour in humid environments of mortars made with steelmaking slags and additives." *DYNA* **92**(2): 220-225.

¹¹² Santamaría-Vicario, I., A. Rodríguez, C. Junco, S. Gutiérrez-González and V. Calderón (2016). "Durability behavior of steelmaking slag masonry mortars." *Materials & Design* **97**: 307-315.

¹¹³ Robador, M., F. Arroyo and J. Perez-Rodriguez (2014). "Study and restoration of the Seville City Hall façade." *Construction and Building Materials* **53**: 370-380.

En la Norma Europea UNE-EN 459-1 "Cales para la construcción. Parte 1: Definiciones, especificaciones y criterios de conformidad"¹¹⁴, se define la cal como "Óxido de calcio y/o hidróxido de calcio, y óxido de calcio y magnesio y/o hidróxido de calcio y magnesio, producido por la descomposición térmica (calcinación) del carbonato de calcio natural (por ejemplo: caliza, creta, conchas) o del carbonato de calcio y magnesio natural (por ejemplo: caliza dolomítica, dolomita)".

En la misma norma se determinan dos grandes grupos de cales para construcción: la cal aérea y la cal con propiedades hidráulicas, utilizadas ambas en construcción, edificación e ingeniería civil.

De acuerdo con el concepto de mortero definido en el apartado anterior, el mortero de cal estará compuesto por cal aérea o hidráulica como conglomerante, áridos y agua.

2.3.1. Reseña histórica de los morteros de cal

La cal y el mortero de cal están datados en el comienzo de la historia del hombre tras el descubrimiento del fuego, cuando se observó cómo las piedras calizas utilizadas para confinar el fuego se desintegraban en unos trozos blancos y que, tras la lluvia, estos formaban una pasta blanca que endurecía al aire. El primer dato histórico conocido del uso de la cal es la Máscara de Jericó (7.000 a.C.)¹¹⁵.

Algunos investigadores piensan que la calcinación de la caliza en el neolítico fue la primera aplicación del fuego con usos concretos. De esta época data el primer horno de cal encontrado y un pavimento duro de mortero de cal con una superficie cuidadosamente pulida en Yiftah (Galilea)¹¹⁶.

Puede afirmarse que el empleo de la cal propiamente dicho corresponde a los griegos y romanos. La utilización del mortero de cal en Grecia para la construcción de muros es muy posterior, finales del siglo II o principios de siglo I a.C. (casas de Délos y Théra)⁶². Los romanos aplicaron el uso del mortero de cal en construcciones como el Panteón, el Coliseo y el Acueducto de Segovia. Con el paso del tiempo, la utilización de morteros como forma de unión entre piezas de ladrillo o piedra se convirtió en la

¹¹⁴ AENOR (2011). "UNE-EN 459-1. Cales para la construcción. Parte 1: Definiciones, especificaciones y criterios de conformidad". Madrid, Aenor.

¹¹⁵ Malinowski, R. and Y. Garfinkel (1991). "Prehistory of concrete." *Concrete International* **13**(3).

¹¹⁶ Gourdin, W. H. and W. D. Kingery (1975). "The beginnings of pyrotechnology: Neolithic and Egyptian lime plaster." *Journal of Field Archaeology* **2**(1-2): 133-150.

⁶² Furlan, V. and P. Bissegger (1975). *Les mortiers anciens. Histoire et essais d'analyse scientifique*, na.

técnica más utilizada, lo que conllevó la invención del mortero de cal hidráulica¹¹⁷.

A partir de la Edad Media los morteros de cal¹¹⁸ evolucionan muy poco y entran prácticamente en desuso hasta el Renacimiento Italiano, momento en el que se vuelven a utilizar como revestimientos de exteriores de gran colorido.

En el Siglo XVIII, Joseph Black y Lavoisier aportan la primera explicación científica de la calcinación de la caliza para la producción de la cal, y en el siglo XIX se estudian la mayoría de las características fundamentales de las cales por científicos franceses, como Debray, Le Chatelier y Vicat. En este mismo siglo, con la aparición del cemento Portland, la cal dejó de utilizarse de forma generalizada⁶³.

2.3.2. La cal

Las rocas calizas y las dolomías puras han sido siempre la materia empleada para la obtención de cal aérea, debido a su elevada concentración de CaCO_3 , cuanto mayor sea la pureza y, por lo tanto, mayor la concentración de dicho compuesto, mejor producto final se obtendrá. Para la producción de cales hidráulicas se emplean además mezclas de margas y arcillas ricas en sílice, aluminio y hierro¹¹⁹.

Sin embargo, cualquier roca con alta riqueza en carbonato cálcico podría servir como materia prima destinada a la producción de cal⁵⁹. Además, para la obtención de carbonato cálcico, se ha empleado a lo largo de la historia otros elementos como el mármol, u otras materias primas no rocosas como conchas de moluscos y otros animales marinos¹²⁰.

2.3.2.1. Tipos de cal

La Figura 2.4 recoge el esquema de los diferentes tipos de cal de construcción y su designación, empleados en obras de edificación y de ingeniería civil.

¹¹⁷ Malinowski, R. (1982). "Ancient mortars and concretes: Aspects of their durability." History of Technology London 7: 89-100.

¹¹⁸ Robador, M. D. and J. L. Pérez-Rodríguez (2015). "Analysis, diagnosis, consolidation and water repellent treatment of the Burgos Cathedral stone." European Journal of Science and Theology 11(5): 285-296.

⁶³ Ashurst, J. (1984). Mortars, plasters and renders in conservation, Ecclesiastical architects' and surveyors' association.

¹¹⁹ García, O., A. Fernandez, F. Azconegui, M. Martín, P. Cascos and A. Díaz (1998). Guía práctica de la cal y el estuco. León, Editorial de los Oficios.

⁵⁹ Garate Rojas, I. (2002). Artes de la Cal, Instituto español de Arquitectura, Madrid.

¹²⁰ Müller, U. and M. I. C. Kanan (2005). "The micro structure of traditional brazilian lime plasters - The custom house of florianopolis." MA Cincotto, DA da Silva, J. de Oliveira, Figura 25.

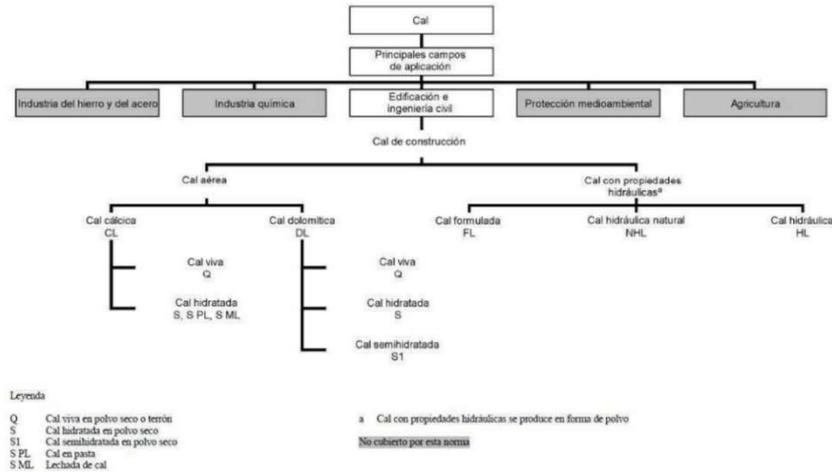


Figura 2.4 Esquema de los tipos de cal y de los campos de aplicación. (AENOR).

La cal para construcción puede dividirse en dos grandes grupos¹¹⁴:

Cal aérea: es aquel tipo de cal que se combina y endurece con el dióxido de carbono presente en el aire. Esta cal no tiene propiedades hidráulicas. La forma en que se presenta la cal aérea puede ser como cal viva (compuesta principalmente por óxido de cal (CaO) y con capacidad para reaccionar de manera exotérmica cuando entra en contacto con el agua) o como cal hidratada (compuesta principalmente por hidróxido de calcio (Ca (OH)₂) y obtenida tras el proceso de apagado de la cal viva de un modo controlado).

Se divide en cal cálcica (CL), que es aquella que está constituida por óxido de calcio, hidróxido de calcio o una mezcla de ambos compuestos y en la que no existe ninguna adición hidráulica o puzolánica, y cal dolomítica (DL) aquella que está principalmente constituida por óxidos cálcicos y magnésicos, por hidróxido cálcicos y magnésicos o por una mezcla de dichos óxidos e hidróxidos.

Cal hidráulica: cal con propiedades hidráulicas, se define como la cal de construcción principalmente constituida por hidróxido de calcio, silicatos de calcio y aluminatos de calcio. Tiene la propiedad de fraguar y endurecer cuando es mezclada con agua y/o bajo el agua y su reacción con el dióxido de carbono (CO₂) del aire forma parte del proceso de endurecimiento.

Dentro de este tipo se encuentra la cal formulada (FL), que está formada por cal aérea y/o cal hidráulica natural, la propia cal hidráulica natural (NHL), con material hidráulico y/o puzolánico añadido, y cal hidráulica (HL),

¹¹⁴ AENOR (2011). "UNE-EN 459-1. Cales para la construcción. Parte 1: Definiciones, especificaciones y criterios de conformidad". Madrid, Aenor.

compuesta por cal y otros materiales que pueden fraguar y endurecer con el agua.

2.3.2.2. Producción y ciclo de la cal

La materia prima caliza se extrae de canteras a cielo abierto. A continuación, se somete a un triturado con el fin de conseguir el tamaño adecuado para el proceso de calcinación. Tras este proceso, las propiedades del CaO obtenido dependerán principalmente de la calidad de las materias primas utilizadas, de la temperatura exacta a la que se produce la calcinación, la duración del proceso añadido del dióxido de carbono que se desprende en la atmósfera del horno durante la calcinación¹²¹.

Este proceso de calcinación alcanza diferentes temperaturas en el horno, dependiendo del momento del proceso:

- Hasta alcanzar 110°C, la materia prima pierde la humedad que tenía en la cantera.
- Aproximadamente a los 700°C, se produce la descomposición de los silicatos de las arcillas.
- A los 900°C, el carbonato cálcico se descompone de acuerdo con la siguiente reacción:



- Superando esta temperatura, desde 1.000°C hasta 1.300°C, se obtendrían cales hidráulicas, produciéndose la reacción del CaO, SiO₂ y el Al₂O₃.

Para su empleo en construcción, el óxido de cal obtenido se somete a un proceso añadido, comúnmente denominado “*apagado de la cal*” y que tiene como objetivo obtener óxido de calcio (CaO) a partir del carbonato cálcico (CaCO₃) presente en las materias primas utilizadas¹²². El apagado se justifica por la inestabilidad que presenta frente al agua (reaccionando exotérmicamente al entrar en contacto con ella y alcanzando temperaturas muy elevadas) y a su reacción con el dióxido de carbono atmosférico.



Finalmente, la cal, ya sea en forma de polvo, pasta o lechada, se mezcla con agua, áridos y demás componentes, para elaborar el mortero. Una vez colocado, se produce un endurecimiento y ganancia de resistencias por fenómenos de carbonatación, perdiendo el agua de amasado por evaporación. Con el transcurso del tiempo, se cierra el ciclo del producto, al

¹²¹ Hassibi, M. (1999). Una perspectiva general del apagado de la cal y los factores que afectan al proceso. 3rd Synopsium Internacional Sorbalit.

¹²² Cano Guillén, J. J., E. Garzón Garzón and B. Marín Valiño (2000). La cal como aglomerante. Almería, Servicio de Publicaciones de la Universidad de Almería.

captar el CO₂ atmosférico, transformándose de nuevo en un conglomerado calizo (una roca caliza).

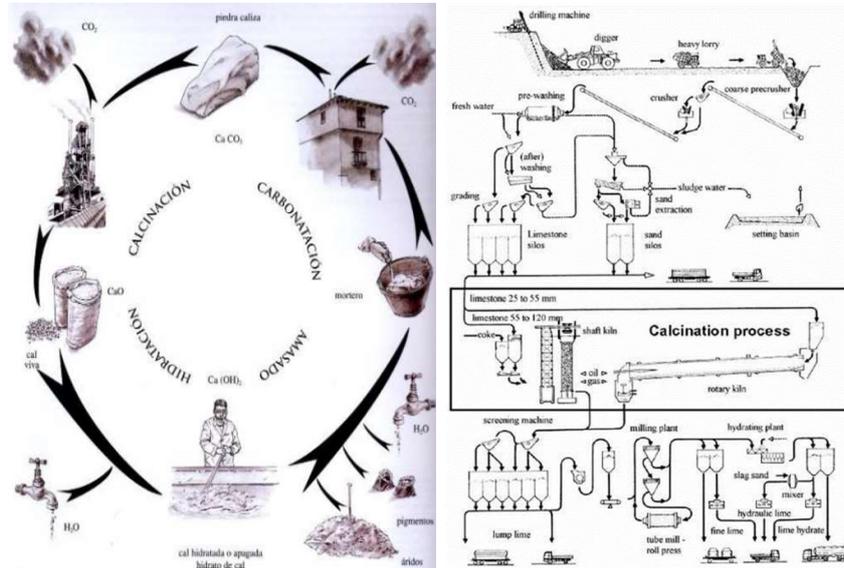


Figura 2.5 Ciclo de la cal (izquierda) (O. García)¹¹⁹ y proceso industrial para la obtención de cal (derecha) (Meier)¹²³.

La Figura 2.5 muestra el esquema del proceso y recoge una síntesis de todo el proceso industrializado convencional.

2.3.3. Morteros de cal con residuos

En los últimos años se han iniciado investigaciones para el estudio y mejora de las propiedades de los morteros de cal, debido al incremento de la actividad de restauración y rehabilitación tanto patrimonial como de edificación residencial^{124,125,126}.

¹¹⁹ García, O., A. Fernandez, F. Azconegui, M. Martín, P. Cascos and A. Díaz (1998). Guía práctica de la cal y el estuco. León, Editorial de los Oficios.

¹²³ Meier, A., N. Gremaud and A. Steinfeld (2005). "Economic evaluation of the industrial solar production of lime." Energy conversion and management **46**(6): 905-926.

¹²⁴ Kirilovica, I., L. Gulbe, I. Vitina and S. Igaune-Blumberga (2015). Chemical Characterization of Lime-Based Binders in Historic Buildings of Latvia. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, IOP Publishing.

¹²⁵ Sala, E., C. Zanotti, C. Passoni and A. Marini (2016). "Lightweight natural lime composites for rehabilitation of Historical Heritage." Construction and Building Materials **125**: 81-93.

¹²⁶ Oliveira, M. A., M. Azenha, P. B. Lourenço, A. Meneghini, E. T. Guimarães, F. Castro and D. Soares (2017). "Experimental analysis of the carbonation and humidity diffusion processes in aerial lime mortar." Ibid. **148**: 38-48.

Para el mantenimiento, la reparación, la rehabilitación o la sustitución de este tipo de morteros en los antiguos edificios patrimoniales, se debe tener en cuenta la preservación de su historia, por lo que la primera opción debe ser siempre su conservación, mantenimiento y reparación. La sustitución total sólo debe considerarse como un último recurso, por lo que se opta por reproducir los viejos morteros mediante técnicas actuales, teniendo en cuenta que la composición de los nuevos morteros diseñados y su prestación deben ser similares, en la medida de lo posible, a los morteros originales.

En ese caso, existen dos soluciones posibles: la reproducción del mortero viejo o la producción de un mortero antiguo. Seguir exclusiva y estrictamente sólo una de las opciones indicadas no siempre es viable, por lo que debe adoptarse una metodología integrada. Se debe tener en cuenta la reproducción de las características funcionales más significativas.

La caracterización de los morteros históricos se ha basado en el análisis químico tradicional. Sin embargo, las investigaciones desarrolladas recientemente permiten incorporar nuevas técnicas de evaluación, como la microscopía electrónica¹²⁷.

De igual forma, se mezcla la cal con el cemento investigando las propiedades de los morteros cal-cemento o bastardos^{128,129}. Con este tipo de morteros se busca garantizar la seguridad estructural de construcciones de mampostería, minimizando el impacto ambiental de las obras.

Precisamente, buscando minimizar el impacto ambiental, también se investiga en la adición o sustitución de varios tipos de residuos en este tipo de morteros a base de cal, estudiando su idoneidad como mortero de restauración.

Entre los subproductos o residuos que más se han encontrado en la búsqueda bibliográfica está el polvo cerámico o el polvo de ladrillos cerámicos triturados. Con esta adición se busca aportar a los morteros de cal la componente puzolánica de la que disponen los morteros de cemento, pero sin la inclusión de este conglomerante. Estas técnicas ya se utilizaban en épocas antiguas en ausencia de puzolana natural, proporcionando cierta hidraulicidad y durabilidad a los morteros de cal^{130,131}.

¹²⁷ Elsen, J. (2006). "Microscopy of historic mortars—a review." Cement and Concrete Research **36**(8): 1416-1424.

¹²⁸ Palomar, I. and G. Barluenga (2017). "Assessment of lime-cement mortar microstructure and properties by P-and S-ultrasonic waves." Construction and Building Materials **139**: 334-341.

¹²⁹ Pineda, P., A. García-Martínez and D. Castizo-Morales (2017). "Environmental and structural analysis of cement-based vs. natural material-based grouting mortars. Results from the assessment of strengthening works." Construction & Building Materials **138**: 528-547.

¹³⁰ Torres, I. and G. Matias (2016). "Sustainable mortars for rehabilitation of old plasters." Engineering Structures **129**: 11-17.

Existen investigaciones que buscan la idoneidad de morteros de cal, con diferentes tipos de aceites de girasol, para la aplicación en restauración, en este caso con la combinación anteriormente mencionada de polvos de residuo de ladrillo. Esta técnica permite obtener morteros con mejores características hidrófobas y mayor durabilidad superficial del mortero endurecido, sin empeorar las resistencias mecánicas¹³².

Otro de los residuos más utilizados para los morteros de cal es el residuo de vidrio. Las altas concentraciones de NaOH pueden dar lugar a la formación de productos de silicato hidratado de calcio, con una composición próxima a tobermorita, que puede proporcionar una resistencia a la compresión moderada de los morteros, evitando además la reacción de la sílice alcalina del vidrio con los componentes del cemento¹³³.

En la búsqueda bibliográfica también se han encontrado estudios que incorporan carbón activo en calcio a morteros fabricados con arroz y cal¹³⁴, o la incorporación de lodos de pintura, reutilizando de este modo un material con alto potencial contaminante debido a las sustancias tóxicas que presenta en su composición. Se consiguen materiales ligeros, con grandes propiedades de aislamiento térmico y acústico¹³⁵. También residuo de mármol triturado en morteros de cal hidráulica, lo que se presenta como una adición puzolánica, que además aporta a los morteros diferentes tonalidades de coloración y pulido superficial¹³⁶.

Los diferentes estudios referidos muestran resultados prometedores, favoreciendo el desarrollo de nuevas soluciones sostenibles para la producción de morteros en base cal.

¹³¹ Navrátilová, E. and P. Rovnaníková (2016). "Pozzolanic properties of brick powders and their effect on the properties of modified lime mortars." Construction and Building Materials **120**: 530-539.

¹³² Pahlavan, P., S. Manzi, M. T. Rodriguez-Estrada and M. C. Bigozzi (2017). "Valorization of spent cooking oils in hydrophobic waste-based lime mortars for restorative rendering applications." *Ibid.* **146**: 199-209.

¹³³ Maraghechi, H., S. Salwocki and F. Rajabipour (2017). "Utilisation of alkali activated glass powder in binary mixtures with Portland cement, slag, fly ash and hydrated lime." Materials and Structures **50**(1): 16.

¹³⁴ Huang, M., B. Huang, S. Lin, B. Huang and Y. Chen (2016). Preparation and performance of calcium-rich activated carbon monolith cemented by sticky rice-lime mortar, *Chemistry and Industry of Forest Products*. **36**(6): 16-22.

¹³⁵ Avci, H., H. Ghorbanpoor, I. B. Topcu and M. Nurbas (2017). "Investigation and Recycling of Paint Sludge with Cement and Lime for Producing Lightweight Construction Mortar." Journal of Environmental Chemical Engineering.

¹³⁶ Xu, S., J. Wang, Q. Jiang and S. Zhang (2016). "Study of natural hydraulic lime-based mortars prepared with masonry waste powder as aggregate and diatomite/fly ash as mineral admixtures." Journal of Cleaner Production **119**: 118-127.

2.3.4. Morteros de cal con residuos siderúrgicos

A pesar de gran cantidad de investigaciones que abordan la utilización de áridos siderúrgicos en morteros de cemento, existen muy pocas referencias bibliográficas de la utilización de los mismos en morteros de cal, o cal-cemento.

Los investigadores Cao y Yang, estudian cómo afecta la escoria de acería a la carbonatación de morteros de cal, obteniendo incrementos en la reacción de carbonatación. Estos mismos investigadores han estudiado el efecto que produce en la resistencia mecánica, la retracción, la absorción de agua y la durabilidad. Observan cómo, después de la carbonatación, aumenta la resistencia del mortero y su durabilidad, mientras que la retracción que experimentan estas mezclas tras el secado se reduce¹³⁷.

Otros investigadores han estudiado cómo afecta la adición de escoria de acería a los morteros de cal hidráulica. No encuentran cambios en propiedades como el contenido de aire o la absorción de agua, pero sí muestran diferencias en las propiedades físicas y en la mejora del tiempo de fraguado de las mezclas¹³⁸.

Las pocas investigaciones sobre el uso de la escoria en este tipo de morteros hacen que pueda considerarse un campo interesante para su estudio, objetivo que se propone en el desarrollo de esta Tesis Doctoral.

2.4. ANTECEDENTES Y OBJETIVOS

2.4.1. Antecedentes

La Tesis Doctoral pretende avanzar en la aplicación de escoria, tanto blanca como negra, en el campo de la construcción y obra civil. De este modo es una continuación a una serie de trabajos de investigación realizados en esta misma línea.

La Dra. Luciana Amaral de Lima comenzaba con estas investigaciones en 1999 en su Tesis "*Hormigones con escorias de horno eléctrico de arco como áridos: propiedades, durabilidad y comportamiento ambiental*"¹³⁹.

¹³⁷ Cao, W. and Q. Yang (2014). "Properties of a Carbonated Steel Slag-Slaked Lime Mixture." *Journal of Materials in Civil Engineering* **27**(1): 04014115.

¹³⁸ Cho, J.-S., K.-Y. Moon, M.-K. Choi, K.-H. Cho, J.-W. Ahn and K.-S. Yeon (2017). "Performance improvement of local Korean natural hydraulic lime-based mortar using inorganic by-products." *Korean Journal of Chemical Engineering* **34**(5): 1385-1392.

¹³⁹ Amaral De Lima, L. (1999). *Hormigones con escorias de horno eléctrico como áridos: propiedades, durabilidad y comportamiento ambiental*, Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona.

En 2001 el Dr. Juan Manuel Manso Villalain, en su Tesis Doctoral "*Fabricación de hormigones hidráulicos con escoria negra de Horno Eléctrico de Arco*"¹² estudia:

- Caracterización física y estructural de la escoria negra EAF.
- Preparación de morteros con escoria negra.
- Fabricación de hormigones hidráulicos.
- Durabilidad y comportamiento medioambiental.

Posteriormente, en 2005, la Dra. Milagros Losáñez González en su Tesis Doctoral "*Aprovechamiento integral de escorias blancas y negras de acería eléctrica en construcción y obra civil*"¹⁴⁰, plantea investigaciones similares basadas fundamentalmente en la escoria blanca LF. De este modo, sus cuatro líneas de investigación abarcan:

- Caracterización física y estructural de la escoria blanca LF.
- Fabricación de morteros de albañilería y estudio de sus propiedades.
- Elaboración de firmes de pavimentación de caminos rurales.
- Aplicación en hormigones hidráulicos.

El cuarto paso en esta línea de investigación se da en 2008 de la mano del Dr. Ángel Rodríguez con su Tesis Doctoral "*Fabricación de morteros de albañilería con escoria blanca de horno cuchara y su utilización en construcción*"¹⁴¹, quien trata de pormenorizar en las aplicaciones referidas en ambas investigaciones anteriores.

El objetivo final de su Tesis Doctoral pretende el diseño de dosificaciones comerciales de morteros de albañilería, buscando una aplicación práctica de la escoria blanca de Horno Cuchara LF. De este modo, las líneas que propone se resumen en:

- Caracterización física y estructural de la escoria blanca de Horno Cuchara LF.
- Diseño de dosificaciones comerciales de morteros de albañilería fabricados con escoria blanca de Horno Cuchara LF.
- Estudio comparativo de las propiedades de los morteros de albañilería fabricados con escoria blanca y los morteros fabricados con materiales tradicionales.

¹² Manso, J. M. (2001). "Fabricación de hormigón hidráulico con escoria negra de Horno Eléctrico de Arco", Tesis doctoral, Universidad de Burgos, España.

¹⁴⁰ Losáñez González, M. (2005). Aprovechamiento integral de escorias blancas y negras de acería eléctrica en construcción y obra civil, Tesis Doctoral, Universidad del País Vasco, España.

¹⁴¹ Rodríguez, A. (2008). Fabricación de morteros de albañilería con escoria blanca de horno cuchara y su utilización en construcción, Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Burgos, España.

- Estudio económico de la utilización de la escoria blanca en la fabricación de morteros y ventajas competitivas.

Entre los trabajos más recientes que continúan en esta línea de investigación encontramos en 2011 la Tesis Doctoral de la Dra. Vanesa Ortega, *“Aprovechamiento de escorias blancas (LFS) y negras (EAFS) de acería eléctrica en la estabilización de suelos y en capas de firmes de caminos rurales”*¹⁴² la cual está vertebrada en dos líneas de investigación:

- Aprovechamiento integral de las escorias blancas LF y negras EAF en la estabilización de suelos arcillosos de mala calidad.
- Planteamiento de opciones para la utilización de escorias negras en la formación de capas de firmes rurales.

También en 2011 la Dra. Idoia Arribas García investiga la incorporación de escorias negras en hormigones estructurales, en su Tesis Doctoral *“Estudio y diseño de hormigones estructurales basados en la incorporación de subproductos siderúrgicos: viabilidad tecnológica”*¹⁴³.

En la Tesis Doctoral *“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”* de la Dra. María Isabel Prieto Barrio en 2012¹⁴⁴, se estudia el comportamiento a corrosión, de barras de acero de armar embebidas en probetas de mortero, en las que se ha sustituido parcialmente el árido y el cemento por escorias blancas de horno cuchara LF, mediante técnicas electroquímicas y gravimétricas.

La Dra. Isabel Santamaría-Vicario con su Tesis Doctoral *“Fabricación de morteros de albañilería con escoria negra de horno eléctrico de arco EAF y escoria blanca de horno de cuchara LF”*¹⁴⁵ en 2015, estudia la utilización de los residuos siderúrgicos simultáneamente. Sus líneas de investigación pueden resumirse en los siguientes apartados:

- Conocimiento de la industria que genera residuos de escoria negra EAF y blanca LF, volumen de residuos generados y gestión de los mismos.

¹⁴² López, V. O. (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, Tesis doctoral, Universidad de Burgos, España.

¹⁴³ Arribas García, I. (2011). Estudio y diseño de hormigones estructurales basados en la incorporación de subproductos siderúrgicos: viabilidad tecnológica, Tesis Doctoral, Universidad del País Vasco, España.

¹⁴⁴ 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, Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, España.

¹⁴⁵ Santamaría-Vicario, I. (2015). Fabricación de morteros de albañilería con escoria negra de horno eléctrico de arco EAF y escoria Blanca de horno de cuchara LF, Tesis doctoral, Universidad de Burgos, España.

- Caracterización de las propiedades de morteros con escoria blanca y negra.
- 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.

Por último, en el año 2016 se producen nuevas aportaciones con la Tesis Doctoral del Dr. José Antonio de la Fuente de título "*Comportamiento del hormigón con áridos siderúrgicos (EAF) reforzado con fibras*"¹⁴⁶ y de la Dra. Marta Skaf de título "*Efectos de la incorporación de escorias de acería a mezclas bituminosas drenantes*"¹⁴⁷.

Todos ellos, concluyen en sus investigaciones que los residuos siderúrgicos, tanto la escoria negra como la escoria blanca, pueden ser utilizados en la estabilización de suelos y como árido grueso y fino en la dosificación de hormigones estructurales y morteros para albañilería, entre otras aplicaciones.

Como continuación a estos estudios, esta Tesis Doctoral desarrolla la investigación de morteros de albañilería elaborados con escoria negra EAF y blanca LF, incorporando o utilizando la cal, un conglomerante en desuso actualmente, pero con potenciales aplicaciones y usos en la restauración de edificios históricos.

2.4.2. Objetivos

Este trabajo pretende aportar soluciones para gestionar la reutilización y reciclaje de las escorias blancas de Horno Cuchara LF y de la escoria negra de Horno Eléctrico de Arco EAF, y propone aplicaciones útiles y viables desde un punto de vista técnico, económico, energético, medioambiental y logístico.

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

- Caracterización en estado fresco y estado endurecido de morteros bastardos y de cal con áridos siderúrgicos.
- Comprobar la viabilidad de aplicación del Método de Análisis Mediante Superficies de Respuesta al estudio de las Resistencias Mecánicas de los morteros bastardos.

¹⁴⁶ De la Fuente Alonso, J. A. (2016). Comportamiento del hormigón con áridos siderúrgicos (EAF) reforzado con fibras, Tesis doctoral, Universidad de Burgos, España.

¹⁴⁷ Skaf Revenga, M. (2016). Efectos de la incorporación de escorias de acería a mezclas bituminosas drenantes, Tesis doctoral, Universidad de Burgos, España.

- Conseguir un producto que cumpla con las exigencias normativas de carácter técnico, utilizando escorias de acería en sustitución de los áridos tradicionales.
- Desde el punto de vista económico, se pretende encontrar un producto que suponga una innovación tecnológica, al utilizar un residuo industrial que no se aprovecha y que origina un importante impacto ambiental en las zonas próximas a los centros de producción de acero.

Así mismo, y atendiendo a los objetivos que especifica el Programa Horizonte 2020 en el documento “*Climate action, environment, resource efficiency and raw materials*”¹⁴⁸, para sus años de trabajo 2016 y 2017, esta Tesis Doctoral pretende conseguir:

- Encontrar alternativas al uso de las materias primas, aumentando su disponibilidad. En este caso, buscando alternativas al uso de áridos naturales.
- Promocionar una “*economía circular*” de las materias primas, cerrando los ciclos de consumo con un reaprovechamiento de los residuos industriales, evitando en lo posible la “*economía lineal*” basada en el proceso de obtención – fabricación – consumo – desecho.

Cumpliendo estas premisas se busca:

- 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 cal y bastardos, con buenas prestaciones resistentes y de durabilidad.
- Aportar una salida comercial a los residuos de la industria siderúrgica, aportándoles valor y elaborando un producto apto como material de construcción.
- Reducir la acumulación en vertederos de la escoria y, a la vez, evitar la explotación de canteras de árido natural, minimizando el impacto ambiental.

¹⁴⁸ Duić, N. (2015). Configuration-'Climate action, environment, resource efficiency and raw materials'. 6th PC meeting for the Specific Programme implementing Horizon 2020.

CAPITULO III

Metodología



3. METODOLOGÍA

En el tercer apartado de la Tesis Doctoral se presenta el proceso experimental seguido, describiendo los ensayos físicos y químicos realizados para conocer las propiedades de las materias primas utilizadas en la investigación, su estructura interna y composición química.

Se hace una descripción de los ensayos de caracterización de los morteros objeto de estudio, diferenciando sus propiedades en la fase de mezcla de los componentes (estado fresco) y una vez concluido el fraguado y endurecimiento del cemento o la carbonatación de la cal (estado endurecido)¹⁴¹.

Aunque el estado fresco y endurecido del mortero son "*fases de estado*" con propiedades diferentes, ambos están interrelacionados entre sí, ya que la dosificación, su rendimiento, la forma de mezclar los componentes o la utilización de aditivos, van a condicionar las propiedades y prestaciones del mortero una vez fraguado y endurecido¹⁴⁹.

Por último, se describen también los ensayos de durabilidad que permiten evaluar el comportamiento del material con el paso del tiempo, de acuerdo con su naturaleza y propiedades, también conocidos como "*ensayos de envejecimiento acelerado*".

Para el desarrollo del Diseño de Experimentos se utiliza la técnica de estudio Métodos de Superficie de Respuesta (*RSM - Response Surface Methods*) con componente experimental y analítica, mediante el desarrollo de una serie de experimentos secuencialmente diseñados.

3.1. DEFINICIÓN DEL DISEÑO DE EXPERIMENTOS

El Diseño de Experimentos es una técnica que se fundamenta en el diseño de una serie de experimentaciones de forma que, con el mínimo número de pruebas, se consiga extraer información útil para observar e identificar las razones de cambio en las variables de salida o respuesta del proceso, y de esta manera, poder diseñar las condiciones ideales de un producto, proceso o servicio.

Dentro de la herramienta de Diseño de Experimentos existen varias funciones, como el Diseño Factorial Completo y el Diseño de Superficies de Respuesta, de aplicación en el presente estudio.

¹⁴¹ Rodríguez, A. (2008). Fabricación de morteros de albañilería con escoria blanca de horno cuchara y su utilización en construcción, Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Burgos, España.

¹⁴⁹ Valdehita Roselló, M. T. (1976). Morteros de cemento para albanilería, Patronato de Investigación Científica y Técnica "Juan de la Cierva" del Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Instituto Eduardo Torroja de la Construcción y del Cemento.

El Método de Superficie de Respuesta es una herramienta para el modelado y optimización de un proceso con varias variables que afectan a la respuesta de interés. Este método incluye un conjunto de técnicas estadísticas y matemáticas, y tiene algunas ventajas si se compara con los métodos de análisis tradicionales factoriales.

Se emplea generalmente para examinar la relación entre la variable de respuesta y un conjunto de variables cuantitativas o factores experimentales. Este tipo de diseños son frecuentemente solicitados cuando se intuye que existe curvatura en la superficie de respuesta.

El ajuste y análisis de una superficie de respuesta se facilita con la elección apropiada del diseño de experimentos. La elección de un diseño adecuado es fundamental para modelar y explorar la superficie de respuesta.

Si el modelo es una representación adecuada de la respuesta real, entonces el diseño elegido para estimar los parámetros debe proporcionar valores razonables de la respuesta sobre la región de interés.

El Diseño Central Compuesto (*CCD - Composite Central Design*) es el diseño RSM más comúnmente utilizado, el cual es capaz de disminuir el número de experimentos y predecir de igual modo el posible efecto no lineal de cada parámetro y las posibles interacciones entre ellos¹⁵⁰.

Otros autores han utilizado satisfactoriamente el CCD obteniendo datos del diseño de experimentos y el análisis de los resultados con otros compuestos^{151,152,153,154,155}.

En el ámbito de la construcción se han aplicado al estudio del comportamiento de las soldaduras de estructuras metálicas^{156,157}, a la

¹⁵⁰ Angelopoulos, P., H. Evangelaras and C. Koukouvinos (2009). "Small, balanced, efficient and near rotatable central composite designs." Journal of Statistical Planning and Inference **139**(6): 2010-2013.

¹⁵¹ Naceur, H., S. Ben-Elechi, J. Batoz and C. Knopf-Lenoir (2008). "Response surface methodology for the rapid design of aluminum sheet metal forming parameters." Materials & Design **29**(4): 781-790.

¹⁵² Cuesta, I., M. Lorenzo and J. Alegre (2014). "Response surface application for estimating failure time and other creep properties using the Small Punch Creep Test." Engineering Failure Analysis **45**: 49-58.

¹⁵³ Gupta, V. K., S. Agarwal, M. Asif, A. Fakhri and N. Sadeghi (2017). "Application of response surface methodology to optimize the adsorption performance of a magnetic graphene oxide nanocomposite adsorbent for removal of methadone from the environment." Journal of Colloid and Interface Science **497**: 193-200.

¹⁵⁴ Babaki, M., M. Yousefi, Z. Habibi and M. Mohammadi (2017). "Process optimization for biodiesel production from waste cooking oil using multi-enzyme systems through response surface methodology." Renewable Energy **105**: 465-472.

¹⁵⁵ Saad, M. and H. Tahir (2017). "Synthesis of carbon loaded γ -Fe₂O₃ nanocomposite and their applicability for the selective removal of binary mixture of dyes by ultrasonic adsorption based on response surface methodology." Ultrasonics Sonochemistry **36**: 393-408.

optimización de dosificaciones de hormigón^{158,159}, en el estudio de morteros de albañilería^{160,161} y a los procesos de envejecimiento de los pavimentos asfálticos¹⁶².

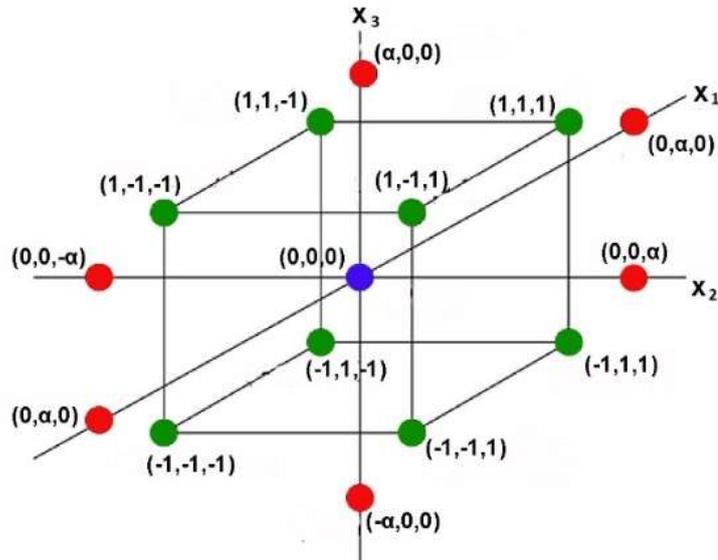


Figura 3.1 Representación de la matriz de experimentación según las variables codificadas.

- ¹⁵⁶ Srivastava, S. and R. Garg (2017). "Process parameter optimization of gas metal arc welding on IS: 2062 mild steel using response surface methodology." *Journal of Manufacturing Processes* **25**: 296-305.
- ¹⁵⁷ Safeen, W., S. Hussain, A. Wasim, M. Jahanzaib, H. Aziz and H. Abdalla (2016). "Predicting the tensile strength, impact toughness, and hardness of friction stir-welded AA6061-T6 using response surface methodology." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **87**(5-8): 1765-1781.
- ¹⁵⁸ Alyamac, K. E., E. Ghafari and R. Ince (2017). "Development of eco-efficient self-compacting concrete with waste marble powder using the response surface method." *Journal of Cleaner Production* **144**: 192-202.
- ¹⁵⁹ Rezaifar, O., M. Hasanzadeh and M. Gholhaki (2016). "Concrete made with hybrid blends of crumb rubber and metakaolin: Optimization using Response Surface Method." *Construction and Building Materials* **123**: 59-68.
- ¹⁶⁰ García-Cuadrado, J., A. Rodríguez, I. Cuesta, V. Calderón and S. Gutiérrez-González (2017). "Study and analysis by means of surface response to fracture behavior in lime-cement mortars fabricated with steelmaking slags." *Construction & Building Materials* **138**: 204-213.
- ¹⁶¹ Mtarfi, N., Z. Rais, M. Taleb and K. Kada (2016). "Effect of fly ash and grading agent on the properties of mortar using response surface methodology." *Journal of Building Engineering* **127**: 59-68.
- ¹⁶² Chávez-Valencia, L., C. Hernández-Barriga and A. Manzano-Ramírez (2011). "Pavement aging model by response surface modeling." *Ingeniería, investigación y tecnología* **12**(4): 373-382.

Para ajustarse al modelo matemático, las principales características de este diseño son:

- La utilización de tres factores.
- Matriz de experimentos con tres niveles para cada factor, como se puede comprobar en la Figura 3.1.
- Codificación de los intervalos de valores de los tres factores en la Tabla 3.1, para que varíen en [-1,1], según la Ecuación 3.2.
- Utilización de un modelo cuadrático definido por la Ecuación 3.1, para el ajuste de la superficie de respuesta de cada Coeficiente de Regresión o Restitución.
- La superficie de respuesta permitirá estimar el comportamiento de cualquier punto codificado dentro del cubo definido por los extremos.

En este estudio se utiliza el software estadístico Minitab® versión 17.1.0 (Stat Soft Inc., Tulsa, EE. UU.) para el análisis de diseño y procesamiento de datos. Este software es un programa informático específicamente diseñado para ejecutar funciones estadísticas¹⁶³.

Los valores reales de los parámetros tienen que ser previamente codificados, por lo que todos ellos varían dentro de los mismos intervalos, favoreciendo de esta manera la estimación precisa de los coeficientes que definen la función (Ecuación 3.1). El programa utiliza la tipología CCD K³, en la que los parámetros analizados se codifican dentro de una gama de valores comprendida entre [-1,1], donde:

-1: indica bajos niveles del factor.

0: indica el punto intermedio entre los niveles bajos y el nivel más alto.

1: indica altos niveles del factor.

α : indica, en unidades codificadas, la ubicación de los puntos axiales en el diseño.

Estos parámetros x_1 , x_2 y x_3 son los que van a gobernar la superficie de respuesta. La relación existente entre estos parámetros y la superficie de respuesta se puede expresar como $f(x_1^*, x_2^*, x_3^*)$, donde f se postula como modelo cuadrático donde x_1^* , x_2^* y x_3^* son las variables codificadas de x_1 , x_2 y x_3 respectivamente.

Ecuación 3.1

$$f(x_1^*, x_2^*, x_3^*) = b_0 + b_1 \cdot x_1^* + b_2 \cdot x_2^* + b_3 \cdot x_3^* + b_{11} \cdot x_1^{*2} + b_{22} \cdot x_2^{*2} + b_{33} \cdot x_3^{*2} + b_{12} \cdot x_1^* \cdot x_2^* + b_{13} \cdot x_1^* \cdot x_3^* + b_{23} \cdot x_2^* \cdot x_3^*$$

¹⁶³ Rostamiyan, Y., A. Fereidoon, M. Rezaeiashtiyani, A. H. Mashhadzadeh and A. Salmankhani (2015). "Experimental and optimizing flexural strength of epoxy-based nanocomposite: Effect of using nano silica and nano clay by using response surface design methodology." *Materials & Design* **69**: 96-104.

Para cualquier valor real X_i de los parámetros variables dicha codificación se puede realizar a través de la expresión (Ecuación 3.2) obteniendo el valor codificado x_i correspondiente. Donde X_{iNInf} es el valor real del nivel más bajo del factor i , X_{iNSup} es el valor real del nivel más alto del factor i , y \bar{X}_i , es la media entre los valores reales del nivel más alto y más bajo del factor i .

$$i = [x_1^*, x_2^*, x_3^*]$$

Ecuación 3.2

$$x_i = \frac{2 \cdot 1 (X_i - \bar{X}_i)}{X_{iNSup} - X_{iNInf}}$$

En la Tabla 3.1 se muestra la Matriz de Experimentos con las variables codificadas:

Matriz de experimentos (Variables codificadas)			
N.º Experimento	x_1^*	x_2^*	x_3^*
1	-1	-1	-1
2	1	-1	-1
3	-1	1	-1
4	1	1	-1
5	-1	-1	1
6	1	-1	1
7	-1	1	1
8	1	1	1
9	$-\alpha$	0	0
10	α	0	0
11	0	$-\alpha$	0
12	0	α	0
13	0	0	$-\alpha$
14	0	0	α
15	0	0	0

Tabla 3.1 Matriz de experimentos.

Una vez obtenidos todos los valores con la ayuda de Minitab® 17, es posible determinar los coeficientes de regresión ($b_0, b_1, b_2, b_3, b_{11}, b_{22}, b_{33}, b_{12}, b_{13}$ y b_{23}) de la función $f(x_1^*, x_2^*, x_3^*)$, para cada una de las respuestas.

A partir de las funciones $f(x_1^*, x_2^*, x_3^*)$, es posible estimar el valor de la respuesta para cualquier combinación de valores de los parámetros x_1^* , x_2^* y x_3^* , previa codificación, y siempre que se encuentren dentro del dominio cuadrático definido anteriormente para este diseño.

Para la representación de la función $f(x_1^*, x_2^*, x_3^*)$ se utilizan las Gráficas de Superficies de Respuesta (Figura 3.2), en las que basta con bloquear uno de los tres parámetros para poder representar la respuesta en función de los otros dos, por ejemplo, x_1 y x_2 .

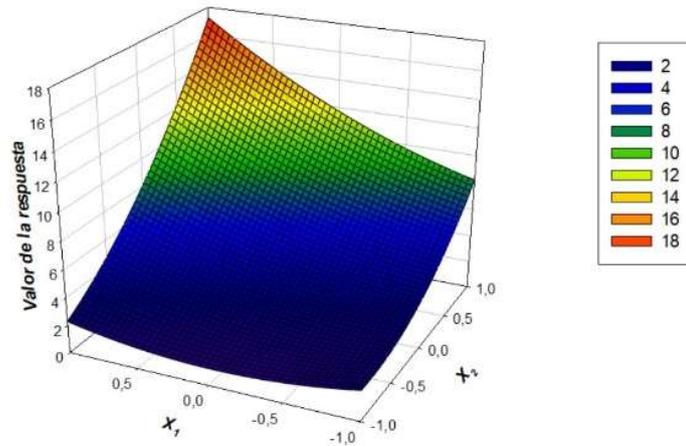


Figura 3.2 Ejemplo de Grafica de Superficie de Respuesta.

Debido a la dificultad para visualizar formas de superficie de respuesta tridimensionales, se utilizan las Gráficas de Contornos de la Superficie (Figura 3.3) en las que se tratan las curvas correspondientes al plano de los dos parámetros x_1 y x_2 , plano cuyos ejes coordenados vienen dados por los niveles x_1 y x_2 de los factores.

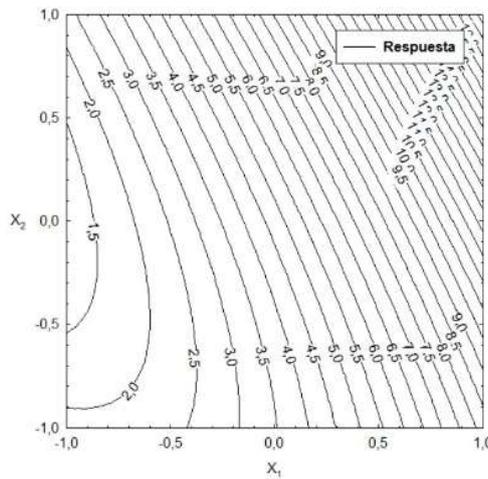


Figura 3.3 Ejemplo de Grafica de Contornos de la Superficie.

La gráfica de contornos resulta útil para estudiar los niveles de los factores, en los que se produce un cambio en la forma o altura de la superficie de respuesta.

3.2. ENSAYOS PARA LAS MATERIAS PRIMAS

En el siguiente subapartado se definen los ensayos físicos y químicos realizados para el análisis de las propiedades de las materias primas, así como los requisitos que marcan las diferentes normas para su utilización.

3.2.1. Granulometría de los áridos

En la *Norma UNE-EN 13139 "Áridos para morteros"*¹⁶⁴ se exponen los requisitos que han cumplir los áridos utilizados en el diseño de morteros, haciendo especial mención a su tamaño.

Los áridos se designan en función de su tamaño, de acuerdo con la referencia: d/D. Donde "d" es la mínima abertura de tamiz que cumple los requisitos generales recogidos en la Tabla 3.2, en función del tamaño del árido y "D" es la máxima abertura de tamiz que cumple los requisitos generales recogidos en la Tabla 3.2, en función del tipo y del tamaño del árido.

Los tamaños habituales de referencia que establece la norma son:

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

Se debe cumplir que el tamaño de los áridos utilizados se tiene que ajustar entre los límites establecidos por la norma, referidos en la Tabla 3.2, salvo en el caso de los usos especiales.

Tamaño de los áridos mm	Límites en porcentaje, en masa, que pasa				
	2 D ^a	Límites superiores		Límites inferiores	
		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 3.2 Límites superior e inferior de tamaño de árido. (AENOR).

Para determinar el filler del árido, se debe seguir las indicaciones recogidas en la *Norma UNE-EN 933-1 "Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 1: Determinación de la*

¹⁶⁴ AENOR (2003). "UNE-EN 13139 Áridos para morteros". Madrid, Aenor.

*granulometría de las partículas. Método del tamizado*¹⁶⁵. En la Tabla 3.3 se especifican los límites requeridos.

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 3.3 Requisitos granulométricos para el filler del árido. (AENOR).

Finalmente, en la misma norma se hace también referencia al límite del contenido en finos (Tabla 3.4).

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 3.4 Límite del contenido de finos. (AENOR).

La distribución de los distintos tamaños de partículas que integran un árido, expresada como porcentaje en masa que pasa por un conjunto específico de tamices (Figura 3.4), se denomina granulometría del 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”¹⁶⁶ recoge la serie de tamices, de acuerdo con las luces de malla de la siguiente relación:

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

¹⁶⁵ AENOR (2012). "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.

¹⁶⁶ 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.



Figura 3.4 Tamices y máquina de tamizado empleados.

El árido grueso se corresponde con la fracción del material cuyo tamaño $D \geq 4$ mm y $d \geq 2$ mm, mientras que el árido fino es aquel cuyo diámetro nominal $D \leq 4$ mm. Por su parte, el filler del árido es la fracción del material que contiene, al menos un 70% de pasa en el tamiz de 0,063 mm.

3.2.2. Módulo de finura de los áridos

Otra propiedad del árido es el denominado Módulo de Finura (MF) o Módulo Granulométrico del Árido. Este parámetro da una idea del tamaño medio del árido utilizado en el diseño de un mortero.

El Módulo de Finura es la suma de los porcentajes acumulados retenidos (en porcentaje) en los tamices comprendidos entre 4 y 0,125 mm, según la Ecuación 3.3:

Ecuación 3.3

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

3.3. ENSAYOS PARA EL MORTERO EN ESTADO FRESCO

Los ensayos en estado fresco se realizan antes de que el mortero haya perdido parte del agua de amasado y finalice su fraguado y endurecimiento como consecuencia de los procesos simultáneos de carbonatación de la cal y de hidratación del cemento.

3.3.1. Consistencia

El procedimiento utilizado para determinar la consistencia del mortero en estado fresco ha sido el método de la mesa de sacudidas, descrito en la Norma UNE-EN 1015-3: "Métodos de ensayo de los morteros para

*albañilería. Parte 3: Determinación de la consistencia del mortero fresco (por la mesa de sacudidas)*¹⁶⁷.

La norma define la consistencia de una muestra de mortero como: “la medida de la fluidez y humedad de la mezcla del mortero fresco” y da una idea de la deformabilidad del mortero al ser sometido a un determinado tipo de esfuerzo.

De forma resumida y descriptiva, el procedimiento seguido para realizar este ensayo es el siguiente:



Figura 3.5 Mesa de sacudidas y utensilios para el ensayo (izquierda) y molde troncocónico relleno (derecha).

Una vez amasado el mortero, se coloca el molde troncocónico sobre la mesa limpia y se rellena con mortero en dos tongadas, compactando el material con un pisón mediante diez golpes consecutivos (Figura 3.5).

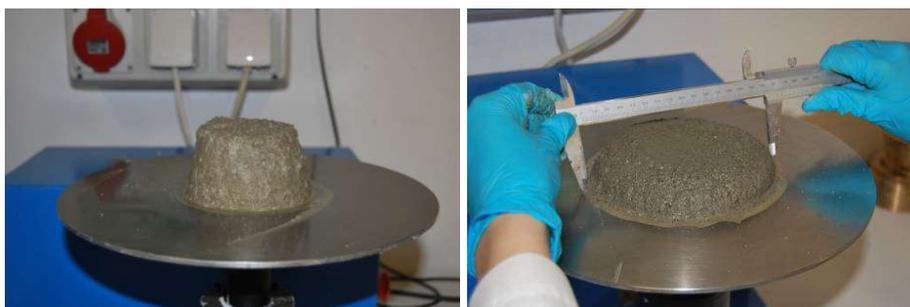


Figura 3.6 Medida del diámetro de la torta de mortero.

Se retira el molde y se somete al mortero depositado a 15 sacudidas consecutivas en 15 segundos, lo que produce su escurrimiento.

¹⁶⁷ 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.

Posteriormente, se mide el diámetro del mortero escurrido en la mesa en dos direcciones perpendiculares. El valor medio se corresponde con el valor del escurrimiento de la muestra estudiada (Figura 3.6).

Los morteros utilizados en esta Tesis se mezclan para obtener una consistencia plástica, de forma que el diámetro de escurrimiento sea de $175 \text{ mm} \pm 10 \text{ mm}$ en todos ellos.

Mediante este ensayo, se consigue determinar la cantidad de agua necesaria para conseguir la consistencia deseada, con unas determinadas características de escurrimiento. Una vez determinado dicho valor, se aplicará la relación agua/conglomerante en el proceso de fabricación de las mezclas, para todos los ensayos de caracterización en los que se va a utilizar el mismo tipo de mortero.

3.3.2. Densidad aparente

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"¹⁶⁸ la densidad aparente del mortero en estado fresco se determina mediante la relación entre la masa de un mortero que ocupa un recipiente de un litro de volumen (tan solo es necesario conocer la masa del mortero una vez lleno el recipiente, obteniendo por relación su densidad).

De forma resumida, el procedimiento seguido para llevar a cabo el ensayo es el siguiente:



Figura 3.7 Molde densidad aparente (Capacidad 1 dm^3). Determinación de la densidad aparente del mortero fresco.

Una vez amasado el mortero, se introduce en el recipiente en dos tongadas. En cada fase de llenado se bascula el recipiente de un lado a otro desde una altura de 30 mm y se deja caer 10 veces. Se completa el volumen enrasando con una regla hasta conseguir una superficie plana y perfectamente nivelada (Figura 3.7).

¹⁶⁸ 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.

Se determina el valor de la densidad aparente del mortero fresco según la Ecuación 3.4:

Ecuación 3.4

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

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)

3.3.3. Contenido de aire ocluido

La referencia para el estudio del aire ocluido contenido en el mortero fresco 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"¹⁶⁹.

Es un ensayo que se fundamenta en colocar una película de agua sobre un volumen de mortero contenido en un recipiente (es el mismo utilizado en el ensayo de determinación de la densidad aparente), y aplicar una presión de aire que fuerza que éste penetre en el interior del mortero, desplazando el aire contenido en los poros.



Figura 3.8 Determinación del aire ocluido.

¹⁶⁹ AENOR (1999). "UNE-EN 1015-7 Métodos de ensayo de los morteros de albañilería. Parte 7: Determinación del contenido de aire en el mortero fresco". Madrid, Aenor.

El dispositivo de análisis (Figura 3.8) está equipado 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.

Se aplica una presión específica, con el aparato herméticamente cerrado, por medio de una bomba manual. La lectura obtenida en el manómetro del equipo se corresponde con el valor del contenido de aire ocluido en el mortero, expresado en tanto por ciento.

3.3.4. Trabajabilidad

Para el cálculo de la trabajabilidad se utiliza 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"¹⁷⁰.

Esta norma define la trabajabilidad como "el tiempo durante el cual un mortero puede ser manipulado sin añadir posteriormente agua" y lo determina mediante el tiempo en minutos en el que el mortero fresco alcanza un límite de resistencia a la penetración de una sonda normalizada, a partir del cual alcanza un límite definido de rigidez o de trabajabilidad.



Figura 3.9 Ensayo para la determinación de la trabajabilidad.

En el ensayo de trabajabilidad se precisan dos recipientes cilíndricos con un diámetro interior de, al menos, 75 mm. y una altura comprendida entre 50 mm y 100 mm. Los recipientes se llenan con el mortero objeto de ensayo en diez etapas, golpeando cuatro veces sobre la mesa de trabajo en cada una, con el propósito de asegurar su perfecta compactación. Una vez llenos los moldes, se enrasan las superficies y se conservan en un

¹⁷⁰ 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.

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 3.9).

Para la obtención de la resistencia a la penetración se coloca el molde 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 esté a una distancia de al menos 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.

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

3.3.5. Retención de agua

Para determinar la retención de agua en el mortero se sigue el procedimiento de la *Norma UNE 83-816-93 EX "Morteros. Métodos de ensayo. Morteros frescos. Determinación de la capacidad de retención de agua"*¹⁷¹.

La muestra se ensayará no antes de 10 minutos ni después de 30 minutos, a partir de la mezcla de sus componentes y posterior amasado, sin realizar ningún amasado adicional antes del ensayo. El proceso seguido en el ensayo es el siguiente:

Se determina el peso conjunto del molde más el vidrio, perfectamente secos y, por separado, de los ocho discos de papel de filtro. Se llena el molde con 10 tomas de material y se enrasa la parte superior.

Se registra el peso del molde, junto con la placa de vidrio y el mortero, y posteriormente se cubre la superficie del mortero con las dos gasas de algodón y los ocho discos de filtro.



Figura 3.10 Procedimiento de ensayo para la determinación de la retención de agua.

¹⁷¹ AENOR (1993). "UNE 83-816-93 EX Morteros. Métodos de ensayo. Morteros frescos. Determinación de la capacidad de retención de agua". Madrid, Aenor.

Se coloca otro vidrio encima y se invierte el molde, retirando el vidrio que queda en la parte superior, y se posiciona una pesa de 2 kg durante 5 minutos, presionando el mortero (Figura 3.10). Transcurridos 5 minutos se retira la pesa y se registra el peso de los 8 discos de papel de filtro.

La cantidad de agua retenida en cada muestra de mortero viene dada por la Ecuación 3.5:

Ecuación 3.5

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

Donde,

R_a	capacidad de retención de agua del mortero (%)
A_i	agua inicial presente el molde (l)
A_a	agua absorbida por los filtros (l)

La masa de agua inicialmente presente en el molde se calcula a partir de la masa de mortero ensayada contenida en el molde, que es posible obtener de acuerdo con su dosificación.

Para la determinación del agua absorbida, basta con saber la diferencia de peso entre los discos húmedos, antes y después del ensayo.

3.4. ENSAYOS PARA EL MORTERO EN ESTADO ENDURECIDO

Estos ensayos corresponden a los realizados después de que el mortero haya perdido parte del agua de amasado y se inicie el proceso de fraguado y endurecimiento.

3.4.1. Densidad aparente en seco

Este ensayo se realiza según 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"¹⁷².

La norma define la densidad aparente en seco del mortero endurecido como el cociente entre la masa seca de la probeta de mortero y el volumen que ocupa cuando se sumerge en agua, una vez saturada.

El procedimiento seguido para llevar a cabo el ensayo es el siguiente:

Una vez curadas las probetas, se introducen en un horno para su total secado hasta masa constante a una temperatura de 70°C ± 5°C.

¹⁷² 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.

Posteriormente se disponen en un desecador hasta conseguir la temperatura ambiente.

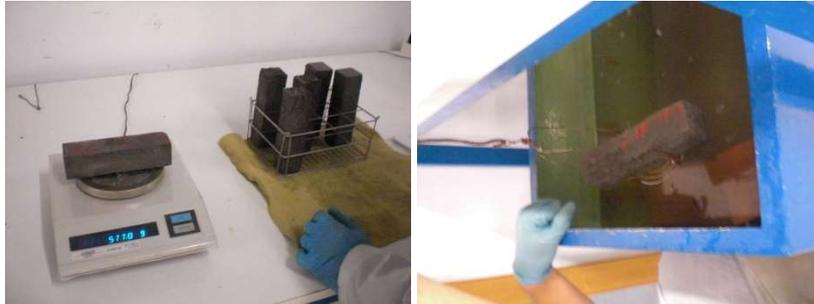


Figura 3.11 Peso de la probeta saturada y peso de la probeta saturada y sumergida.

A continuación, las probetas se saturan en agua a $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ de temperatura, hasta que no se observe aumento alguno en la masa aparente ($m_{s,sat}$). El volumen aparente de la probeta se determina en una balanza hidrostática (Figura 3.11) por desplazamiento volumétrico.

El volumen, en m^3 , se calcula por medio de la Ecuación 3.6:

Ecuación 3.6

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

Donde,

- V_s es el volumen aparente de la probeta (m^3)
- $m_{s,sat}$ es la masa de la probeta saturada (Kg)
- $m_{s,i}$ es la masa aparente de la probeta saturada sumergida (Kg)
- ρ_w es la densidad del agua (Kg/m^3)

La densidad aparente en seco se determina por relación entre la masa de la probeta secada en estufa, $m_{s,sec}$, entre el volumen de la probeta del mortero endurecido, V_s . El resultado final se obtiene del valor medio individual de cada probeta, expresado en kilogramos por metro cúbico, ajustando el valor a la decena más cercana.

3.4.2. Absorción de agua a presión atmosférica

La absorción de agua a presión atmosférica no está contemplada en la normativa de morteros para construcción. Para su cálculo se ha recurrido a

la Norma UNE-EN 13755 "Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la absorción de agua a presión atmosférica"¹⁷³.

Esta norma determina "la absorción de agua a presión atmosférica, expresado como porcentaje, mediante la proporción de la masa de la probeta saturada (obtenida a masa constante) y la masa de la probeta seca".



Figura 3.12 Probetas en la estufa y posteriormente saturadas en agua.

Las probetas de mortero, perfectamente curadas, se introducen en un horno para su secado hasta masa constante, a una temperatura de $70^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ (m_d). A continuación, se enfrían a temperatura ambiente en el interior de un desecador (Figura 3.12).

Posteriormente las probetas se introducen en posición vertical en un recipiente, y se añade agua a 20°C de temperatura hasta cubrir la mitad de la altura de las probetas durante $60 \text{ min} \pm 5 \text{ min}$. Pasada una hora, se vuelve a añadir agua hasta alcanzar las tres cuartas partes de la altura de las probetas, y se mantienen en esta situación durante otros $60 \text{ min} \pm 5 \text{ min}$. Finalmente, vuelve a añadirse agua hasta que las probetas queden totalmente sumergidas. Las muestras se dejan sumergidas en agua hasta alcanzar la masa constante saturada (m_s) (Figura 3.12).

El valor de la absorción de agua a presión atmosférica correspondiente de cada probeta se calcula mediante la Ecuación 3.7:

Ecuación 3.7

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

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)

¹⁷³ AENOR (2008). "UNE-EN 13755 Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la absorción de agua a presión atmosférica.". Madrid, Aenor.

El resultado final se obtiene del valor medio individual de cada probeta, expresado en porcentaje.

3.4.3. Absorción de agua por capilaridad

Además de la absorción de agua a presión atmosférica, existe otro procedimiento para comprobar el agua absorbida por un mortero, mediante la determinación del Coeficiente de Absorción de Agua por Capilaridad. Este ensayo se describe 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"*¹⁷⁴.



Figura 3.13 Preparación de probetas para el ensayo de absorción.

En este caso, para el moldeado de las probetas prismáticas de (40 x 40 x 160) mm³ deben posicionarse sendos papeles de filtro absorbente, en la cara superior e inferior del molde (Figura 3.13).



Figura 3.14 Parafinado de probetas.

¹⁷⁴ 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.

Una vez fraguadas y endurecidas las probetas se sellan las cuatro caras longitudinales con parafina y se rompen a flexión, obteniendo dos mitades iguales de las probetas (Figura 3.14).



Figura 3.15 Probetas inmersas en agua.

Por último, las piezas se colocan con las superficies de rotura dispuestas hacia abajo y sumergidas en agua, sin que toquen el fondo de la bandeja. Se cierra el recipiente para evitar la evaporación del agua (Figura 3.15).



Figura 3.16 Pesado de probetas.

El coeficiente de absorción de agua es, por definición, igual a la pendiente de la recta que une los puntos representativos de las medidas de masa tomadas después de 10 min y después de 90 min (Figura 3.16), y se calcula por medio de la Ecuación 3.8:

Ecuación 3.8

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

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)

El resultado final se obtiene del valor medio individual de cada probeta, expresado en porcentaje.

Si en algún momento del proceso se observa que el agua llega a la cara superior de la probeta, se detiene el ensayo y se rompen por la mitad para comprobar que la probeta está completamente saturada, registrando el peso de cada mitad.

3.4.4. Permeabilidad al vapor de agua

La descripción del método de ensayo para determinar la permeabilidad al vapor de agua de los morteros viene recogida 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"*¹⁷⁵.

La norma define la permeabilidad como *"la permeanza al vapor de agua multiplicado por el espesor de la probeta"*, y la permeanza al vapor de agua 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"*.

El procedimiento operatorio para la determinación de la permeabilidad de los morteros recogido en la norma es el siguiente:



Figura 3.17 Elaboración probetas para el ensayo de permeabilidad al vapor de agua.

Se moldean probetas cilíndricas utilizando un molde apoyado sobre un soporte de hormigón celular, colocando previamente entre medio sobre su superficie dos capas de algodón. Las dimensiones de los cilindros son de 15 mm de espesor y 160 mm de diámetro (Figura 3.17).

¹⁷⁵ 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 3.18 Disolución de Nitrato de Potasio (KNO_3) y sellado de las probetas.

Moldeadas las probetas, se disponen a modo de tapa sobre los recipientes de ensayo con una disolución de nitrato de potasio (KNO_3) en su interior y se sellan los bordes con una junta de estanqueidad (Figura 3.18). 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 del agua con paso del tiempo.

Los recipientes de ensayo se pesan a intervalos de tiempo apropiados y se determina el flujo de vapor de agua EG/Et (kg/s). Se calcula la permeanza al vapor de agua Λ ($\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}$) mediante la Ecuación 3.9:

Ecuación 3.9

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

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)

La permeabilidad al valor de agua W_{vp} ($\text{kg}/\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}$), se obtiene a partir del valor medio de la permeanza de todas las muestras, multiplicado por el espesor de la probeta (Ecuación 3.10).

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

Donde,

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

3.4.5. Conductividad térmica

Para estudiar la conductividad térmica del mortero endurecido se siguen las instrucciones de la *Norma UNE-EN 12667 "Materiales de construcción. Determinación de la resistencia térmica por el método de la placa caliente guardada y el método del medidor de flujo de calor. Productos de alta y media resistencia térmica"*¹⁷⁶.

Para la realización del ensayo se ha utilizado un equipo de placa caliente guardada. Se moldean dos muestras de mortero de sección cuadrada de (150 x 150 x 15) mm³, de las que previamente se mide la masa y el espesor.



Figura 3.19 Placas de ensayo con sonda de medición (izquierda) y muestras colocadas entre las mismas (derecha).

Las placas se ensayan completamente secas, incrementando su temperatura en la estufa para reducir el tiempo de ensayo. Una vez preparadas las muestras, se posicionan a cada lado de la placa caliente, perfectamente ajustadas, introduciendo el conjunto en el cajón aislado del equipo de ensayo. En esta situación, se provoca un flujo de calor y se miden las temperaturas, tanto en la cara fría como en la caliente. (Figura 3.19 y Figura 3.20).

¹⁷⁶ AENOR (2002). "UNE-EN 12667 Materiales de construcción. Determinación de la resistencia térmica por el método de la placa caliente guardada y el método del medidor de flujo de calor. Productos de alta y media resistencia térmica". Madrid, Aenor.



Figura 3.20 Placas colocadas en el equipo (izquierda) y realización del ensayo (derecha).

Para determinar el Coeficiente de Conductividad Térmica del material se utiliza la Ecuación 3.11:

Ecuación 3.11

$$\lambda = \frac{\Phi d}{A(T1 - T2)}$$

Donde,

λ	es la conductividad térmica (W/mK)
Φ	es el flujo de calor en vatios (V x A)
d	es el espesor de la probeta (m)
A	es el área de ensayo de la muestra en (m ²)
$(T1-T2)$	es la diferencia de temperatura caliente y temperatura fría (°C o K)

Con el objetivo de verificar los resultados obtenidos mediante el Ensayo de Placa Caliente descrito, se realiza un nuevo ensayo con el equipo C-Therm TCI, de la empresa C-THERM (Figura 3.21). El C-Therm TCI emplea la técnica patentada Modified Transient Plane Source (MTPS)¹⁷⁷. Para ello, se moldean muestras de material de dimensiones (40 x 40 x 160) mm³.

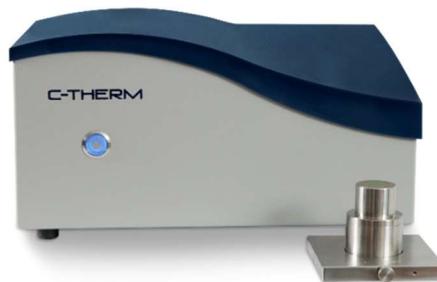


Figura 3.21 Aparato de medición de conductividad térmica. C-Therm TCI.

¹⁷⁷ C-THERM Technologies^{Ltd.}

Mediante un sensor de reflectancia de calor, se aplica una fuente de calor momentánea a la muestra, para medir la conductividad térmica y la efusividad, proporcionando de este modo una descripción detallada de las características herméticas de la muestra. Los pasos seguidos para la realización del ensayo son los siguientes:

Se aplica una corriente conocida al elemento de calentamiento de la bobina del sensor, proporcionando una cantidad mínima de calor.

El anillo de sensor se dispara y provoca un intercambio de calor entre la bobina del sensor y la muestra. Esta corriente de la bobina provoca un aumento de la temperatura en la interfase entre el sensor y la muestra de mortero, lo que induce un cambio en la tensión del elemento sensor. El aumento de temperatura se controla con el voltaje del sensor y se utiliza para determinar las propiedades termo físicas de la pieza.

La conductividad térmica es inversamente proporcional a la velocidad de aumento en el voltaje del sensor (o aumento de la temperatura). Este aumento del voltaje será mayor en materiales con baja conductividad térmica, mientras que será menor para materiales de conductividad térmica elevada.

3.4.6. Absorción acústica

Para estudiar la absorción acústica del mortero endurecido se siguen las instrucciones de la Norma UNE-EN 10534-2 "Acústica. Determinación del coeficiente de absorción acústica y de la impedancia acústica en tubos de impedancia. Parte 2: Método de la función de transferencia"¹⁷⁸ siguiendo el siguiente procedimiento:



Figura 3.22 Muestra insertada en tubo de impedancias (izquierda) y tubo con sistema de adquisición de datos (derecha).

¹⁷⁸ AENOR (2002). "UNE-EN ISO 10534-2 Acústica. Determinación del coeficiente de absorción acústica y de la impedancia acústica en tubos de impedancia. Parte 2: Método de la función de transferencia.", Madrid, Aenor.

Se acopla la muestra cilíndrica de material, con un diámetro de 3,49 centímetros y una altura de 3 centímetros, posicionando la muestra en el hueco del extremo del tubo de onda plana. Una vez posicionada la muestra, se genera ruido blanco desde el altavoz que se encuentra situado en el extremo opuesto del tubo (Figura 3.22).

Además, se utiliza un analizador de espectros para obtener la función de transferencia compleja, entre el par de micrófonos cercanos situados en la parte anterior de la muestra.

Una vez se obtiene la función de transferencia compleja, almacenada como un archivo ASCII, se utiliza el software para procesar los datos y obtener de forma gráfica las propiedades acústicas de los materiales ensayados.

3.4.7. Reacción al fuego

Para estudiar el comportamiento de los morteros objeto de estudio en esta Tesis a la acción del fuego, se someten al procedimiento de ensayo de la Norma UNE-EN ISO 1182 "Ensayo de reacción al fuego de productos. Ensayo de no combustibilidad"¹⁷⁹, que permite establecer si los morteros ensayados contribuyen a la propagación del fuego.

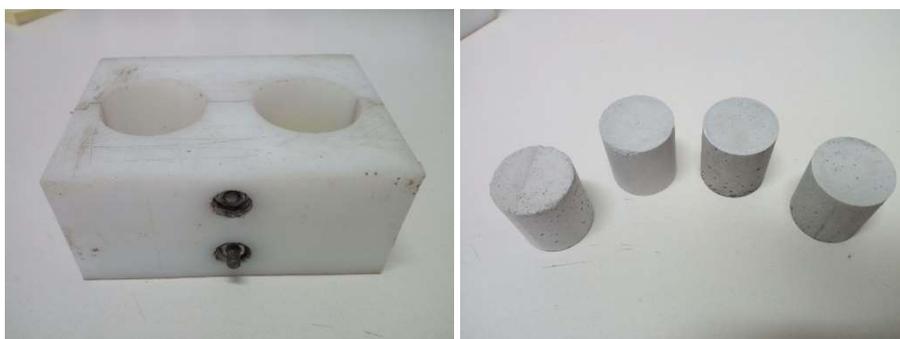


Figura 3.23 Molde y probetas para el ensayo de reacción al fuego.

Las probetas empleadas en el ensayo son de forma cilíndrica (Figura 3.23) tienen un volumen de (76 ± 8) cm³, un diámetro de (45 ± 2) mm y una altura de (50 ± 3) mm. Deben estar previamente curadas a una temperatura de 23 ± 2 °C y a una humedad relativa del $50\pm 5\%$.

Para la realización del ensayo se coloca la probeta en el interior de un horno con un tubo refractario rodeado de una resistencia, a su vez encajado dentro de un receptáculo aislante y provisto de un portaprobetas en su interior (Figura 3.24).

¹⁷⁹ AENOR (2011). "UNE-EN ISO 1182 Ensayos de reacción al fuego de productos. Ensayo de no combustibilidad", Madrid, Aenor.



Figura 3.24 Equipo utilizado en el ensayo de reacción al fuego.

La temperatura en el interior del horno se mide mediante termopares dispuestos en diferentes zonas del equipo, para medir la temperatura del horno, la de sus paredes interiores, así como la temperatura superficial de la muestra y la de su centro. Las temperaturas alcanzadas se registran en intervalos inferiores o iguales a 1 segundo durante 30/60 minutos.

Este ensayo permite obtener los resultados para los parámetros de pérdida de masa, duración de las llamas persistentes e incremento de temperatura.

3.5. ENSAYOS DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE LOS MORTEROS

3.5.1. Dureza superficial

Para determinar la dureza superficial del material se sigue el procedimiento especificado en la *Norma Española UNE 102-039-85 "Yesos y escayolas de construcción: Determinación de la dureza Shore C y dureza brinell"*¹⁸⁰.

Aunque se trata de una norma que hace referencia a materiales de construcción como son los yesos y las escayolas, diferentes a los morteros objeto de estudio en esta Tesis, se ha optado por aplicar su procedimiento de ensayo por ser muy visual, sencillo y descriptivo y de fácil aplicación a los morteros de cemento y cal.

De los dos métodos distintos en la norma, se ha optado por aplicar el ensayo de Dureza Shore C, que se realiza utilizando un durómetro con resorte, que proyecta sobre el material una fuerza dada mediante un penetrómetro de forma troncocónica, con una aguja unida mediante un engranaje al vástago. El valor de la Dureza Shore C se determina directamente en una escala con límites de 0 - 100.

¹⁸⁰ AENOR (1985). "UNE 102-039-85 Yesos y escayolas de construcción: Determinación de la dureza Shore C y dureza brinell". Madrid, Aenor.



Figura 3.25 Ensayo para la determinación de la dureza superficial.

Las medidas se realizan sobre las dos caras longitudinales de tres probetas, registrando un mínimo de cinco valores por cara. Se reparten las medidas sobre el eje longitudinal, con intervalos de 20 mm, como mínimo, entre los diferentes puntos y los extremos de los prismas (Figura 3.25).

En caso de grandes diferencias con respecto al valor medio, se repite la medida asegurándose de que las burbujas de aire o los granos más gruesos no perturben la medida. En el caso de humedad en exceso, se procede a una nueva serie de medidas al cabo de una semana.

3.5.2. Energía de fractura

A continuación, se define el procedimiento a seguir para la realización del ensayo a fractura por flexión en tres puntos y determinar así el valor de la fuerza máxima de rotura y de la energía de fractura.

Para el estudio de la energía de fractura en hormigones existen dos normas que hacen referencia a la Tenacidad a Fractura: la *Norma UNE 83515 "Hormigones con Fibras. Determinación de la resistencia a fisura, tenacidad y resistencia residual a tracción"*¹⁸¹ y la *Norma UNE 83510 "Hormigones con fibras. Determinación del índice de tenacidad y resistencia a la primera fisura"*¹⁸².

Para el moldeado de las probetas y su posterior rotura en prensa, ambas muestras se remiten a la *Norma UNE 83509 "Hormigones con fibras. Rotura por flexotracción"*¹⁸³, donde se indica los condicionantes que deben cumplir las dimensiones de las probetas:

¹⁸¹ AENOR (2010). "UNE 83515 Hormigones con Fibras. Determinación de la resistencia a fisura, tenacidad y resistencia residual a tracción". Madrid, Aenor.

¹⁸² AENOR (2004). "UNE 83510 Hormigones con fibras. Determinación del índice de tenacidad y resistencia a la primera fisura" Madrid, Aenor.

¹⁸³ AENOR (2004). "UNE 83509 Hormigones con fibras. Rotura por flexotracción" Madrid, Aenor.

- Una longitud total mínima de tres veces el canto de la probeta a ensayar más 50 mm.
- La relación entre el ancho y el largo de la probeta no debe ser superior a 1,5.
- La dimensión más pequeña de la probeta nunca será inferior a tres veces el tamaño máximo del árido grueso, ni de dos veces el tamaño máximo de la fibra.

En este caso solo se toman estos condicionantes como referencia, ya que, al no tratarse de un hormigón y no utilizarse fibras en el mortero, no se está obligado a cumplirlas. Las probetas utilizadas en el ensayo son de $(40 \times 40 \times 160)$ mm³ y cumplen los dos últimos requisitos, pero tienen 10 milímetros menos que los indicados en la primera condición. No obstante, como la diferencia es mínima, se ha optado por mantener las probetas con las dimensiones normalizadas.

Respecto a las consideraciones del ensayo, se considera más adecuado utilizar los ensayos de morteros en vez de hormigones, siguiendo las especificaciones para la determinación de la resistencia a flexión para morteros de albañilería.

Por lo tanto, los morteros se ensayan a fractura de forma similar a cómo se determina su resistencia a flexión, pero con probetas prismáticas previamente entalladas.

A continuación, se describe el proceso de ensayo:



Figura 3.26 Maquina de ensayo de fractura.

La prensa de rotura (Figura 3.26) debe estar provista de un útil con dos rodillos de apoyo en acero, con una longitud comprendida entre 45 mm y 50 mm y un diámetro de $10 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$, espaciados entre sí $100,0 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$, y de un tercer rodillo de carga, de la misma longitud y diámetro, centrado entre los dos rodillos de apoyo (Figura 3.27).

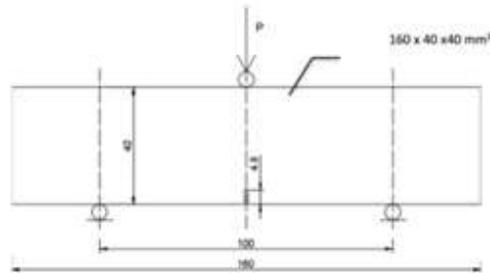


Figura 3.27 Posición de los apoyos y la probeta en la máquina de ensayo (medidas en mm).

Los tres planos verticales que pasan por los ejes de los tres rodillos deben ser paralelos y permanecer paralelos durante el ensayo, además deben estar equidistantes y perpendiculares a la dirección del prisma (probeta) sometido a ensayo.

Uno de los rodillos de apoyo y el rodillo de carga deben poder oscilar ligeramente para permitir una distribución uniforme de la carga sobre el total del ancho del prisma, evitando así someterlo a un esfuerzo de torsión.

En este caso se ha elegido una distancia entre apoyos de 100 mm ya que, aunque hay autores que proponen 120 mm para obtener propiedades a fractura, los valores obtenidos a esta distancia son tan bajos que no resultan representativos, por lo que se ha optado por la separación de los 100 mm. para obtener valores ligeramente superiores y adecuar el ensayo al de determinación de la resistencia a flexión de los morteros. Las entallas realizadas son de 4,8 mm y 6,4 mm.



Figura 3.28 Probeta previamente entallada dispuesta en la máquina de ensayo (izquierda) y ligamento resistente de la probeta ensayada a fractura (derecha).

Se registran los valores de carga máxima obtenidos, además de registrar todas las gráficas de tensión-deformación. Estas graficas son utilizadas para calcular la Energía a Fractura, después de determinar el área existente debajo de la curva, hasta el punto de carga máxima. Con este dato y aplicando la Ecuación 3.12 se obtienen los valores de la Energía de Fractura para cada ensayo.

Ecuación 3.12

$$G = \frac{U}{b \cdot h}$$

Donde,

- G es la Energía de Fractura (J/m²)
- U es el área de debajo de la curva (KN/mm)
- b es el ancho de la probeta (40 mm)
- h es el ligamento resistente (40 mm - 4,8 mm o 40 mm - 6,4 mm) (Figura 3.28)

El resultado final se obtiene del valor medio individual de cada probeta.

3.5.3. Resistencia a flexión y compresión

La resistencia a flexión y compresión de los morteros se determina de acuerdo con las especificaciones recogidas en 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"*¹⁸⁴.



Figura 3.29 Maquina de ensayo (izquierda) con sus adaptadores para el ensayo a flexión (centro) y el ensayo a compresión (derecha).

¹⁸⁴ AENOR (2000). "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". Madrid, Aenor.

La máquina de ensayo utilizada para realizar el ensayo de resistencia a flexión y el ensayo de resistencia a compresión es el mismo, solo es necesario colocar en la posición de ensayo los adaptadores correspondientes (Figura 3.29).

La resistencia a flexión del mortero se determina mediante la aplicación de una carga sobre la probeta, hasta conseguir que rompa por su mitad.

Las probetas utilizadas en el ensayo son normalizadas, de forma prismática y de dimensiones de $(40 \times 40 \times 160) \text{ mm}^3$, moldeadas de acuerdo con las especificaciones de la norma.



Figura 3.30 Detalle de una probeta sometida a rotura a flexión.

Para el ensayo de resistencia a flexión, la probeta se posiciona sobre los rodillos de acero que sirven de soporte inferior, comprobando que éstos se encuentran separados entre sí 100 mm.

Posteriormente, se coloca el rodillo superior de carga sobre la superficie opuesta de la probeta (Figura 3.30). La cara de apoyo de la probeta será una de las que han estado en contacto con las paredes del molde.

En esta posición del conjunto probeta-prensa, se aplica la carga con velocidad uniforme, de forma que la rotura se produzca entre 30 segundos y 90 segundos y la velocidad este comprendida entre 10 N/s y 50 N/s, registrando el valor de carga máxima obtenido en Newton, repitiendo el proceso con el resto de las probetas.

Con los registros de carga máxima de rotura a flexión obtenidos se determinan los valores de resistencia a flexión de cada probeta, de acuerdo con la Ecuación 3.13:

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

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)

La resistencia a flexión de un mortero en N/mm² (MPa), será el valor medio de los resultados obtenidos de las probetas ensayadas de cada tipo de mortero, aproximando a la décima más cercana.

Para la determinación de la resistencia a compresión, se utilizarán las medias probetas obtenidas del ensayo de rotura a flexión.



Figura 3.31 Detalle de una probeta sometida a rotura a compresión.

Para ello, se dispone de un útil que posiciona la mitad de la probeta sobre una cara plana que haya estado en contacto con el molde. La superficie de carga será de (40 x 40) mm² (Figura 3.31).

La carga se proyecta sobre la superficie de forma constante, sin aceleraciones, hasta su rotura. El valor de la carga máxima de rotura permite calcular la tensión de rotura a compresión mediante la Ecuación 3.14:

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

Donde,

Q	es la carga máxima (N)
S	sección transversal de la probeta (mm ²)

La resistencia a compresión de un mortero en N/mm^2 (MPa), será el valor medio de los resultados obtenidos de las probetas ensayadas de cada tipo de mortero, aproximando a la décima más cercana.



Figura 3.32 Probetas sometidas al ensayo de flexión y compresión.

En la Figura 3.32 se observa el aspecto final de las probetas sometidas a ambos ensayos.

3.5.4. Adherencia

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”¹⁸⁵ define la resistencia a la adhesión o resistencia a la unión de los morteros.

La norma define la resistencia a la adhesión 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”.

Para el procedimiento de ensayo, la norma indica expresamente que se deben utilizar como soporte ladrillos cerámicos, bloques silicocalcáreos o bloques de hormigón, en estado seco por contacto con el aire. Sin embargo, la antigua norma básica de la edificación NBE-FL 90 “Muros Resistentes de Fábrica de Ladrillo”¹⁸⁶ 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, para evitar que éstos succionen el agua de dosificación del mortero.

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 minuto en agua, con lo que se alcanza una saturación media de las piezas del 13%.

¹⁸⁵ AENOR (2000). “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”. Madrid, Aenor.

¹⁸⁶ Norma, N. (1991). “FL-90.” Muros resistentes de fábrica de ladrillo: 206-207.

Para la realización del ensayo se aplica en una capa de mortero de 10 mm de espesor sobre una pieza cerámica, cortando sobre ella superficies circulares con un útil con un diámetro aproximado de 50 mm. La norma marca que este procedimiento debe realizarse entre 10 minutos y 30 minutos después de amasado el mortero.

Las muestras se curan introduciéndolas en bolsas de polietileno selladas y herméticas al aire, conservándose durante 7 días a una temperatura de $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$. A continuación, las bolsas se retiran y se exponen al aire hasta su ensayo.



Figura 3.33 Adhesivo, pastillas para realizar el ensayo y cilindros.

Transcurrido el periodo de curado, garantizado el correcto fraguado y endurecimiento del mortero, se dispone sobre las superficies circulares unas pastillas metálicas pegadas con un adhesivo, como útil de tracción sobre el mortero (Figura 3.33).



Figura 3.34 Ensayo de adherencia para morteros en estado endurecido.

Una vez seco el adhesivo, se coloca el equipo y se aplica una fuerza vertical de tracción sobre la pastilla que, al estar adherida, la trasmite al mortero. La carga se debe aplicar sin producir sacudidas y a una velocidad constante y uniforme (Figura 3.34).

La resistencia individual a la adhesión (resistencia de unión en N/mm²) se calcula por medio de la Ecuación 3.15:

Ecuación 3.15

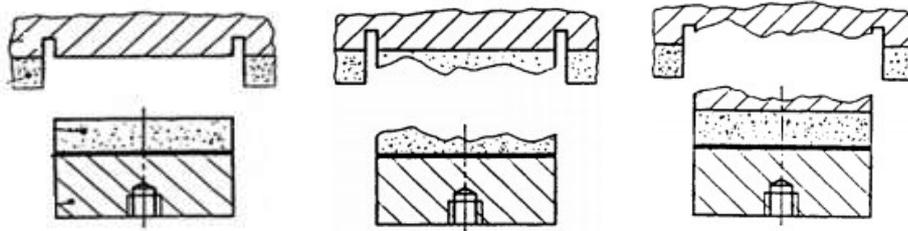
$$f_u = \frac{F_u}{A}$$

Donde,

F_u carga de rotura (N)
 A área de la superficie de ensayo (mm²)

De acuerdo con la norma, la rotura puede ser de dos tipos (Figura 3.35):

- Rotura adhesiva, cuando la rotura se producen en la interfase entre el mortero y el soporte.
- Rotura cohesiva, cuando la rotura se produce en el propio mortero o cuando se produce en el soporte.



- Figura 3.35 Rotura adhesiva (izquierda), rotura cohesiva en el mortero (centro) y rotura cohesiva en el soporte (derecha). (AENOR).

En el primer caso, el valor del ensayo es igual a la resistencia a la adhesión, mientras que, en el segundo caso, la resistencia a la adhesión es mayor que el valor del ensayo.

3.5.5. Resistencia inicial a cortante en fábricas de albañilería

Para estudiar la respuesta de fábricas de ladrillo a esfuerzo cortante se utiliza como referencia la Norma *UNE-EN 1052-3 "Métodos de ensayo para fábricas de albañilería. Parte 3: Determinación de la resistencia inicial a cortante"*¹⁸⁷.

Para la realización del ensayo se preparan probetas formadas por tres ladrillos cerámicos de formato hueco y de dimensiones (240 x 110 x 90) mm³, unidos por el mortero objeto de ensayo, dispuesto como junta de unión entre sus tablas.

Para ello, se sumergen los ladrillos en agua durante un minuto para que absorban una cantidad en torno al 9% de su peso seco. De esta forma se garantiza que estén húmedos y no absorban el agua de dosificación del mortero que los une.



Figura 3.36 Fabricación de probetas para el ensayo de cortante.

Las piezas cerámicas se colocarán en horizontal con una pella de mortero entre ambas, con el objetivo de disponer de una junta de mortero comprendida entre 8 mm y 15 mm. Mediante un nivel y una escuadra se comprueba que la segunda pieza queda alineada y nivelada con respecto a la primera.

De igual forma, se coloca la tercera pieza de la probeta y se eliminan con una paleta el exceso de mortero que haya podido quedar en las juntas. En la imagen de la Figura 3.36 se muestra la probeta terminada.

¹⁸⁷ AENOR (2003). "UNE-EN 1052-3 Métodos de ensayo para fábricas de albañilería. Parte 3: Determinación de la resistencia inicial a cortante". Madrid, Aenor.



Figura 3.37 Probetas en proceso de curado en bolsas de polietileno y con carga.

El curado de la probeta se realiza en la cámara de curado durante 28 días, dentro de una bolsa de polietileno, y se comprime con una masa distribuida uniformemente sobre la superficie comprendida entre 2×10^{-3} N/mm² y 5×10^{-3} N/mm² (Figura 3.37).

Transcurrido el tiempo de fraguado y endurecimiento del mortero y su perfecto curado, el ensayo de rotura se realiza de acuerdo con lo especificado en la ampliación A1 de la norma UNE-EN 1052-3¹⁸⁸, utilizando prensa multiensayos de la marca Suzpecar, modelo Mem 101, con una capacidad de carga de 20 toneladas.



Figura 3.38 Ensayo preparado para su realización.

¹⁸⁸ AENOR (2003). "UNE-EN 1052-3/A1:2008 Métodos de ensayo para fábricas de albañilería. Parte 3: Determinación de la resistencia inicial a cortante". Madrid, Aenor.

La probeta se coloca verticalmente sobre un apoyo formado por sendos cilindros metálicos y utilizando como mecanismo de carga otros dos cilindros metálicos dispuestos sobre la cara superior, de igual diámetro que los anteriores y situados verticalmente sobre las juntas de unión (Figura 3.38). Con esta configuración la carga ejercida se va a proyectar sobre el lado interno de cada llaga, produciendo esfuerzos de cortante a un ritmo de 0,1 N/(mm²·min) hasta la rotura, o fallo a cortante de la probeta.

Para calcular la resistencia media a cortante se utilizan los valores registrados en cada una de las muestras individuales, de acuerdo con la Ecuación 3.16:

Ecuación 3.16

$$f_{voi} = \frac{F_{i,max}}{2A_i}$$

Donde,

- f_{voi} es la resistencia a cortante, en N/mm²
- $F_{i,máx}$ es la carga máxima, en N
- A_i es la sección transversal de las muestras paralela a la fuerza cortante, en mm².

A partir de los resultados individuales, se calcula la resistencia inicial a cortante media f_{voi} , con una aproximación de 0,01 N/mm².

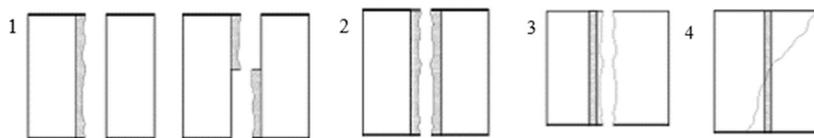


Figura 3.39 Tipos de fallos en el ensayo de resistencia inicial a cortante. (AENOR).

Además, se anota el tipo de rotura que se produce (Figura 3.39), siendo considerado correctos las situaciones del primer y segundo apartado:

1. Fallo a cortante en el área de unión de la pieza/mortero bien sobre una cara o dividida entre las caras de dos piezas.
2. Fallo a cortante sólo en el mortero.
3. Fallo a cortante en la pieza.
4. Fallo de aplastamiento y/o de rotura de las piezas.

3.6. ENSAYOS DE ENVEJECIMIENTO ACELERADO

Sobre el mortero endurecido se realizan también los ensayos de durabilidad o envejecimiento acelerado, para comprobar su comportamiento frente a la acción de los agentes agresivos externos de los ambientes en los que está colocado.

Se realizan un total de seis ensayos de durabilidad, suficientes para determinar si los morteros objeto de estudio en esta Tesis mantienen sus prestaciones en situaciones de agresividad ambiental: la heladicidad, la carbonatación acelerada, la cristalización de sales, las atmosferas industriales, agua salina y el choque térmico.

Para el comprobar el comportamiento de los morteros ensayados se ha tomado como referencia los siguientes indicadores:

1. Variación de peso seco. (Excepto en el ensayo de heladicidad, en el que se estudia la variación de volumen).

Para ello, se calcula la variación de masa (Δm) de la probeta en tanto por ciento después del ensayo, mediante la Ecuación 3.17:

Ecuación 3.17

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

Donde,

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

2. Inspección visual: de acuerdo con la normativa referida, es preciso examinar las caras y aristas de las probetas una vez realizados los ciclos de exposición al agente agresivo, comparando las probetas de referencia sin ensayar. 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

3. Variación resistencias mecánicas: se ensayarán las probetas a flexión y compresión y se compararán los resultados con los de probetas de referencia no ensayadas.

Para cada tipo de mortero diseñado se han realizado tres amasadas, de las que se han obtenido un total de dieciocho probetas de dimensiones (40 x 40 x 160) mm³, seis de cada amasada. De este modo, de cada grupo de seis probetas dos se han utilizado para realizar un primer ensayo, otras dos para un segundo ensayo y las dos probetas restantes se han reservado como referencia para comparar.

3.6.1. Heladicidad

No existe una norma específica que evalúe el comportamiento de los morteros a los ciclos de hielo y deshielo. Por ello, se ha tomado como referencia las especificaciones de la *Norma UNE-EN 12371 "Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la resistencia a la Heladicidad"*¹⁸⁹.

Una vez curadas las probetas, se desecan en una estufa a una temperatura de 70°C ± 5°C hasta masa constante, y posteriormente se saturan en agua a 20°C ± 10°C, quedando completamente sumergidas durante (48 ± 2) h. Transcurrido este tiempo, las probetas están dispuestas para ser sometidas a los ciclos de hielo y deshielo.

Para establecer el número de ciclos de exposición, se ha tomado como referencia la *Norma UNE-EN 22203 "Productos de piedra natural. Construcción de aplacados de fachadas con piedra natural"*¹⁹⁰, aplicable a la piedra natural y que establece que el número de ciclos elegido para el ensayo depende de las condiciones climáticas del emplazamiento, del riesgo de saturación y de la vida útil de la piedra, de acuerdo con la Ecuación 3.18:

Ecuación 3.18

$$N = \frac{I_g \cdot n}{12} k$$

Donde,

N	número de ciclos hielo/deshielo
I _g	Índice de hielo del emplazamiento
n	número de años de exposición
k	factor de saturación

¹⁸⁹ AENOR (2011). "UNE-EN 12371 Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la resistencia a la heladicidad", Madrid, Aenor.

¹⁹⁰ AENOR (2011). "UNE-EN 22203 Productos de piedra natural. Construcción de aplacados de fachadas con piedra natural", Madrid, Aenor.

Según esta norma, el número de años de exposición debe estar comprendido entre 20 y 40 años. Para determinar el índice de hielo del emplazamiento se recurre a la tabla B.1 del anejo B (Burgos: 44,5) y para el factor de saturación a la tabla B.2 del mismo anejo (aplacado de paredes verticales: 0,4).

En consecuencia, de acuerdo con estas consideraciones, son precisos 59 ciclos de hielo y deshielo para conocer el comportamiento del material a largo plazo. Además, este número de ciclos elegido está en consonancia con lo desarrollado en las especificaciones de 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"*¹⁹¹ que señala que para la identificación del producto deben realizarse, por lo menos, 56 ciclos.



Figura 3.40 Realización del ensayo de heladicidad.

Por lo tanto, las probetas se someten a 59 ciclos de hielo/deshielo, de acuerdo con la siguiente secuencia (Figura 3.40):

- Período de congelación al aire de seis horas, con una temperatura comprendida entre los -8°C y los -12°C .
- 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 las probetas deben quedar sumergidas.

3.6.2. Choque térmico

Mediante este ensayo se valora el comportamiento de las muestras cuando están sometidas a ciclos alternos de humedad-sequedad. Al igual que en el ensayo de heladicidad, no existe una norma específica para determinar los efectos del choque térmico sobre los morteros objeto de estudio. Por ello, se utiliza por analogía la *Norma UNE-EN 14066 "Métodos*

¹⁹¹ 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.

de ensayo para piedra natural. Determinación de la resistencia al envejecimiento por choque térmico¹⁹².



Figura 3.41 Realización del ensayo de choque térmico.

Como en casos anteriores, antes de realizar los ciclos las probetas deben estar secas. Para ello, se secan en una estufa a una temperatura de $70^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ hasta masa constante.

Tal y como se indica en la norma, se realizan un total de 20 ciclos humedad-sequedad (Figura 3.41):

- (18 ± 1) horas en un horno ventilado a $(105 \pm 5)^{\circ}\text{C}$.
- (6 ± 1) horas completamente sumergidas en agua destilada, cuya temperatura antes de la inmersión es de $(20 \pm 5)^{\circ}\text{C}$. Si el ensayo tiene que interrumpirse en un momento dado, las probetas se dejarán sumergidas en agua.

3.6.3. Carbonatación acelerada

Para evaluar el proceso de carbonatación de los morteros diseñados, se ha realiza un ensayo de forma acelerada.



Figura 3.42 Realización del ensayo de carbonatación acelerada.

¹⁹² AENOR (2014). "UNE-EN 14066 Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la resistencia al envejecimiento por choque térmico", Madrid, Aenor.

Las probetas se introducen en una cámara sellada estanca y se posicionan mediante unos separadores de PVC para que la cara inferior no esté en contacto con el suelo de la cámara (Figura 3.42), donde permanecerán 90 días.

Una vez cerrada la cámara se incorpora el CO₂, controlando el caudal y el volumen de gas introducido. El caudal incorporado es de 15 l/min durante 2 minutos, lo que supone 20% de la capacidad máxima de la cámara, es decir, 0,20 x 140 litros = 30 litros (la cámara un volumen de 140 litros). Por último, utilizando una sonda para medir CO₂ se comprueba que la concentración de gas en la cámara supera el 5%.

Finalizado el ensayo, se mide la profundidad de la carbonatación producida impregnando las probetas con fenolftaleína.

Para ello, se rompen las probetas por la mitad a flexión, obteniendo una superficie lo más recta posible. Posteriormente se limpian, retirando el polvo residual superficial y se pulveriza la fenolftaleína. Esto produce que las áreas carbonatadas del mortero no cambian de color, mientras que las zonas con un pH > 9 adquieren un color rosado brillante (Figura 3.43).



Figura 3.43 Impregnación con fenolftaleína.

Mediante la fotografía de las áreas y con la ayuda de un programa de dibujo asistido por ordenador, se realiza la medición de la superficie total de la probeta estudiada y el área de la zona afectada. La profundidad media (P_m) será la raíz cuadrada de la diferencia del área total menos el área carbonatada o área equivalente de un cuadrado con las dimensiones de la profundidad media (Ecuación 3.19):

Ecuación 3.19

$$P_m = \sqrt{A_1 - A_c}$$

Donde,

A_1 Área total de la cara de la probeta. (m²)
 A_c Área interior no carbonata. (m²)

3.6.4. Agua salina

El estudio del comportamiento de un mortero que está en contacto con el agua de mar se realiza de acuerdo con el procedimiento de análisis descrito en la *Norma Americana ASTM D 4792-00 "Standard method for potencial expansion of aggregates from hydration reactions"*¹⁹³. Aunque el ensayo está orientado a conglomerados de hormigón, puede también aplicarse a morteros.

Es un ensayo de envejecimiento acelerado muy útil para determinar el proceso de expansión de componentes sensibles a la hidratación y al aumento de volumen como el óxido de calcio libre y los óxidos de magnesio, como puede ser el caso de las escorias utilizadas en este trabajo.

También para observar cómo afecta el proceso de cristalización de las sales disueltas, ya que al incrementar su volumen pueden producir tensiones sobre las paredes de los huecos interiores donde están depositadas, dando lugar a grietas, fisuras que fragmentan el material.



Figura 3.44 Realización del ensayo de agua salina.

Una vez moldeadas y curadas las probetas, se secan en una estufa a una temperatura de $70^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ hasta masa constante. Posteriormente, se sumergen completamente en recipientes con agua salina a una temperatura de $(70 \pm 3)^{\circ}\text{C}$ durante un mínimo de 7 días. Para este estudio las probetas se han ensayado durante 32 días (Figura 3.44).

3.6.5. Atmósferas industriales. Ensayo Kesternich

Para el estudio del comportamiento de los morteros frente a la acción de agentes contaminantes externos, especialmente los producidos por los combustibles fósiles y los gases de las atmósferas industriales se realizan ensayos de durabilidad de acuerdo con las especificaciones de la *Norma UNE-EN 6988 "Recubrimientos metálicos y otros recubrimientos no*

¹⁹³ ASTM (2000). "D 4792 Standard test method for potencial expansion of aggregates from hydration reactions", American Society for Testing and Materials. Philadelphia, PA. Annual Book of ASTM Standard.

orgánicos. Ensayo al dióxido de azufre con condensación general de la humedad"¹⁹⁴ y la Norma Alemana DIN 50018 "Ensayos de corrosión en atmósferas húmedas saturadas con adicción de dióxido de azufre"¹⁹⁵. Es el conocido como "Ensayo Kesternich".



Figura 3.45 Realización del ensayo Kesternich.

El ensayo se realiza mediante una cámara estanca en la que se introducen las probetas junto con dióxido de azufre (Figura 3.45). Cada ciclo de exposición se prolonga durante 24 horas y consta de las siguientes fases:

- En primer lugar, se introducen las probetas en la cámara junto con una dosis de 0,2 dm³ de dióxido de azufre, a una temperatura de 40°C ± 3°C durante 8 horas.
- Transcurrido este tiempo, la puerta de la cámara se abre automáticamente y las probetas se exponen a temperatura y atmósfera ambiente durante 16 horas.

El ensayo concluye cuando se observa un deterioro evidente de las piezas o bien se alcanzan los ciclos estimados en función del tipo de material o grado de exposición, en este caso 15 ciclos.

Este ensayo permite también comprobar la reacción de los componentes del cemento como la cal libre y los sulfatos cálcicos, cuando está expuesto a gases contaminante con altas concentraciones de SO₂ y, sobre todo, por los efectos que pudieran producirse sobre las partículas metálicas de hierro presentes en las escorias.

3.6.6. Cristalización de sales

La normativa específica de morteros no contempla un procedimiento de análisis que valore la resistencia a la cristalización de sales solubles, pero

¹⁹⁴ AENOR (1996). "UNE-EN ISO 6988 Recubrimientos metálicos y otros recubrimientos no orgánicos. Ensayo al dióxido de azufre con condensación general de la humedad", Madrid, Aenor.

¹⁹⁵ DIN (1997). "DIN 50018 Sulfur dioxide corrosion testing in a saturated atmosphere", Berlin, Deutsches Institut für Normung.

partiendo de la consideración de que el mortero se puede clasificar como un “material pétreo artificial”, se opta por utilizar el método de ensayo de la normativa de aplicación a las piedras naturales, como en ensayos anteriores.

La norma que contempla este procedimiento es la norma *UNE-EN 12370 “Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la resistencia a la cristalización de las sales”*¹⁹⁶.



Figura 3.46 Realización del ensayo de cristalización de sales.

En primer lugar, las probetas tienen que secarse en un horno a una temperatura de (105 ± 5) °C hasta masa constante. Se anota su peso seco y las dimensiones de las probetas.

Posteriormente, las probetas se someten a 15 ciclos de exposición, salvo que se produzca su rotura o la descomposición del material antes de su finalización (Figura 3.46). El proceso que se sigue es el siguiente:

- Las probetas se sumergen en una disolución de sulfato de sodio decahidratado al 14% en un recipiente cerrado para evitar la evaporación de la disolución, durante 2 horas a $(20 \pm 0,5)$ °C.
- A continuación, se extraen y se secan en un horno a (105 ± 5) °C durante un período mínimo de 16 horas. (20 horas en esta investigación).
- Por último, se retiran del horno y se dejan enfriar a temperatura ambiente durante $(2,0 \pm 0,5)$ horas antes de volver a sumergirlas en la disolución de sulfato de sodio.

Después del 15º ciclo, las probetas se extraen del horno y se conservan durante (24 ± 1) horas en agua a (23 ± 5) °C. Finalmente, se lavan cuidadosamente con agua corriente y se secan, pesándolas 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.

¹⁹⁶ AENOR (1999). "UNE-EN 12370 Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la resistencia a la cristalización de sales", Madrid, Aenor.

3.7. TÉCNICAS INDUSTRIALES

En este último apartado del capítulo se describen las técnicas industriales utilizadas para obtener información complementaria, tanto de los morteros diseñados objeto de estudio como de las materias primas. De esta forma, se dispone de información adicional a la obtenida mediante las técnicas específicas de caracterización de los morteros.

Aunque estas técnicas analíticas son complejas y se precisan equipos específicos no habituales en los laboratorios convencionales, su uso es generalizado en la investigación de este tipo de materiales.

3.7.1. Difracción de rayos X (DRX)

La Difracción de rayos X es una técnica utilizada en el estudio de los materiales con estructura cristalina. El equipo empleado es un Difractómetro de Rayos X marca Bruker D8 Advance (Diseño Davinci) (Figura 3.47).

La difracción de rayos X se basa en la dispersión coherente de un haz de rayos X sobre una muestra del material, manteniendo la longitud de onda de la radiación y en la interferencia constructiva de las ondas que están en fase y que se dispersan en determinadas direcciones del espacio.

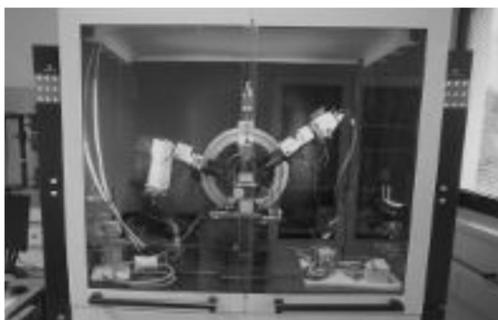


Figura 3.47 Difractómetro de Rayos X.

Mediante esta técnica se pueden establecer las estructuras cristalinas presentes en el árido, ya que todos los sólidos cristalinos poseen su difractograma característico, y estudiar la variación que sufren cuando estos materiales se someten a ensayos de reactividad.

3.7.2. Fluorescencia de rayos X (FRX)

La fluorescencia de rayos X (FRX) es una técnica espectroscópica que se utiliza principalmente para el análisis químico elemental de muestras sólidas y líquidas. Esto se consigue mediante la emisión secundaria o

fluorescente de radiación X generada al excitar una muestra con una fuente de radiación X.

Mediante detectores colocados a un ángulo determinado se mide la intensidad de las radiaciones de rayos X con una longitud de onda o energía concreta. Cada radiación de Rayos X emitida por la muestra es difractada por un cristal a un ángulo determinado dependiendo de su longitud de onda (o energía) siguiendo la Ley de Bragg.

3.7.3. Microscopía electrónica de barrido (MEB) y microanálisis por energía dispersa de rayos X

El microscopio electrónico de barrido o SEM (Scanning Electron Microscope), es un equipo de análisis que permite obtener imágenes microscópicas de alta resolución mediante un haz de electrones que se proyectan sobre la muestra. Los electrones acelerados se conducen a través del cañón, barriendo una amplia superficie de muestra. De esta forma, se pueden obtener figuras en tres dimensiones, proyectadas en una imagen digital.

Con estas imágenes se puede estudiar la microestructura de la muestra no visible a simple vista, y entender mejor los comportamientos e interacciones entre los componentes que forman las mezclas de mortero.



Figura 3.48 Microscopio electrónico de barrido y muestras colocadas en su interior.

El equipo empleado es un microscopio electrónico de barrido JEOL JSM-6460LV con sistema INCA de análisis elemental de Rayos X (Figura 3.48), que permite obtener fotografías de hasta 300.000 aumentos, incluso en muestras poco conductoras.

Al mismo tiempo que se toman las imágenes de barrido electrónico con el microscopio, mediante un detector de Rayos X se obtiene el análisis semicuantitativo de la composición química elemental de los materiales analizados.

3.7.4. Porosimetría de intrusión de mercurio (MIP)

La determinación de la porosidad de los morteros objeto de estudio mediante Porosimetría por Intrusión de Mercurio (*MIP - Porosimetry by Intrusion of Mercury*) analiza los microporos del material y su distribución.

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

El equipo empleado es un Micrometrics Autopore IV 9500, que alcanza presiones de hasta 32.000 Psi, lo que permite obtener tamaños de poro de hasta 0,0067 μm .

El procedimiento operatorio se basa en la introducción de mercurio a altas presiones en los poros, aportando en la mayoría de los casos información muy valiosa sobre la estructura interna del material analizado.

El proceso de análisis comienza realizando el vacío sobre las muestras, para posteriormente aplicar una presión hidrostática con mercurio a la cámara que contiene la muestra. La presión de intrusión de mercurio resulta inversamente proporcional al tamaño de la abertura del poro, a los valores de presión aplicada y al volumen acumulado de mercurio introducido.

Los parámetros fundamentales que se obtienen de la MIP son tres: la porosidad total del material, el diámetro de los poros y la distribución de la estructura porosa.

3.7.5. Tomografía axial computarizada (TAC)

Para el estudio de la porosidad de los morteros se ha utilizado la técnica de la tomografía axial computarizada, que permite la obtención de un gran número de imágenes de cortes o secciones transversales a un eje longitudinal de la muestra analizada.



Figura 3.49 Equipo TAC.

Para la obtención de dichas imágenes se utiliza un equipo de rayos X (Figura 3.49), que dispone de un tubo Yxlon de 225 Kv/30mA.

Con las imágenes tomadas, una vez tratadas mediante un programa informático (MIMICS), se obtienen visualizaciones en tres dimensiones de la estructura interna de las muestras, lo que permite su observación y estudio sin dañarlas.

Mediante el programa MIMICS se asigna una gama de colores a los distintos componentes del mortero en función de su densidad. Los componentes más densos, como los áridos, aparecen con un color más claro, mientras que la pasta de cemento, de densidad menor, se muestra con colores más oscuros. Las fisuras, las pequeñas grietas y los poros toman un color negro.

Una vez asignados los colores a los materiales en función de su densidad, se puede cuantificar la macroporosidad del mortero, es decir, los poros de tamaño mayor a 170 μm .



CAPITULO IV

Caracterización de las materias primas

4. CARACTERIZACIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS

En el presente capítulo se describen las características de los materiales utilizados para el diseño de los morteros objeto de estudio en esta Tesis.

Tradicionalmente los morteros se han clasificado en función del conglomerante utilizado para su fabricación, dando lugar a morteros de cemento, morteros de cal aérea, mortero de cal hidráulica o morteros mixtos, éstos últimos también conocidos como “*morteros bastardos*”.

El objeto de la investigación de esta Tesis es el estudio de las propiedades y comportamiento de morteros fabricados con escorias de acería, utilizando como conglomerantes de forma conjunta cemento y cal. Posteriormente, también se hace un estudio más específico de los morteros fabricados solo con cal, tanto aérea como hidráulica.

Para los morteros de referencia se utilizan áridos naturales silíceos procedentes de depósitos sedimentarios localizados en la Provincia de Burgos. Como componente fino del árido se añade filler calizo.

Los residuos de acería utilizados en los morteros diseñados son procedentes de la industria metalúrgica. Se han dosificado escorias negras de Horno Eléctrico de Arco y escorias blancas generadas en los Hornos Cuchara.

En la última fase de la experimentación se incorporan a las mezclas dos aditivos, MasterRheobuild 2100 y MarterSeal 600.

4.1. CONGLOMERANTES

Los conglomerantes utilizados en el presente estudio se han seleccionado teniendo en cuenta criterios de idoneidad referidos a características técnicas, disponibilidad de materias primas y coste de mercado, en el hipotético caso de una futura fabricación a gran escala de los morteros diseñados.



Figura 4.1 Cemento tipo CEM I 42,5 R (izquierda) y cal tipo CL 90 S (centro) y cal tipo NHL 5 (derecha).

Aunque el conglomerante más utilizado en la fabricación de morteros es el cemento Portland, también es muy habitual el uso de la cal, tanto por separado como junto al cemento.

En la primera fase de la investigación se han diseñado morteros bastardos utilizando como conglomerantes Cal Aérea CL-90 S y Cemento Portland CEM I 42,5 R. Posteriormente, se diseñan morteros dosificados solo con Cal Aérea CL 90 S y Cal Hidráulica NHL 5 (Figura 4.1).

4.1.1. Cemento

El cemento se define en la *Norma UNE EN 197-1 "Cemento. Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes"*¹⁹⁷ 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.*

El cemento Portland está formado, básicamente, por la molienda conjunta del producto resultante de la cocción de una mezcla de caliza y arcilla que recibe el nombre de Clinker y de un material empleado como regulador de fraguado, que generalmente es yeso hidratado¹⁹⁸.

El Clinker está formado por una mezcla de silicatos, aluminatos y ferrito aluminatos de cal, acompañados de otros óxidos formados a partir de diferentes componentes de las materias primas utilizadas, como los óxidos de magnesio, sodio o potasio.

La *Instrucción para la Recepción de Cementos (RC-08)*¹⁹⁹ recoge los tipos de cemento comerciales existentes.

El cemento utilizado en las investigaciones de esta Tesis es un cemento Portland Tipo I con una resistencia mecánica media-alta de 42,5 Mpa a 28 días, con resistencia inicial elevada R (Figura 4.2), fabricado por la empresa Cementos Alfa S.A., del grupo Portland Valderrivas, en su factoría de Mataporquera (Cantabria).

CEM I 42,5 R

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

¹⁹⁸ Guardia Olmedo, J. J., I. Valverde Palacios, M. Martín Morales, J. L. Piqueras Sala and B. M. Castilla Rodríguez "BUILDING MATERIALS II: TECHNOLOGY OF MATERIALS."

¹⁹⁹ Ministerio-Fomento (2009). "RC-08 Instrucción para la recepción de cementos". Madrid, Centro de Publicaciones, Secretaría General Técnica, Ministerio de Fomento.



Figura 4.2. Saco de cemento tipo CEM I 42,5 R.

El Certificado de Características Técnicas, expedido por la empresa Cementos Alfa S.A. para el cemento CEM I 42,5 R, se muestra en la Tabla 4.1 y 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, para completar la caracterización proporcionada por la empresa Cementos Alfa S.A., se calcula la densidad real del cemento, que resultó ser de 3.150 kg/m³. El análisis químico del cemento se completa con la determinación de sus 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 CEM I 42,5 R.

4.1.2. Cal aérea

Las cales utilizadas para construcción en España cumplen con las prescripciones de las *Norma UNE-EN 459 (Partes 1, 2 y 3)*^{114, 200, 201}. Los diferentes tipos de cales cálcicas que se contemplan en dichos documentos normativos son los recogidos a continuación:

Tipos de cales calcáreas	
Designación	Notación
Cal aérea 90	CL 90
Cal aérea 80	CL 80
Cal aérea 70	CL 70

Además, las cales calcáreas se clasifican según la forma de producto. Cal viva (i), cal hidratada (S), cal en pasta (S PL) o lechada de cal (S ML).

Tabla 4.4 Tipos de cales calcáreas. (AENOR).

¹¹⁴ AENOR (2011). "UNE-EN 459-1. Cales para la construcción. Parte 1: Definiciones, especificaciones y criterios de conformidad". Madrid, Aenor.

²⁰⁰ AENOR (2011). "UNE-EN 459-2. Cales para la construcción. Parte 2: Métodos de ensayo". Madrid, Aenor.

²⁰¹ AENOR (2012). "UNE-EN 459-3. Cales para la construcción. Parte 3: Evaluación de la conformidad". Madrid, Aenor.

La composición de este tipo de cales se determina de acuerdo con las prescripciones de la *Norma 459-2*. En la Tabla 4.5 se recogen los requisitos químicos de la cal cálcica, expresados como valores característicos:

Requisitos químicos para la cal calcárea					
Tipo de cal calcárea	Valores expresados como fracciones de masa, en tanto por ciento				
	CaO + MgO	MgO ^a	CO ₂ ^b	SO ₃	Cal útil ^c
Cal calcárea 90	≥ 90	≤ 5	≤ 4	≤ 2	≥ 80
Cal calcárea 80	≥ 80	≤ 5	≤ 7	≤ 2	≥ 65
Cal calcárea 70	≥ 70	≤ 5	≤ 12	≤ 2	≥ 55

Los valores para CaO + MgO, MgO, CO₂ y SO₂, se aplican a todos los tipos de cal calcárea. Para la cal viva, estos valores corresponden al producto acabado; para todos los otros tipos de cal (cal hidratada, cal en pasta y lechada de cal) los valores se refieren al producto exento de agua libre y de agua combinada.
Los valores para la cal útil (óxido de calcio para cal viva, hidróxido de calcio para cal hidratada) se refieren al producto ensayado de acuerdo a la Norma EN 459-2.

^a Esta permitido un contenido de MgO hasta el 7% a condición de que se cumpla el ensayo de estabilidad según la Norma EN 459-2.

^b Esta permitido un contenido superior de CO₂, si se satisfacen el resto de los requisitos químicos de la tabla 2 y la frecuencia de ensayo satisface los requisitos de la tabla 7.

^c Pueden requerirse unos valores más altos de cal útil.

Tabla 4.5 Requisitos químicos para la cal calcárea. (AENOR).

La cal seleccionada para la investigación de la Tesis es una Cal Cálcica Aérea designada como CL 90-S, conforme a la *Norma UNE-EN 459-1*.



Figura 4.3 Saco de cal tipo CL 90 S.

La justificación de la elección de este tipo de cal no es otro que el de utilizar una cal aérea que presente la mayor pureza posible en contenido de óxido de calcio. El producto utilizado ha sido Hidróxido Cálcico CL-90-S (Figura 4.3), fabricado por la empresa Cal de Castilla S.A. (Calcasa), con una densidad real de 2.190 kg/m³.

Sus características se recogen en la Tabla 4.6. y su designación normalizada es:

CL 90-S

Características químicas de la cal		
	Valor medio	Desviación
CaO + MgO	91,50%	±1,10
CO ₂	1,40%	±0,13
Fe ₂ O ₃	0,20%	±0,05
Al ₂ O ₃	0,60%	±0,05
SiO ₃	0,80%	±0,15
H ₂ O humedad	1,20%	±0,36
Ca(OH) ₂ útil	89,50%	±1,50

Tabla 4.6 Características químicas de la cal. (Calcasa).

4.1.3. Cal hidráulica natural

Además de las cales aéreas, existen las denominadas cales hidráulicas, obtenidas por la calcinación de calizas más o menos arcillosas o silíceas (incluyendo la creta), con posterior reducción a polvo mediante apagado, con o sin posterior molienda. La cal hidráulica natural no contiene ninguna otra adición.

Las propiedades hidráulicas son el resultado exclusivo de la composición química especial de la materia prima natural y se clasifican de acuerdo con la notación indicada en la Tabla 4.7 y en función de su resistencia a compresión, como se muestra en la Tabla 4.8.

Tipos de cales hidráulicas naturales	
Designación	Notación
Cal hidráulica natural 2	NHL 2
Cal hidráulica natural 3,5	NHL 3,5
Cal hidráulica natural 5	NHL 5

Tabla 4.7 Tipos de cales hidráulicas naturales. (AENOR).

Resistencia a compresión para la cal hidráulica natural		
Tipo de cal hidráulica natural	7 días (MPa)	28 días (MPa)
NHL 2	-	2 ≤ Rc ≤ 7
NHL 3,5	-	3,5 ≤ Rc ≤ 10
NHL 5	≥ 2	5 ≤ Rc ≤ 15

Tabla 4.8 Resistencia a compresión para la cal hidráulica natural expresada como valores característicos. (AENOR).

Las propiedades de los tipos de cal hidráulica natural están indicadas en la Tabla 4.9:

Requisitos químicos para la cal hidráulica natural		
Tipo de cal hidráulica natural	SO ₃	Cal útil como Ca(OH) ₂ según el apartado 5.8 de la Norma EN 459-2:2010
Valores en fracción de masa en porcentaje		
NHL 2	≤ 2	≥ 35
NHL 3,5	≤ 2	≥ 25
NHL 5	≤ 2	≥ 15

NOTA: Los valores de SO₃ se refieren al producto exento de agua libre y agua combinada.

Tabla 4.9 Requisitos químicos para la cal hidráulica natural expresados como valores característicos. (AENOR).

La cal seleccionada para la investigación de la Tesis es una Cal Hidratada Natural, conforme a la Norma UNE-EN 459-1.

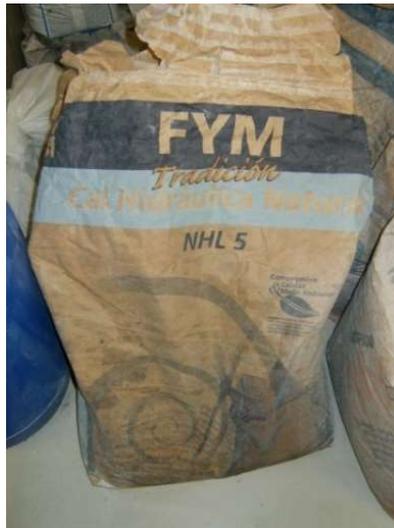


Figura 4.4 Saco de cal hidráulica NHL-5.

La justificación de la elección de este tipo de cal no es otro que el de emplear una cal hidráulica con un alto contenido de cal libre. El producto elegido ha sido Hidróxido Cálcico NHL-5 (Figura 4.4), fabricado también por la empresa Cal de Castilla S.A. (Calcasa).

Las características de la cal elegida para la investigación se recogen en la Tabla 4.10 y tiene la siguiente designación normalizada:

NHL-5

Características químicas de la cal hidráulica natural		
	unidad	Valor medio
SO ₃	%	0,86
Cal libre	%	23,0
Finura a 90 μ	%	7,9
Finura a 200 μ	%	1,6
Expansión	mm	0,3
Densidad Aparente	Kg/dm ³	0,820
Densidad Real	g/cm ³	2,66
Valor Blaine	cm ² /g	10071
Inicio de Fraguado	mn	400
Fin de Fraguado	mn	535
Resistencia Compresión 7d	MPa	2,09
Resistencia Compresión 28d	MPa	6,42

Tabla 4.10 Características químicas de la cal hidráulica natural. (Calcasa).

4.2. ARIDOS

La *Norma UNE-EN 13139* tiene como objeto especificar las características y propiedades de los áridos obtenidos por un proceso natural, los procedentes de materiales fabricados o reciclados y las mezclas para ser empleadas en morteros para edificación e ingeniería civil.

De acuerdo con la norma, los áridos pueden ser de origen natural de canto rodado, sin ningún tipo de tratamiento previo, o bien de machaqueo si se les ha sometido a procesos mecánicos.

Los áridos de canto rodado tienen forma redondeada debido a los procesos erosivos a que se han visto sometidos, mientras que los procedentes del machaqueo presentan superficies angulosas. En el segundo tipo de áridos es donde se enmarca la arena silícica que será empleada para fabricar los morteros de referencia de la Tesis.

Los áridos reciclados resultan del tratamiento de un material inorgánico que constituye un Residuo de Construcción y Demolición (RCD). Proceden de plantas de tratamiento de residuos en las que son sometidos a clasificaciones y transformaciones para que puedan ser utilizados de nuevo como áridos en obras de construcción e ingeniería civil²⁰².

La *Instrucción de Hormigón estructural EHE-08*²⁰³, establece limitaciones respecto a los requisitos físico-mecánicos que deben cumplir los áridos. Un resumen de estas limitaciones se especifica en la Tabla 4.11:

²⁰² Rodríguez-Mora, O. (2003). "Morteros: guía general", AFAM, Asociación Nacional de Fabricantes de Mortero.

²⁰³ Ministerio-Fomento (2008). "Instrucción de Hormigón Estructural. EHE-08". Madrid, Ministerio de Fomento. Centro de publicaciones.

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 4.11 Requisitos físico-mecánicos de los áridos según EHE. (Ministerio de Fomento).

La Norma UNE-EN 1744-1 “Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos. Parte 1: Análisis químico”²⁰⁴ determina las características químicas de los áridos utilizados en la elaboración de morteros.

Como en el caso de las características físicas, la EHE-08, establece limitaciones respecto a las sustancias contenidas en su composición. Un resumen de las restricciones se muestra en la Tabla 4.12:

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 4.12 Limitaciones químicas de los áridos según EHE.

4.2.1. Arena silícica

La arena silícica es un material que comúnmente se utiliza en la fabricación de morteros de albañilería, por lo que se ha elegido para las investigaciones desarrolladas en esta Tesis.

El árido seleccionado ha sido una arena silícica extraída en una cantera a cielo abierto que explota la empresa Arenas Industriales de Montorio S.A.

²⁰⁴ AENOR (2010). "UNE-EN 1744-1 Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos. Parte 1: Análisis químico". Madrid, Aenor.

(AIMSA), localizada en la comarca burgalesa de Odra-Pisuerga. La denominación comercial del producto es árido 0/4 silíceo rodado.

La arena fue suministrada en sacos por tamaños de 0/0,5; 0,5/1 y 1/2. Se trata de roca natural de aristas redondeadas, limpia de arcillas y materias orgánicas, compuesta por granos comprendidos entre los 0 mm y los 2 mm.



Figura 4.5 Arena Silícea.

A simple vista, la arena presenta un aspecto muy fracturado y un color que varía de grises con tintes amarillentos en los tamaños mayores, tornándose algo más rojizos a medida que los fragmentos son menores (Figura 4.5). La pureza silícea de la arena es alta, con valores medios del 98%.

Características de la arena		
Ensayo	Norma	Resultado
% de finos	UNE-EN 933-1:1998	0,78
Equivalente de arena	UNE-EN 933-1:1998	78
Densidad Real g/cm ³	UNE 83-1:1990	2,619
Coefficiente de Absorción Normal %	UNE 83-1:1990	15,0%
Densidad Real Satu. Sup. Seca gr/cm ³	UNE 83-1:1990	2,63
% Terrones de arcilla	UNE 133:1958	0,01
% Partículas de bajo Peso Especifico	UNE 7244:1971	0,00
Coefficiente de Forma del árido grueso	UNE 7244:1971	0,26
% Partículas blandas	UNE 7134-58	0,93
% Contenido total de Azufre (S)	UNE-EN 1744-1:1999	0,00
% Sulfatos solubles en ácidos (SO ₃)	UNE-EN 1744-1:1999	0,00
% Cloruros	UNE-EN 1744-1:1999	0,00
CLASIFICACIÓN DE LA ARENA		ARENA CUARCIFERA

Tabla 4.13 Características de la arena. (AIMSA).

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 4.14 FRX Arena. (AIMSA).

Las características facilitadas por el fabricante se muestran en la Tabla 4.13, el análisis químico realizado por Fluorescencia de Rayos X proporcionado por AIMSA se recoge en la Tabla 4.14.

Su análisis químico determina un contenido de SiO₂>97% y presenta una densidad de partículas de 2,6 gr/cm³, siendo la densidad aparente como árido de 1,6 gr/cm³.

En esta investigación se han sustituido las partículas menores de 0,063 mm por filler de naturaleza caliza, con el objetivo de facilitar la hidratación de las mezclas y mejorar la trabajabilidad y la retención de agua.

De igual modo, se incrementa la compacidad y se acelera el proceso de hidratación del C₃S y C₃A, con efectos beneficiosos sobre la resistencia mecánica y química del mortero²⁰⁵.

El filler utilizado es una calcita compuesta en su mayor parte por Carbonato de Calcio (CaCO₃), con una densidad de las partículas de 2,7 g/cm³ y una densidad aparente de 0,83 g/cm³.

4.2.2. Escoria blanca de Horno de Cuchara LF

Las escorias blancas utilizadas en el Trabajo de Investigación justifican su empleo por ser precisamente el objeto del presente estudio.

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 Cr²⁰⁶.

²⁰⁵ Fernández, Á. V. (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.

²⁰⁶ [Fuente: <http://www.tubosreunidosindustrial.com>]



Figura 4.6 Escoria blanca de Horno de Cuchara.

Este árido se mantiene en las instalaciones de la Escuela Politécnica Superior de Burgos, en el complejo de La Milanera, dentro del Laboratorio de Grandes Estructuras de Obra Civil. Permanecen en el laboratorio el tiempo necesario para que se pueda llegar a asegurar que se encuentran estabilizadas y envejecidas adecuadamente.

El aspecto que presentan, recogidas en pasteras, es homogéneo, una vez retirados los grandes restos de materiales impropios de naturaleza férrica. Su color es grisáceo claro y presenta numerosos restos metálicos (Figura 4.6).

4.2.2.1. Caracterización física

La escoria blanca LF utilizada en esta Tesis Doctoral es la misma que se ha utilizado en diferentes Tesis realizadas anteriormente. Las características que se recogen en la Tabla 4.15:

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 4.15 Caracterización física escoria blanca LF. (A. Rodríguez).

4.2.2.2. Caracterización química

De igual modo se recogen las características químicas en la Tabla 4.16:

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	0,00%

Tabla 4.16 Caracterización química escoria blanca LF. (A. Rodríguez).

También, se realiza un análisis por fluorescencia de rayos X (FRX), en el Laboratorio de Técnicas Instrumentales de la Universidad de Valladolid donde se obtienen los resultados de la Tabla 4.17:

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

Tabla 4.17 Composición química escoria blanca LF. Equipo Philips PW1480.
Fuente: Laboratorio de Técnicas Instrumentales. Universidad de Valladolid.

La escoria blanca analizada está compuesta en su mayor parte por silicatos y aluminatos cálcicos, junto con importantes concentraciones de óxido de cal y óxido de magnesio. La presencia de componentes de naturaleza metálica potencialmente contaminantes, como el níquel, zinc, cadmio, arsénico, mercurio o plomo no es significativamente elevada.

Por el contrario, los análisis muestran mayores concentraciones de cromo y manganeso, por lo que sería pertinente un estudio para comprobar su concentración en los lixiviados que pudieran producirse por el lavado de las escorias en los depósitos de almacenamiento y su posible implicación en la flora y fauna, así como para la vida humana.

Para completar el análisis químico se ha realizado un estudio semicuantitativo de la composición química elemental mediante Microanálisis por energía dispersa de rayos X.

Los datos y las gráficas confeccionadas por el equipo de trabajo quedan reflejados en la Figura 4.7 y en la Tabla 4.18:

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 4.18 Microanálisis por energía dispersa de rayos X. Escoria blanca LF.

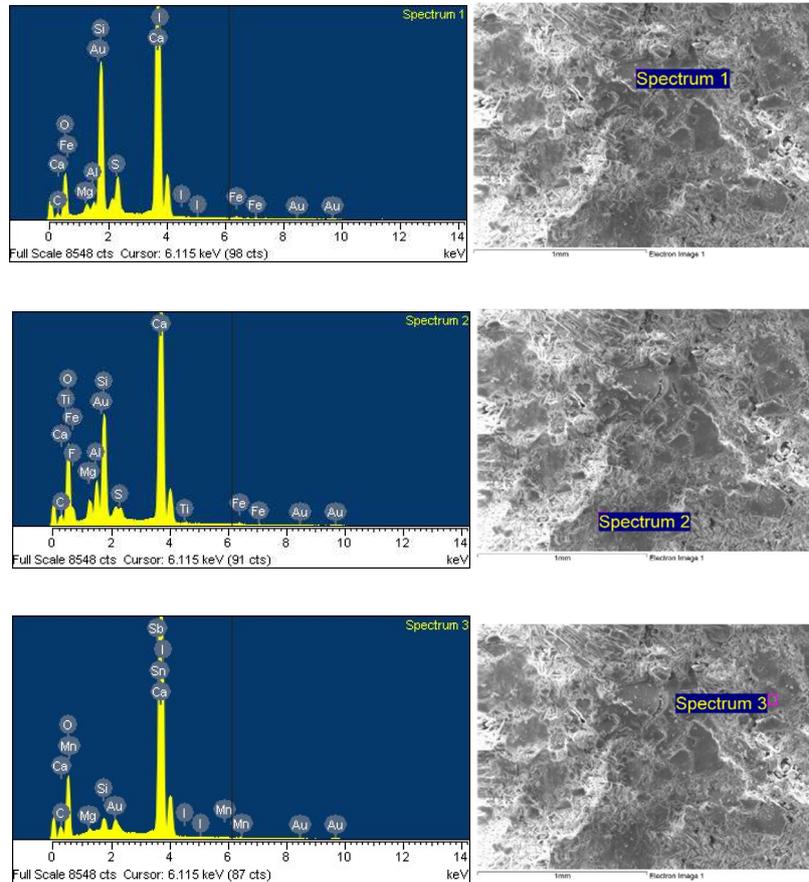


Figura 4.7 Microanálisis por energía dispersa de rayos X. Escoria blanca LF (de arriba abajo: Spectrum 1 LF, Spectrum 2 LF, Spectrum 3 LF).

4.2.2.3. Composición cristalina y mineralógica

Para conocer la composición cristalina y mineralógica se empleó la técnica de análisis por Difracción de Rayos X en el Laboratorio de Técnicas Instrumentales de la Universidad de Valladolid. Los datos obtenidos están recogidos en la Tabla 4.19:

Difracción de Rayos X (DRX). Escoria blanca LF		
Calcio-olivino	Ca_2SiO_4	M
Trialuminato pentacálcico y Mayenita	A_3C_5	T
Calcita	CO_3Ca	A
Portlandita	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	A
Periclasa	MgO	B

Concentración estimada: A= Alta; M= Media; B= Baja; T= Trazas

Tabla 4.19 Difracción de rayos X (DRX) escoria blanca LF. Equipo Philips PW1830. Fuente: Laboratorio de Técnicas Instrumentales. Universidad de Valladolid.

Se completa este análisis mediante la Microscopía Electrónica de Barrido (MEB), también denominada como Scanning Electron Microscope (SEM) (Figura 4.8).

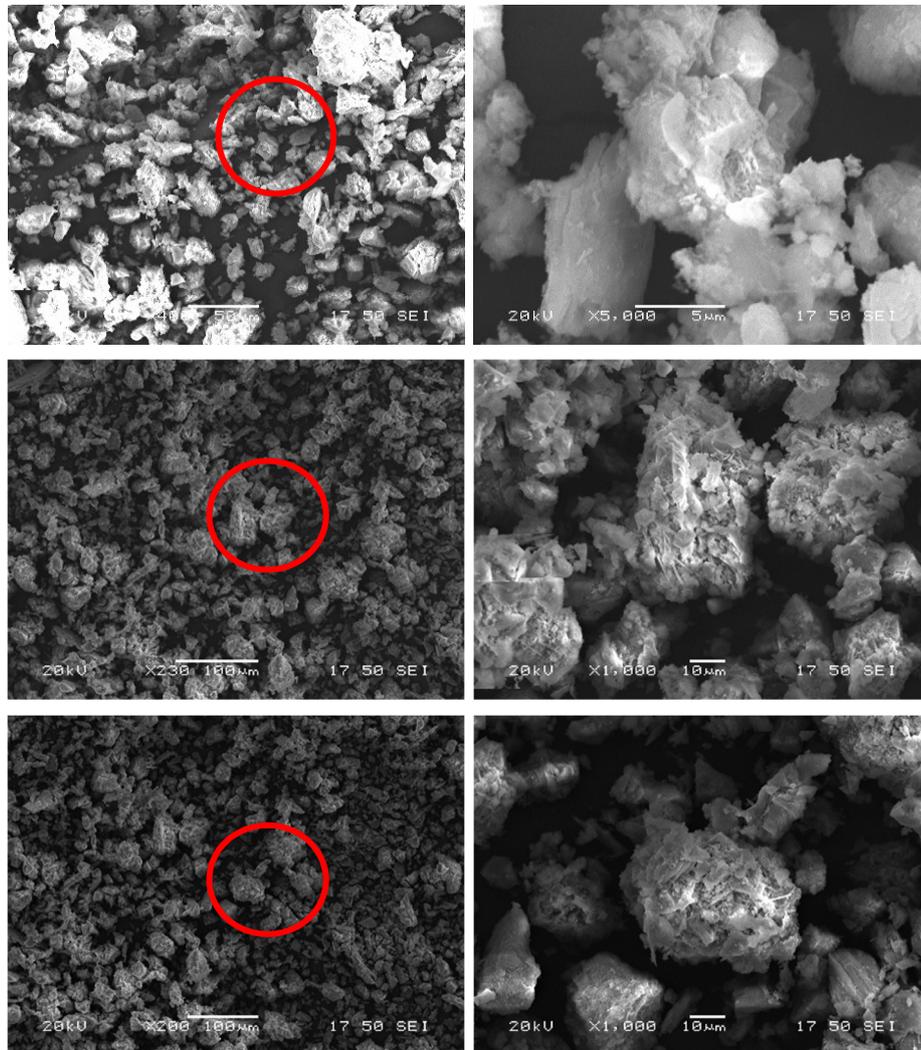


Figura 4.8 Microscopía electrónica de barrido. Escoria blanca LF (de arriba abajo: zona 1, zona 2 y zona 3).

4.2.3. Escoria negra de Horno Eléctrico de Arco EAF

La utilización de la escoria negra de horno de arco eléctrico se justifica por el mismo motivo que la escoria blanca. El árido se encuentra en las mismas instalaciones y también se consideran estabilizadas.

La escoria negra procede de la planta de áridos reciclados que la empresa HORMOR Áridos²⁰⁷, del grupo Hormigones y Morteros Agote SL, tiene en Zestoa (Guipúzcoa). Proviene de la acería Corrugados Azpeitia.



Figura 4.9 Escoria negra de Horno de Arco Eléctrico.

La escoria negra seleccionada para la investigación tiene color negro, aspecto homogéneo y contiene numerosos restos metálicos (Figura 4.9).

4.2.3.1. Caracterización física

Los resultados de la caracterización físico-mecánica de la escoria negra EAF se recogen en la Tabla 4.20.

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

Tabla 4.20 Caracterización física escoria negra EAF. (Grupo Etxeberria).

²⁰⁷ [Fuente: <http://www.grupoetxeberria.com/>]

4.2.3.2. Caracterización química

La composición química de la escoria negra se muestra en la Tabla 4.21:

Caracterización química escoria negra EAF	
Propiedad	Árido siderúrgico
Terrones de arcilla, materia orgánica	0,04%
Material retenido por el tamiz 0,063 y que flota en un líquido de peso específico 2	0,01%
Contenido en compuestos totales de azufre (%S)	0,23%
Contenido de sulfatos solubles en ácido (%SO ₃)	0,12%
Contenido en Cloruros	0,012%
Contenido de Óxido de Magnesio	3,2%
Desintegración por el Silicato Bicálcico	Estable
Reactividad álcali- silicato	No reactivo
Pérdida de peso máxima experimentada por los áridos al ser sometidos a 5 ciclos de tratamiento SO ₄ Mg	1,90%

Tabla 4.21 Composición química de la escoria negra. (Grupo Etxeberria).

Como en el caso de la escoria blanca LF, el análisis de la escoria negra EAF se compete con el estudio de su composición mediante Florescencia de Rayos X (FRX), obteniendo los resultados mostrados en la Tabla 4.22:

Fluorescencia de Rayos X (FRX) Composición de óxidos mayoritarios de la escoria negra EAF	
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 4.22 Fluorescencia de rayos X. Escoria negra (EAF). Equipo Philips PW1480.
Fuente: Laboratorio de Técnicas Instrumentales. Universidad de Valladolid.

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%.

De igual forma, se realiza un Microanálisis por Energía Dispersa de Rayos X. Los datos y las gráficas correspondientes a este estudio se muestran en la Figura 4.10 y en la Tabla 4.23.

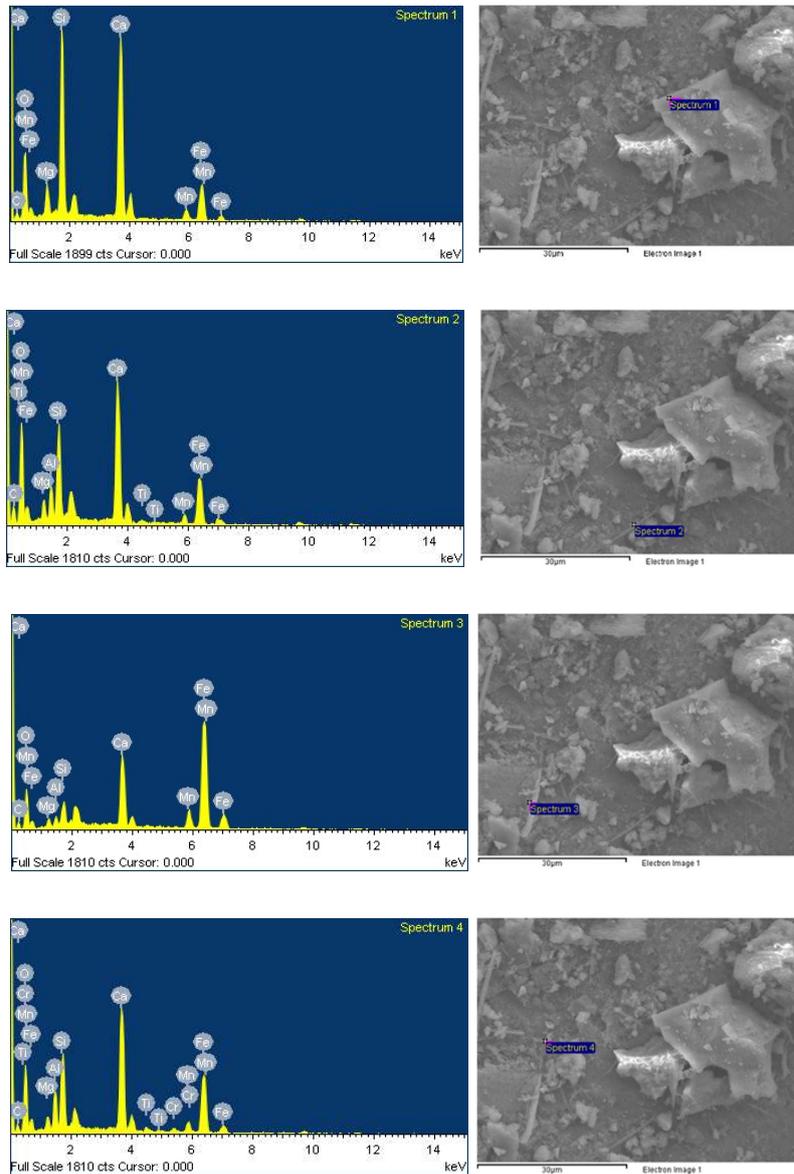


Figura 4.10 Microanálisis por energía dispersa de rayos X. Escoria negra EAF (de arriba abajo Spectrum 1 EAF, Spectrum 2 EAF, Spectrum 3 EAF, Spectrum 4 EAF).

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 los óxidos de calcio y magnesio.

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 4.23 Microanálisis por energía dispersa de rayos X. Escoria negra EAF.

4.2.3.3. Composición cristalina y mineralógica

Para conocer la composición cristalina y mineralógica se empleó la técnica de análisis por Difracción de Rayos X en el Laboratorio de Técnicas Instrumentales de la Universidad de Valladolid. Los datos obtenidos están recogidos en la Tabla 4.24.

Difracción de Rayos X (DRX). Escoria Negra (EAF)		
Gelenita	$\text{Ca}_2\text{Al}(\text{AlSiO}_7)$	A
Magnetita	Fe_3O_4	B-M
Westita	FeO	B

Concentración estimada: A= Alta; M= Media; B= Baja; I= Indicios

Tabla 4.24 Difracción de Rayos X. Escoria negra EAF. Equipo Philips PW1830. Fuente: Laboratorio de Técnicas Instrumentales. Universidad de Valladolid.

Se completa este análisis mediante la Microscopía Electrónica de Barrido (MEB). A continuación, se muestran imágenes captadas por el microscopio a diferentes distancias de trabajo y en distintas ubicaciones o zonas (Figura 4.11), de las escorias negras 0/2.

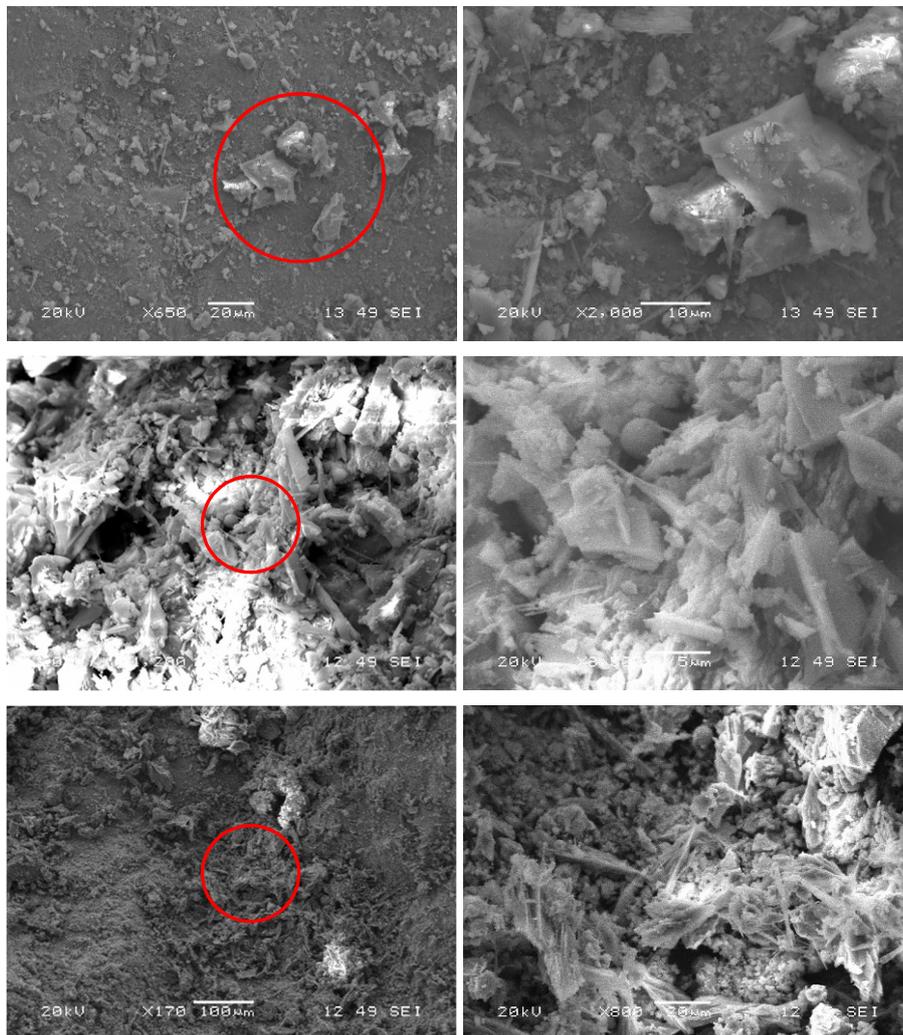


Figura 4.11 Microscopía electrónica de barrido. Escoria negra EAF (de arriba abajo: zona 1, zona 2 y zona 3).

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 magnesia.

4.3. ADITIVOS

Para mejorar el comportamiento de los morteros se utilizan aditivos. La Norma UNE-EN 934-3 "Aditivos para hormigones, morteros y pastas. Parte 3: Aditivos para morteros para albañilería. Definiciones, requisitos, conformidad, marcado y etiquetado"²⁰⁸ define aditivo como "el material añadido en pequeñas cantidades antes, durante o en un amasado complementario, para obtener las modificaciones especificadas de las propiedades".

Características de los aditivos	
Tipo de aditivo	Nombre comercial del aditivo
Polímeros acrílicos	MasterSeal 600 (Antes: THORO ACRYL 60)
Superplastificante	MasterRheobuild 2100 (Antes: Rheobuild 2100)

Tabla 4.25 Características de los aditivos empleados.

Los aditivos utilizados son polímeros sintéticos y acrílicos suministrados por la empresa BASF Construction Chemicals España, S.L.



Figura 4.12 Aditivos.

Los aditivos se suministran en estado líquido (Figura 4.12) y su dosificación se realiza siguiendo las recomendaciones indicadas por el fabricante y de acuerdo con las dosis ensayadas previamente en el laboratorio.

²⁰⁸ 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.

4.3.1. MasterSeal 600

MasterSeal 600 es una formulación especial a base de polímeros acrílicos y agentes modificadores, diseñada como aditivo para mezclas cementosas y demás materiales de construcción altamente alcalinos. Puede utilizarse en morteros como capa de adherencia de un revestimiento, en este aspecto sirve:

Para proporcionar adherencia mecánica antes de la aplicación de un revestimiento cementoso sobre materiales densos o lisos, tales como el hormigón, bloque de hormigón, ladrillo de cemento, ladrillo mecánico y bloques densos de arcilla.

4.3.2. MasterRheobuild 2100

MasterRheobuild 2100 es un producto líquido a base de polímeros sintéticos de melamina que está exento de cloruros y de otros tipos de sustancias que pudieran producir corrosión de las armaduras.

Aporta altas resistencias iniciales, como reductor *a/c*, y resistencias finales muy elevadas. Además, permite realizar morteros impermeables, ya que actúa sobre los factores fundamentales de la permeabilidad del mortero, los cuales son el exceso de agua de amasado y las coqueas debidas a una mala trabajabilidad.

4.4. AGUA

El agua empleada para la fabricación de morteros sirve si es apta para el consumo y si es habitualmente utilizada y suministrada en la red de agua potable. Ésta deber ser inocua y sin elementos perjudiciales que afecten a las propiedades del mortero.

Por ello no puede contener sustancias solubles que puedan producir eflorescencias, no debe contener sulfatos o cloruros, ni tampoco sustancias de carácter orgánico.

La Tabla 4.26 y Tabla 4.27 muestran las características del agua utilizada para el amasado de los morteros. Se trata del agua potable suministrada por la Empresa Sociedad Municipal de Aguas de Burgos, S.A.U.

Análisis microbiológico		
Parámetro	Unidades	Valor
Escherichia coli	UFC en 100 ml.	0
Enterococos	UFC en 100 ml.	0
Clostridium perdringens	UFC en 100 ml.	0
Bacterias coliformes	UFC en 100 ml.	0
Recuento de colonias (22°C)	UFC en 1 ml.	5

Tabla 4.26 Análisis microbiológico. Año 2015. (Servicio de Aguas).

Capítulo IV

Análisis fisicoquímico		
Parámetro	Unidades	Valor
Olor	Índice de dilución	2
Color	Índice de dilución	2
Sabor	Mg/l Pt/Co	<1,0
pH	Udes.pH	8,20
Turbidez	UNF	<0,20
Conductividad	µS/cm	102,8
Nitratos	Mg/l	<1,0
Nitritos	Mg/l	<0,02
Amonio	Mg/l	<0,05
Cloro libre residual	Mg/l	0,4
Fluoruro	Mg/l	<0,10
Sodio	Mg/l	2,8
Cloruro	Mg/l	<10
Sulfato	Mg/l	<0,20
Calcio	Mg/l	16,0
Dureza total	°F	4,6
Bicarbonato	Mg/l	52,1
Hierro	µg/l	<50
Aluminio	µg/l	29
Cobre	µg/l	<0,001
Suma de trihalometanos	µg/l	<20
Índice de Langelier	-	-0,4

Tabla 4.27 Análisis fisicoquímico. Año 2015. (Servicio de Aguas).

Esta agua está destinada al consumo humano y es suministrada por el propio Ayuntamiento, a través de la Empresa Municipal de Aguas de la ciudad. No presenta ningún tipo de impurezas y puede observarse como su tratamiento es totalmente adecuado. 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.

Ninguno de los parámetros analizados se encuentra en concentraciones tales que pudieran influir sobre la actividad experimental que se va a proceder, por lo que se considera perfectamente adecuada para ser empleada como agua de amasado de los morteros, así como para la realización de los diferentes experimentos en que sea requerido.

CAPITULO V

Fase experimental previa



5. FASE EXPERIMENTAL PREVIA

5.1. INTRODUCCIÓN

La principal característica de las estructuras de ingeniería es su fiabilidad cuando están sometidas a la acción de esfuerzos externos, respondiendo a éstos de acuerdo con el diseño de su capacidad resistente. Es por ello por lo que el estudio del comportamiento mecánico de los materiales es esencial para el progreso de la ciencia y la tecnología de las estructuras.

La permanencia en el tiempo hasta nuestros días de construcciones realizadas en el Antiguo Egipto o en el Imperio Romano, es un claro ejemplo de proyectos exitosos. En la antigüedad los métodos de comprobación se basaban en el modo de prueba y error, es indudable que muchos más edificios y estructuras tuvieron un periodo más corto de vida, por lo que estos diseños no fueron tan exitosos.

Los procesos de diseño y cálculo de las estructuras de ingeniería se han desarrollado en el tiempo en muchos casos aprendiendo de fallos catastróficos, colapsos producidos de forma inesperada y, en muchos casos, dramática.

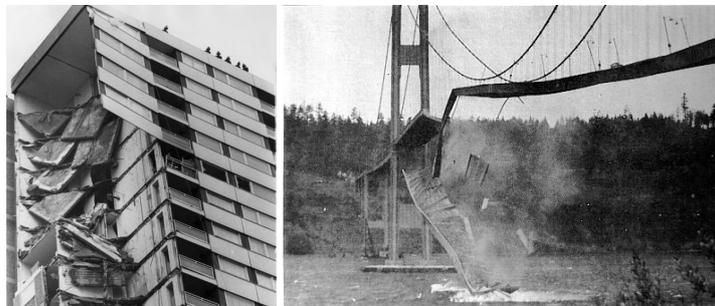


Figura 5.1 Fallos catastróficos: Torre Ronan Point (izquierda) y Puente Tacoma Narrows (derecha).

Se pueden poner numerosos ejemplos de fallos (Figura 5.1), diseños poco fiables y que no evitaron catástrofes como la de la torre Ronan Point (1962), cuyos ladrillos fallaron por colapso progresivo, el del Centro de Exhibición de Bucarest (1994), donde la estructura metálica del edificio falló por pandeo bajo carga de nieve, o la del puente Tacoma Narrows, donde el colapso se produjo por cargas inducidas por el viento (1940).

No obstante, los avances y cambios tecnológicos introducen continuamente nuevos desafíos a la ingeniería del diseño, demandando un uso más eficiente de los materiales y la utilización de diseños avanzados. El desarrollo de nuevos productos conduce a nuevos requisitos con

respecto a la calidad, fiabilidad, durabilidad o el consumo mínimo de materiales.

Además de los fallos estructurales comentados, la presencia de fracturas y fisuras en las caras de los edificios indican potenciales patologías. El estrés provocado por los movimientos diferenciales de los elementos estructurales del edificio, las tensiones producidas por el contraste de temperaturas, los fenómenos de humedad-sequedad o las que afectan a las prestaciones y durabilidad de los morteros que los cubren²⁰⁹.

La fisuración es probablemente la lesión más frecuente en los tabiques y muros de ladrillo, unidades constructivas muy utilizadas en edificación. Aunque no afectan a la integridad estructural del edificio, las lesiones por fisuración suman alrededor del 40% de los defectos señalados, y consumen un porcentaje muy elevado de inversiones destinadas al mantenimiento y conservación de las edificaciones.

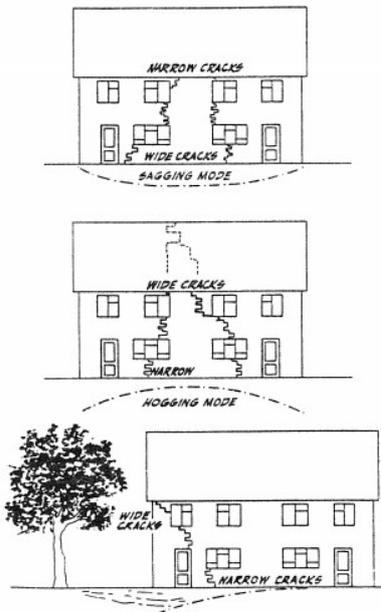


Figura 5.2 Algunos patrones de fisuración. (M. Atkinson)²¹⁰.

Las fracturas y fisuras contribuyen al efecto multiplicador agresivo de los agentes externos que afectan a la durabilidad de los materiales, como el agua de lluvia, las bajas temperaturas y la presencia de humedad y

²⁰⁹ Kim, J. J., T. Fan, M. M. R. Taha and N. G. Shrive (2012). "The effect of damage and creep interaction on the behaviour of masonry columns including interface debonding and cracking." *Materials and structures* **45**(1-2): 15-29.

²¹⁰ Atkinson, M. F. (2003). *Structural defects reference manual for low-rise buildings*, CRC Press.

sequedad, lo que produce importantes daños en los revestimientos y en sus propiedades térmicas y acústicas²¹¹.

El análisis de la fisuración de un edificio es un trabajo que en la actualidad se realiza de forma casi artesanal, ya que para determinar las causas que los producen se utilizan procedimientos que se basan en la experiencia o en su comparación con patrones patológicos conocidos (Figura 5.2). El método de análisis es cualitativo y su éxito depende en gran medida del buen criterio y de la experiencia del técnico que lo aplica.

Por estas razones, la primera fase de la investigación consiste en la determinación del comportamiento a la Tenacidad a la Fractura y la Resistencia a Compresión de los morteros bastardos, diseñados en función de la cantidad de cal y cemento dosificada en las mezclas, con sustitución total o parcial del árido natural por escorias blancas o negras.

Con el objetivo de poder realizar todos los ensayos en un tiempo razonable, y hacerlo con un consumo racional de los materiales utilizados, la programación y temporización de las actividades se apoya en la posibilidad de desarrollar un trabajo experimental utilizando técnicas de análisis matemático de predicción, como es el Método de Superficie de Respuesta.

Esta parte de la Tesis Doctoral tiene su fundamento en los estudios realizados en el Trabajo Final del Máster en Durabilidad e Integridad de Materiales Componentes y Estructuras, de título "*Análisis de las propiedades a fractura de morteros bastardos fabricados con residuos siderúrgicos para su uso en construcción*"²¹².

5.2. APLICACIÓN DEL DISEÑO DE EXPERIMENTOS

El estudio de morteros dosificados con diferentes cantidades de cal y cemento, así como elaborados con una sustitución progresiva de árido natural por escoria blanca o escoria negra genera un elevado número de mezclas a analizar. Además, de todas las combinaciones que se podrían seleccionar es posible que se queden sin estudiar dosificaciones con propiedades idóneas.

Por ello, con el Diseño de Experimentos se pretende reducir el número de pruebas sin perder información útil, y de igual modo poder obtener esta información de dosificaciones teóricas que no se hayan podido analizar en el laboratorio.

²¹¹ Valluzzi, M. R., L. Binda and C. Modena (2005). "Mechanical behaviour of historic masonry structures strengthened by bed joints structural repointing." *Construction and Building Materials* **19**(1): 63-73.

²¹² García-Cuadrado, J. (2014). *Análisis de las propiedades a fractura de morteros bastardos fabricados con residuos siderúrgicos para su uso en construcción*, Escuela Politécnica Superior. Universidad Politécnica de Burgos, Spain.

El Método de Superficies de Respuesta con su Diseño Central Compuesto se emplea para examinar la Tenacidad a la Fractura y la Resistencia a Compresión en función de los siguientes factores clave, los cuales van a gobernar en esta investigación la superficie de respuesta:

Porcentaje de conglomerante (%C): Se analiza el comportamiento de los morteros diseñados en función de las cantidades de cal y cemento dosificadas como conglomerantes en las mezclas. Este porcentaje oscila desde un mortero con gran cantidad de cal (75% cal y 25% cemento) a un mortero con mayor cantidad de cemento (25% cal y 75% cemento). De este modo se puede estudiar cómo cambian las propiedades con la sustitución progresiva de cal por cemento.

Edad de curado (EC): El curado del mortero produce importantes cambios en su estructura interna y en el comportamiento del material. Este parámetro varía desde los 7 días de curado, estudio del mortero en sus primeras edades, hasta los 56 días, con determinación de valores intermedios a los 28 días, edad de referencia establecida por la normativa.

Tipo de árido (TA): Se utiliza esta variable para estudiar la mezcla de áridos, comprobando el efecto que produce la sustitución parcial de la arena natural (NA) por escoria blanca (LF) o escoria negra (EAF). El valor mínimo corresponderá al mortero patrón dosificado con árido natural y el valor máximo a la sustitución total, mortero confeccionado al 100% con árido siderúrgico. También se realiza un experimento en el que se utiliza un mortero con 100% escoria blanca, sustituyendo ésta progresivamente por escoria negra.

La Tabla 5.1 recoge los rangos definidos anteriormente de los tres parámetros variables:

Parámetros variables		
% de conglomerante (%C)	-1	A (75% cal y 25% cemento)
	0	B (50% cal y 50% cemento)
	1	C (25% cal y 75 cemento)
Edad de curado (EC)	-1	7 días
	0	28 días
	1	56 días
Tipo de árido (TA)	-1	0% de sustitución
	0	50% de sustitución
	1	100% de sustitución

Tabla 5.1 Parámetros variables en el estudio de experimentos.

No se tiene en cuenta la incorporación del valor axial del diseño (α), debido a que esté tomaría valores no razonables para esta investigación, como podría ser una edad de curado menor de siete días, una sustitución negativa de árido o porcentajes de mezcla de conglomerante no habituales en los morteros.

En la Tabla 5.2 se muestra la Matriz de Experimentos con las variables codificadas y la matriz del Plan de Experimentación, con los valores de los

factores del diseño de experimentos propuesto para la determinación de los coeficientes de la función f (%C*, EC*, TA*).

N.º Exp.	Matriz de experimentos (Variables codificadas)			Plan de experimentación (Variables reales)		
	%C*	EC*	TA*	%C	EC	TA
1	-1	-1	-1	A	7	0 %
2	1	-1	-1	C	7	0 %
3	-1	1	-1	A	56	0 %
4	1	1	-1	C	56	0 %
5	-1	-1	1	A	7	100 %
6	1	-1	1	C	7	100 %
7	-1	1	1	A	56	100 %
8	1	1	1	C	56	100 %
9	-1	0	0	A	28	50 %
10	1	0	0	C	28	50 %
11	0	-1	0	B	7	50 %
12	0	1	0	B	56	50 %
13	0	0	-1	B	28	0 %
14	0	0	1	B	28	100 %
15	0	0	0	B	28	50 %

Tabla 5.2 Diseño propuesto para obtener la superficie de la respuesta de cada uno de los coeficientes.

De este modo, la función $f(x_1^*, x_2^*, x_3^*)$ (Ecuación 3.1) se puede expresar como $f(\%C^*, EC^*, TA^*)$ (Ecuación 5.1), donde f se postula como modelo cuadrático donde %C*, EC* y TA* son las variables codificadas de %C, EC y TA respectivamente:

Ecuación 5.1

$$f(\%C^*, EC^*, TA^*) = b_0 + b_1 \cdot \%C^* + b_2 \cdot EC^* + b_3 \cdot TA^* + b_{11} \cdot \%C^{*2} + b_{22} \cdot EC^{*2} + b_{33} \cdot TA^{*2} + b_{12} \cdot \%C^* \cdot EC^* + b_{13} \cdot \%C^* \cdot TA^* + b_{23} \cdot EC^* \cdot TA^*$$

Debido a que el Diseño de Experimentos establecido solo permite estudiar la sustitución progresiva de un árido por otro, para analizar todas las posibles sustituciones de arena por escoria es necesario realizar tres experimentos independientes.

- Plan de Experimentación o Experimento 1 (NA-LF): Sustitución progresiva de arena natural (NA) por escoria blanca (LF).
- Plan de Experimentación o Experimento 2 (NA-EAF): Sustitución progresiva de arena natural (NA) por escoria negra (EAF).
- Plan de Experimentación o Experimento 3 (LF-EAF): Sustitución progresiva de escoria blanca (LF) y escoria negra (EAF).

Los parámetros de aplicación de cada experimento vienen reflejados en la Tabla 5.3:

Parámetros variables en el rango [-1,1]				
		Plan de Experimentación 1: NA-LF	Plan de Experimentación 2: NA-EAF	Plan de Experimentación 3: LF-EAF
% de conglomerante (%C)	-1 0 1	Mortero tipo A (75% cal y 25% cemento) Mortero tipo B (50% cal y 50% cemento) Mortero tipo C (25% cal y 75 cemento)		
Tiempo de curado (EC)	-1 0 1	7 días 28 días 56 días		
Tipo de árido (TA)	1 0 1	100% NA 50% NA y 50% LF 100% LF	100% NA 50% NA y 50% EAF 100% EAF	100% LF 50% LF y 50% EAF 100% EAF

Tabla 5.3 Parámetros variables en el rango [-1,1] para los tres planes de experimentación de morteros.

5.3. SELECCIÓN DE LAS DOSIFICACIONES

De este modo se estudian un total de dieciocho dosificaciones, utilizando para identificarlas la siguiente designación:

- BAS (Mb): Ya que se trata de un mortero bastado con mezcla de cal y cemento en diferentes porcentajes.
- Seguido de una letra mayúscula (A, B, C) que hace referencia al porcentaje de cal y cemento en la cantidad de conglomerante. A (75% cal y 25% cemento), B (50% cal y 50% cemento) y C (25% cal y 75% cemento).
- Seguido del tipo de árido: NA (Ar) para el árido natural, LF (Eb) para la escoria blanca y EAF (En) para la escoria negra. Así como las dos designaciones separadas con una barra (/) para las dosificaciones que mezclan dos tipos de áridos.

No existe una norma específica que establezca las dosificaciones a utilizar en cada caso. Por ello, para el diseño de las mezclas se han seguido las prescripciones establecidas en los manuales de operación de las empresas de fabricación de morteros.

Relaciones en peso de morteros para construcción						
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 5.4 Dosificaciones y nomenclatura utilizada para los morteros estudiados en la fase de experimentación previa.

En la Tabla 5.4 se recogen las recomendaciones referidas a la relación de componentes en peso (conglomerante/árido) utilizadas en la práctica constructiva habitual.

Por ello, todas las dosificaciones son configuradas con una proporción (1:6:W), mostrándose en la Tabla 5.5 los porcentajes en peso de los distintos conglomerantes y áridos utilizados.

Dosificaciones y nomenclatura utilizada en la fase de experimentación previa										
Designación				Dosificación						
				% Cal	% Cemento	% Arena Silícea	% Escoria Blanca (LF)	% Escoria Negra (EAF)		
75	25	NA	BAS-A-NA	1/6	75	25	100	-	-	
75	25	LF	BAS-A-LF				-	100	-	
75	25	EAF	BAS-A-EAF				-	-	100	
75	25	NA	LF				BAS-A-NA/LF	50	50	-
75	25	NA	EAF				BAS-A-NA/EAF	50	-	50
75	25	LF	EAF				BAS-A-LF/EAF	-	50	50
50	50	NA	BAS-B-NA	1/6	50	50	100	-	-	
50	50	LF	BAS-B-LF				-	100	-	
50	50	EAF	BAS-B-EAF				-	-	100	
50	50	NA	LF				BAS-B-NA/LF	50	50	-
50	50	NA	EAF				BAS-B-NA/EAF	50	-	50
50	50	LF	EAF				BAS-B-LF/EAF	-	50	50
25	75	NA	BAS-C-NA	1/6	25	75	100	-	-	
25	75	LF	BAS-C-LF				-	100	-	
25	75	EAF	BAS-C-EAF				-	-	100	
25	75	NA	LF				BAS-C-NA/LF	50	50	-
25	75	NA	EAF				BAS-C-NA/EAF	50	-	50
25	75	LF	EAF				BAS-C-LF/EAF	-	50	50

Tabla 5.5 Dosificaciones y nomenclatura utilizada para los morteros estudiados en la fase de experimentación previa.

5.4. PROCEDIMIENTO OPERATORIO

5.4.1. Preparación de los materiales

Para el diseño de las líneas granulométricas de los áridos utilizados (arena, filler calizo, escoria EAF y escoria LF), se seleccionan los tamaños correspondientes a la serie de tamices normalizada (Figura 5.3).



Figura 5.3 Áridos empleados: Árido natural con filler calizo (izquierda), escoria blanca (centro) y escoria negra (derecha).

Se diseña una línea granulométrica homogénea para los tres tipos de áridos, de forma que su Módulo de Finura sea idéntico ($MF = 1,95$). De esta forma, la demanda de agua en las mezclas será aproximadamente la misma. La distribución granulométrica se muestra en la Tabla 5.6.

Línea granulométrica utilizada			
Tamiz (mm)	Retenido (%)		Pasa (%) Acumulado
	Parcial	Acumulado	
4,000	0,00	0,00	100,00
2,000	0,00	0,00	100,00
1,000	15,00	15,00	85,00
0,500	20,00	35,00	65,00
0,250	25,00	60,00	40,00
0,125	25,00	85,00	15,00
0,063	10,00	95,00	5,00
< 0,063	5,00	100,00	0,00

Tabla 5.6 Línea granulométrica utilizada.

Como se puede observar en el Gráfico 5.1, la Línea Granulométrica diseñada se encuentra entre los límites de la antigua Norma Básica de la Edificación FL-90, pero no entre los límites de referencia de la Instrucción de Hormigón Estructural EHE 2008.

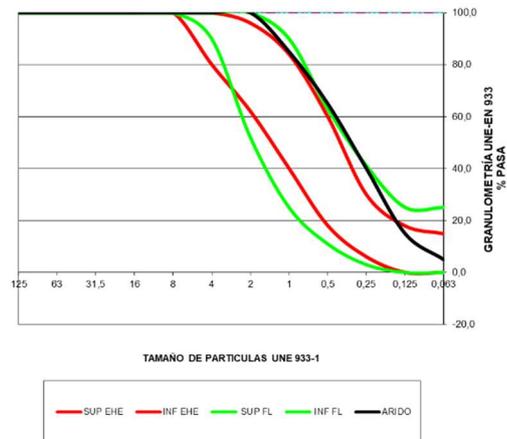


Gráfico 5.1 Línea granulométrica utilizada.

No obstante, como esta última está referida a las arenas utilizadas en la fabricación de hormigones, se considera aceptable la distribución diseñada ya que, aunque no está vigente, la NBE FL-90 sigue siendo una buena referencia para el estudio de los morteros utilizados en fábrica de albañilería. Como se puede observar, la configuración granulométrica de la arena diseñada está muy compensada, con una graduación de tamaños que garantiza el cierre de los huecos dejados por los más gruesos.

5.4.2. Amasado del mortero

Los componentes secos del mortero, conglomerantes y árido, se mezclan manualmente hasta conseguir un componente homogéneo. Posteriormente se introduce en el depósito de una amasadora normalizada tipo (Figura 5.4) y se añade el agua necesaria.



Figura 5.4 Amasadora mecánica programable.

La amasadora dispone de un programa operativo que secuencia los movimientos de rotación de la pala y añade el árido al recipiente, de acuerdo con los tiempos determinados en la norma.

En la investigación se determina un tiempo de amasado de 90 segundos para todas las mezclas. Tanto el tiempo de amasado como la frecuencia de giro de la pala están programados, de acuerdo con lo establecido en la *Norma UNE-EN 1015-2*.

5.4.3. Preparación de las muestras

Para la preparación de las mezclas se ha establecido el criterio de añadir el agua de amasado necesaria para conseguir una consistencia plástica (175 ± 10 mm) en la mesa de sacudidas. De todos los morteros diseñados se ha determinado su densidad en estado fresco, así como el aire ocluido en las mezclas.

Resumen de propiedades en estado fresco			
Designación	a/c	Densidad M. Fresco (kg/m ³)	Cantidad aire ocluido (%)
BAS-A-NA	1,28	2.020	4,80
BAS-A-LF	2,54	1.608	9,30
BAS-A-EAF	1,15	2.463	4,20
BAS-A-NA/LF	1,95	1.858	5,80
BAS-A-NA/EAF	1,29	2.252	3,60
BAS-A-LF/EAF	1,84	1.983	6,30
BAS-B-NA	1,20	2.052	6,20
BAS-B-LF	2,45	1.675	11,50
BAS-B-EAF	1,08	2.502	5,80
BAS-B-NA/LF	1,89	1.869	8,40
BAS-B-NA/EAF	1,21	2.280	6,10
BAS-B-LF/EAF	1,73	2.001	9,00
BAS-C-NA	1,13	2.069	7,40
BAS-C-LF	2,38	1.691	11,90
BAS-C-EAF	1,02	2.522	6,90
BAS-C-NA/LF	1,82	1.888	9,80
BAS-C-NA-EAF	1,14	2.294	7,10
BAS-C-LF/EAF	1,66	2.024	9,40

Tabla 5.7 Resumen de propiedades en estado fresco de los morteros estudiados.

La Tabla 5.7 recoge las propiedades en estado fresco de los morteros estudiados, que permiten observar que:

- La relación agua/conglomerante es mayor a medida que se utilizan volúmenes mayores de cal.

- Si se examina el tipo de árido en las diferentes mezclas se observa que, en todos los casos, la escoria blanca demanda una mayor cantidad de agua de amasado en el mortero para conseguir una buena trabajabilidad, mientras que la escoria negra precisa de menores cantidades de agua para conseguir la consistencia plástica de diseño.
- Existe una relación directa entre la densidad del mortero y su contenido de aire ocluido. Los morteros que incorporan escoria negra en su composición son de una mayor densidad.

En el Artículo en revisión de la Revista *Construction & Building Materials* de Título "*Caracterización de morteros bastardos fabricados con escorias siderúrgicas y estudio de sus propiedades mediante el Método de Superficie de Respuesta*"²¹³, se recoge un estudio minucioso de las propiedades en estado fresco y endurecido de los morteros objeto de experimentación en esta Tesis Doctoral, en relación con la validación de la aplicación del Método de Superficies de Respuesta para la caracterización de sus propiedades.

Una vez preparadas las mezclas, se elaboran las probetas normalizadas de mortero, de acuerdo con las especificaciones de fabricación. Los moldes se rellenan en dos capas y se compactan con un pisón.



Figura 5.5 Piezas plásticas para la realización de las entallas y molde metálico para la realización de las probetas.

Para la fabricación de las probetas con entalla se han posicionado unas pequeñas piezas de plástico en forma de L, que quedan embebidas en el mortero (Figura 5.5). Para la investigación se han moldeado seis probetas, tres con una entalla de 4,8 mm y otras tres con una entalla de 6,4 mm, con el fin de realizar el Ensayo de Fractura en ambos casos.

²¹³ García-Cuadrado, J., S. Gutiérrez-González, I. Santamaria-Vicario and A. Rodríguez, & Calderón, V. (En revisión). "Characterization of lime-cement mortars manufactured with steel-making waste aggregate and the study of their properties by means of response surface methodology." *Construction and Building Materials*.

A continuación, se introducen en la cámara húmeda, en un ambiente de 20° de temperatura y 95% de humedad. Parte de las probetas se ensayan a 7 días y el resto se introducen en una cámara de curado, en un ambiente de 20° de temperatura y 50% de humedad, para garantizar su correcto fraguado y endurecimiento (Figura 5.6).



Figura 5.6 Cámara húmeda (izquierda) y cámara de curado (derecha).

Una vez curadas las probetas, se realizan los ensayos en estado endurecido correspondientes de acuerdo con la normativa de aplicación.

Los resultados de densidad aparente seca y absorción de agua a presión atmosférica, ambas determinadas a los 28 días, se muestran en la Tabla 5.8:

Resumen de propiedades en estado endurecido		
Designación	Densidad M. Endurecido (kg/m ³)	Absorción de agua (%)
BAS-A-NA	1.761	13,04
BAS-A-LF	1.295	30,23
BAS-A-EAF	2.159	14,45
BAS-A-NA/LF	1.527	24,25
BAS-A-NA/EAF	1.912	16,11
BAS-A-LF/EAF	1.650	23,50
BAS-B-NA	1.812	13,49
BAS-B-LF	1.326	29,67
BAS-B-EAF	2.237	12,93
BAS-B-NA/LF	1.507	22,93
BAS-B-NA/EAF	2.005	13,15
BAS-B-LF/EAF	1.650	21,90
BAS-C-NA	1.872	12,50
BAS-C-LF	1.357	29,84
BAS-C-EAF	2.293	11,55
BAS-C-NA/LF	1.614	20,67
BAS-C-NA-EAF	2.082	11,59
BAS-C-LF/EAF	1.747	18,70

Tabla 5.8 Resumen de propiedades en estado endurecido de los morteros estudiados.

5.5. ESTUDIO DE LA TENACIDAD A LA FRACTURA

La Energía de Fractura es el parámetro fundamental que se estudia cuando se hace referencia a la tenacidad de un hormigón o mortero²¹⁴.

Durante muchos años se ha considerado al mortero y al hormigón materiales frágiles cuando están sometidos a esfuerzos de tracción. Son numerosos los trabajos que han intentado aplicar los principios de la mecánica de fractura para el estudio de las fisuras macroscópicas que se producen en estos materiales cuando están sometidos a esfuerzos, encontrando muchas dificultades por la heterogeneidad en su composición.

Sin embargo, algunos investigadores han analizado la fisuración en elementos constructivos de edificación utilizando las técnicas de la Mecánica de Fractura Elástica Lineal²¹⁵.

La Mecánica de Fractura Lineal ha dado buenos resultados en el estudio de la predicción de las trayectorias de las fisuras observadas, siendo de gran utilidad para conocer los movimientos que han originado la fisuración.

Por ello se puede afirmar que la Mecánica de Fractura Elástica Lineal es un método sencillo y accesible de análisis, que puede ayudar en gran medida a la determinación de los patrones que siguen los procesos de fisuración en los paramentos de edificación, simplificando así el proceso de análisis teórico de estos fenómenos patológicos de los recubrimientos (Figura 5.7).

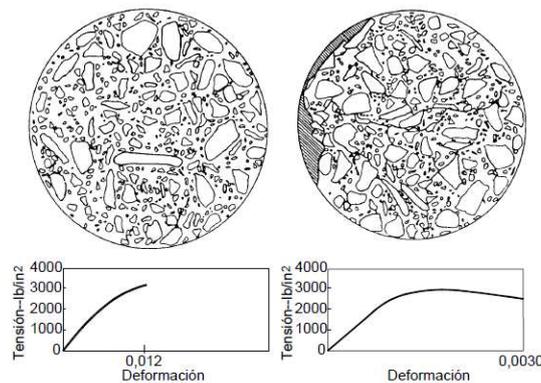


Figura 5.7 Mapas de fisuración y curvas tensión-deformación para hormigón cargado en compresión uniaxial. (Shah y Slate)²¹⁶.

²¹⁴ Zhao, Z., S. H. Kwon and S. P. Shah (2008). "Effect of specimen size on fracture energy and softening curve of concrete: Part I. Experiments and fracture energy." *Cement and Concrete Research* **38**(8): 1049-1060.

²¹⁵ Comité, A. (2001). *Control de la Fisuración en estructuras de hormigón*.

Los primeros estudios realizados para conocer los procesos de fisuración de morteros y hormigones consideraban que éstos estaban compuestos por dos materiales lineales, elásticos y frágiles: la pasta cementicia y los agregados.

Para estos investigadores, las microfisuras producidas por las tensiones a las que estaba sometido el material eran consideradas la principal causa del comportamiento no lineal de la relación tensión-deformación en compresión^{217,218}.

En la década de los 70 se empieza a considerar el cambio de este enfoque, ya que la pasta cementicia es un material de ablandamiento no lineal, al igual que la mezcla de cemento y arena que se posiciona llenando los huecos dejados por la grava. El comportamiento no lineal en compresión del hormigón depende sobre todo de la respuesta de estos dos materiales al esfuerzo producido, y menos de la fisuración de adherencia del mortero a los áridos más gruesos de lo que originalmente se pensaba^{219,220}.

Más recientemente se han realizado estudios orientados a conocer mejor el proceso de fractura de los materiales *cuasi* frágiles y los mecanismos que lo gobiernan. El avance ha sido importante, en especial en lo que se refiere a la fractura en Modo I (tracción) de hormigones y morteros. Sin embargo, por lo que respecta a los procesos de fractura bajo condiciones de carga combinadas de tracción y cortante (Modo Mixto I/II) aún queda mucho por avanzar.

La mejora de los conocimientos de la fractura de los hormigones y morteros en Modo Mixto I/II es determinante para poder aplicar con éxito las herramientas de la mecánica de la fractura, ya que en los procesos reales la fractura suele producirse bajo condiciones de carga combinadas. En el campo experimental aún no se ha conseguido una técnica de ensayo que reproduzca un esfuerzo en Modo II importante en la zona en proceso de fractura, por lo que es difícil el análisis en laboratorio.

²¹⁶ Shah, S. and F. Slate (1968). "Internal microcracking, mortar-aggregate bond and the stress-strain curve of concrete."

²¹⁷ Hsu, T. T., F. O. Slate, G. M. Sturman and G. Winter (1963). Microcracking of plain concrete and the shape of the stress-strain curve. Journal Proceedings.

²¹⁸ Shah, S. P. and G. Winter (1966). Inelastic behavior and fracture of concreteibid.

²¹⁹ Spooner, D. (1972). "The stress-strain relationship for hardened cement pastes in compression." Magazine of Concrete Research **24**(79): 85-92.

²²⁰ Maher, A. and D. Darwin (1982). Mortar constituent of concrete in compression. Journal Proceedings.

En los últimos años todas las investigaciones y normativa se basan en hormigones armados o en morteros armados con fibras, ya que son los que mejores resistencias ofrecen a la fractura^{221,222,223,224,225}.

Entre las referencias más innovadoras destacan las recomendaciones contenidas en el RILEM TC-187-SOC²²⁶.

Del mismo modo, las últimas investigaciones y las publicaciones científicas más recientes del Grupo Español de Fractura analizan el comportamiento del hormigón en Modo Mixto^{227,228}. De igual forma, en el año 2011 se realizó una campaña experimental diseñada para investigar la relación entre la propagación de las fisuras y el tipo de fallo en vigas de hormigón armado sin cercos²²⁹.

Enfedaque²³⁰ llevó a cabo un estudio de la energía de fractura en morteros reforzados con fibras de vidrio, observando que este tipo de material tiene una energía de fractura cuatro veces más alta que los morteros convencionales.

-
- ²²¹ Caggiano, A., M. Cremona, C. Faella, C. Lima and E. Martinelli (2012). "Fracture behavior of concrete beams reinforced with mixed long/short steel fibers." Construction and Building Materials **37**: 832-840.
- ²²² Zhou, X., S. H. Ghaffar, W. Dong, O. Oladiran and M. Fan (2013). "Fracture and impact properties of short discrete jute fibre-reinforced cementitious composites." Materials & Design **49**: 35-47.
- ²²³ Xu, S. and Y. Zhu (2009). "Experimental determination of fracture parameters for crack propagation in hardening cement paste and mortar." International Journal of Fracture **157**(1): 33-43.
- ²²⁴ Sagar, R. V., R. Prasad, B. R. Prasad and M. Rao (2013). "Microcracking and fracture process in cement mortar and concrete: a comparative study using acoustic emission technique." Experimental Mechanics **53**(7): 1161-1175.
- ²²⁵ Cao, M., C. Zhang, H. Lv and L. Xu (2014). "Characterization of mechanical behavior and mechanism of calcium carbonate whisker-reinforced cement mortar." Construction and Building Materials **66**: 89-97.
- ²²⁶ Planas, J., G. Guinea, J. Galvez, B. Sanz, A. Fathy and J. Planas (2007). "Indirect tests for stress-crack opening curve." Final Report of RILEM Technical Committee TC: 13-29.
- ²²⁷ Rodríguez, M., C. M. López Garello, I. Carol and F. C. Caner (2009). Meso-mechanical analysis of the fracture of concrete specimens in mixed mode. X International Conference on Computational Plasticity.
- ²²⁸ Martín, A., J. Y. Pastor, A. Palomo and A. F. Jiménez (2015). "Mechanical behaviour at high temperature of alkali-activated aluminosilicates (geopolymers)." Construction and Building Materials **93**: 1188-1196.
- ²²⁹ Rena, C. Y., H. Cifuentes, I. Rivero, G. Ruiz and X. Zhang (2016). "Dynamic fracture behaviour in fibre-reinforced cementitious composites." Journal of the Mechanics and Physics of Solids **93**: 135-152.
- ²³⁰ Enfedaque, A., J. Gálvez and F. Suárez (2015). "Analysis of fracture tests of glass fibre reinforced cement (GRC) using digital image correlation." Construction and Building Materials **75**: 472-487.

5.5.1. Realización del ensayo a tracción indirecta

El ensayo a tracción uniaxial, se considera el método prospectivo más adecuado para determinar las propiedades de fracturas de materiales frágiles.

Es un ensayo difícil de ejecutar, con altas dispersiones en sus resultados debido a la incapacidad de obtener de manera razonable distribuciones uniformes de tensiones a través de la fisura.

A modo de ejemplo se muestran la Figura 5.8, Tabla 5.9 y Gráfico 5.2 utilizados en el ensayo para el mortero BAS-A-NA a los 7 días.



Figura 5.8 Probetas BAS-A-NA con edad de 7 días sometidas al ensayo de fractura.

Tabla de resultados al ensayo de Tenacidad a la Fractura								
Días	P.	Tamaño Entalla: 4,8 mm			Tamaño Entalla: 6,4 mm			
		Carga (KN)	U (KN/mm)	G (J/m ²)	P.	Carga (KN)	U (KN/mm)	G (J/m ²)
7 días	1	0,070	0,011	7,500	4	0,059	0,004	2,690
	2	0,068	0,011	7,633	5	0,054	0,004	2,930
	3	0,067	0,008	5,611	6	0,056	0,004	2,930
Datos:		0,068	0,010	6,915		0,056	0,004	2,850

Tabla 5.9 Tabla de resultados al ensayo de Tenacidad a la Fractura (BAS-A-NA con edad 7 días).

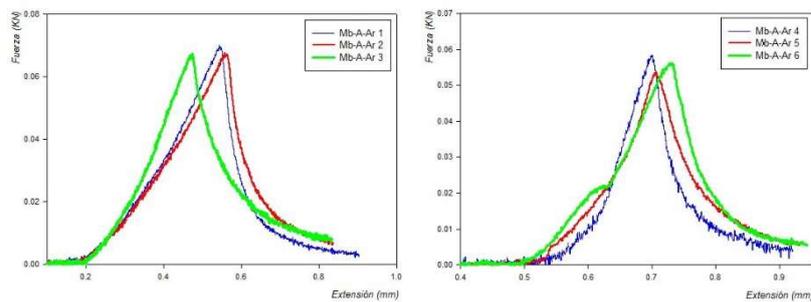


Gráfico 5.2 Curvas fuerza-desplazamiento (BAS-A-NA con edad de 7 días).

Las medidas de los resultados obtenidos en el ensayo se recogen en la Tabla 5.10, Tabla 5.11 y Tabla 5.12:

Fase experimental previa

Resultados obtenidos (F, U y G)							
N.º	Descripción	Entalla:4,8			Entalla: 6,4		
		F (KN)	U (KN/mm)	G (J/m ²)	F (KN)	U (KN/mm)	G (J/m ²)
1	BAS-A-NA (7 días)	0,068	0,010	6,915	0,056	0,004	2,850
2	BAS-C-NA (7 días)	0,508	0,030	20,998	0,502	0,028	21,100
3	BAS-A-NA (56 días)	0,069	0,010	7,566	0,127	0,010	7,220
4	BAS-C-NA (56 días)	0,904	0,065	44,650	0,911	0,073	54,460
5	BAS-A-LF (7 días)	0,062	0,009	5,990	0,057	0,006	4,530
6	BAS-C-LF (7 días)	0,156	0,016	10,980	0,163	0,021	15,400
7	BAS-A-LF (56 días)	0,124	0,017	12,115	0,099	0,012	8,830
8	BAS-C-LF (56 días)	0,278	0,065	39,201	0,321	0,073	54,600
9	BAS-A-NA/LF (28 días)	0,095	0,014	9,943	0,074	0,012	9,000
10	BAS-C-NA/LF (28 días)	0,358	0,033	22,869	0,311	0,028	21,000
11	BAS-B-NA/LF (7 días)	0,096	0,014	11,175	0,073	0,007	10,520
12	BAS-B-NA/LF (56 días)	0,193	0,039	27,397	0,253	0,015	11,000
13	BAS-B-NA (28 días)	0,423	0,024	17,102	0,369	0,032	23,600
14	BAS-B-LF (28 días)	0,206	0,028	19,765	0,203	0,021	15,600
15	BAS-B-NA/LF (28 días)	0,270	0,026	18,168	0,212	0,024	18,000

Tabla 5.10 Resultados obtenidos (F, U y G) para el ensayo de Tenacidad a la Fractura. Plan de Experimentación 1 (NA-LF).

Resultados obtenidos (F, U y G)							
N.º	Descripción	Entalla:4,8			Entalla: 6,4		
		F (KN)	U (KN/mm)	G (J/m ²)	F (KN)	U (KN/mm)	G (J/m ²)
1	BAS-A-NA (7 días)	0,068	0,010	6,915	0,056	0,004	2,850
2	BAS-C-NA (7 días)	0,508	0,030	20,998	0,502	0,028	21,100
3	BAS-A-NA (56 días)	0,069	0,010	7,566	0,127	0,010	7,220
4	BAS-C-NA (56 días)	0,904	0,065	44,650	0,911	0,073	54,460
16	BAS-A-EAF (7 días)	0,087	0,012	7,526	0,073	0,012	9,100
17	BAS-C-EAF (7 días)	0,631	0,068	45,111	0,625	0,066	45,000
18	BAS-A-EAF (56 días)	0,240	0,028	24,276	0,204	0,018	13,000
19	BAS-C-EAF (56 días)	1,495	0,200	144,437	1,273	0,136	101,000
20	BAS-A-NA/EAF (28 días)	0,110	0,022	11,470	0,078	0,009	6,700
21	BAS-C-NA/EAF (28 días)	0,909	0,072	55,339	0,790	0,063	47,000
22	BAS-B-NA/EAF (7 días)	0,296	0,030	24,833	0,529	0,052	37,000
23	BAS-B-NA/EAF (56 días)	0,522	0,060	46,650	0,431	0,053	37,000
13	BAS-B-NA (28 días)	0,423	0,024	17,102	0,369	0,032	23,600
24	BAS-B-EAF (28 días)	0,595	0,065	46,479	0,527	0,043	32,000
25	BAS-B-NA/EAF (28 días)	0,436	0,038	27,259	0,310	0,032	24,000

Tabla 5.11 Resultados obtenidos (F, U y G) para el ensayo de Tenacidad a la Fractura. Plan de Experimentación 2 (NA – EAF).

Resultados obtenidos (F, U y G)							
N.º	Descripción	Entalla:4,8			Entalla: 6,4		
		F (KN)	U (KN/mm)	G (J/m ²)	F (KN)	U (KN/mm)	G (J/m ²)
1	BAS-A-LF (7 días)	0,062	0,009	5,990	0,057	0,006	4,530
2	BAS-C-LF (7 días)	0,156	0,016	10,980	0,163	0,021	15,400
3	BAS-A-LF (56 días)	0,124	0,017	12,115	0,099	0,012	8,830
4	BAS-C-LF (56 días)	0,278	0,065	39,201	0,321	0,073	54,600
16	BAS-A-EAF (7 días)	0,087	0,012	7,526	0,073	0,012	9,100
17	BAS-C-EAF (7 días)	0,631	0,068	45,111	0,625	0,066	45,000
18	BAS-A-EAF (56 días)	0,240	0,028	24,276	0,204	0,018	13,000
19	BAS-C-EAF (56 días)	1,495	0,200	144,437	1,273	0,136	101,000
26	BAS-A-LF/EAF (28 días)	0,160	0,014	9,983	0,135	0,010	7,4000
27	BAS-C-LF/EAF (28 días)	0,445	0,068	27,180	0,390	0,042	30,100
28	BAS-B-LF/EAF (7 días)	0,148	0,016	12,436	0,120	0,019	13,000
29	BAS-B-LF/EAF (56 días)	0,288	0,019	15,916	0,215	0,014	11,000
13	BAS-B-NA (28 días)	0,423	0,024	17,102	0,369	0,032	23,600
24	BAS-B-LF (28 días)	0,206	0,028	19,765	0,203	0,021	15,600
30	BAS-B-LF/EAF (28 días)	0,260	0,036	15,962	0,215	0,014	11,000

Tabla 5.12 Resultados obtenidos (F, U y G) para el ensayo de Tenacidad a la Fractura. Plan de Experimentación 3 (LF – EAF).

La razón del estudio de la Tenacidad a la Fractura de los materiales con dos entallas diferentes ha sido la posibilidad de estudiar la Integral J. La Integral J es uno de los parámetros más utilizados en la caracterización mecánica de la fractura, tanto para materiales lineales como no lineales. Se relaciona con la liberación de energía asociada al crecimiento de la grieta y es una medida de la intensidad de la deformación en una entalla o en la punta de una grieta, especialmente para materiales no lineales.

Según demostró Rice²³¹, la Integral J representa la variación de energía potencial ante una extensión diferencial virtual de la grieta. Así, gráficamente, la tasa de liberación de energía no lineal, J, viene determinada por el área encerrada entre las curvas de carga-desplazamiento para a y (a+da).

Para el correcto cálculo de la integral J, la energía de fractura para las probetas de entalla 6,4 mm debería haber sido en todos los casos menor que la energía de fractura para las probetas de entalla 4,8 mm, lo cual no ha sido así. Esto ha sido debido a las dispersiones obtenidas en el ensayo al tratarse de valores sumamente pequeños.

De este modo, no queda otro remedio que estudiar el comportamiento a la fractura de los morteros obedeciendo solo a los resultados obtenidos de Energía de Fractura.

²³¹ Rice, J. (1968). "A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks." *Journal of Applied mechanics* **35**: 379-386.

5.5.2. Obtención de resultados mediante superficies de respuesta

Para la creación de las superficies de respuesta es necesario introducir en el programa de cálculo los resultados de fractura, en función de los parámetros variables del diseño de experimentos. Tras introducir los datos, el software aporta los Coeficientes de Regresión de la ecuación de la superficie de respuesta (Ecuación 5.1).

Ecuación 5.1

$$f(\%C^*, EC^*, TA^*) = b_0 + b_1 \cdot \%C^* + b_2 \cdot EC^* + b_3 \cdot TA^* + b_{11} \cdot \%C^{*2} + b_{22} \cdot EC^{*2} + b_{33} \cdot TA^{*2} + b_{12} \cdot \%C^* \cdot EC^* + b_{13} \cdot \%C^* \cdot TA^* + b_{23} \cdot EC^* \cdot TA^*$$

En la Tabla 5.13 se muestran los coeficientes de las fórmulas para cada parámetro, así como el valor de R².

Coeficientes de regresión y valor de R ² (%)						
Parámetros	Experimento 1		Experimento 2		Experimento 3	
	F	G	F	G	F	G
Coeficientes de regresión para las probetas con entalla 4,8 mm.						
b ₀	0,2367	18,9588	0,4806	32,6345	0,2866	17,4200
b ₁ %C	0,1803	9,7806	0,3912	25,6572	0,2360	21,0900
b ₂ EC	0,0678	7,4871	0,1640	16,2196	0,1341	15,3900
b ₃ TA	-0,1154	0,8846	0,1098	17,3887	0,2252	18,2700
b ₁₁ %C ²	0,0123	-1,4232	0,0489	2,2639	0,0350	3,6200
b ₂₂ EC ²	-0,0810	-0,3950	-0,0765	2,3307	-0,0701	-3,000
b ₃₃ TA ²	0,1003	0,6043	0,0484	0,6499	0,1330	18,1600
b ₁₂ %C·EC	0,0583	5,7264	0,1373	13,2624	0,0992	13,4600
b ₁₃ %C·TA	-0,1284	-2,3864	0,0655	13,3224	0,1939	15,7100
b ₂₃ EC·TA	-0,0267	-1,1702	0,0780	11,5093	0,1047	10,3400
R ² (%)	96,94%	98,32%	98,99%	96,73%	95,63%	92,60%
Coeficientes de regresión para las probetas con entalla 6,4 mm.						
b ₀	0,2029	15,0500	0,4203	29,5100	0,2980	12,8600
b ₁ %C	0,1812	13,6500	0,3593	23,2600	0,0919	20,6400
b ₂ EC	0,0860	8,1700	0,1161	9,7600	0,0495	10,1400
b ₃ TA	-0,1132	-1,0000	0,0738	9,1700	0,0323	10,1700
b ₁₁ %C ²	0,0081	2,2300	0,0059	-2,4500	-0,0436	7,2500
b ₂₂ EC ²	-0,0344	-3,2400	0,0361	6,4300	-0,1487	-0,9600
b ₃₃ TA ²	0,1016	6,8300	0,0149	-1,5000	0,0589	12,3000
b ₁₂ %C·EC	0,0587	8,2200	0,1065	10,2000	0,0276	11,1500
b ₁₃ %C·TA	-0,1127	-1,1100	0,0489	7,3000	0,0000	8,4100
b ₂₃ EC·TA	-0,0359	0,8200	0,0372	2,9300	-0,0046	2,1100
R ² (%)	97,76%	91,14%	94,92%	95,64%	78,45%	94,55%

Tabla 5.13 Coeficientes de regresión y valor de R² (%) para las superficies de respuesta de Tenacidad a la Fractura.

R^2 es el porcentaje de variación de la variable de respuesta que explica su relación con una o más variables predictoras. Por lo general, mientras mayor sea R^2 , mejor será el ajuste del modelo a sus datos.

R^2 siempre se encuentra entre 0 y 100%. R^2 también se conoce como el Coeficiente de Determinación o Determinación Múltiple (en la Regresión Lineal Múltiple).

Como se puede observar, la mayor parte de las veces R^2 es un valor inferior en los ensayos realizados con una entalla de 6,4 mm que para la entalla de 4,8 mm (salvo en la fuerza máxima hasta rotura para el Experimento 1).

Esto es debido a la dispersión de los datos proporcionados tanto por el programa de cálculo como por la máquina de ensayo, ya que los valores de trabajo obtenidos son muy pequeños.

Por ello, y debido a que los datos son análogos y siguen las mismas tendencias, se decide centrar el estudio solo en la determinación de la energía de fractura para la entalla de 4,8 mm, datos algo superiores y por ello más fáciles de estudiar, siendo éstos extrapolables a la grieta de mayor tamaño.

A continuación, se muestran las ecuaciones del diseño experimental aplicando los Coeficientes de Regresión obtenidos con el software, para cada uno de los experimentos realizados (Ecuación 5.2 - Ecuación 5.7).

Para obtener los valores de %C, EC y TA bastaría con igualar cada ecuación al valor que se busca del coeficiente que corresponda, obtenido mediante el ensayo.

Se puede también realizar el proceso opuesto, es decir, determinar los valores finales del ensayo conociendo las propiedades, según proceda. Una vez realizado este paso, se puede sustituir en la ecuación los parámetros conocidos y obtener los parámetros desconocidos resolviendo la ecuación.

Además, en las siguientes tablas y gráficos se realiza un estudio comparativo entre los resultados obtenidos en el laboratorio y las predicciones del modelo matemático para cada Plan de Experimentación.

$$\text{Plan de Experimentación 1(NA-LF): } f(\%C^*, EC^*, TA^*) F_{4,8} = 0,2367 + 0,1803 \%C^* + 0,0678 EC^* - 0,1154 TA^* + 0,0123 \%C^{*2} - 0,0810 EC^{*2} + 0,1003 TA^{*2} + 0,0583 \%C^* \cdot EC^* - 0,1284 \%C^* \cdot TA^* - 0,0267 EC^* \cdot TA^*$$

$$\text{Plan de Experimentación 1 (NA-LF): } f(\%C^*, EC^*, TA^*) G_{4,8} = 18,9588 + 9,7806 \%C^* + 7,4871 EC^* + 0,8846 TA^* - 1,4232 \%C^{*2} - 0,3950 EC^{*2} + 0,6043 TA^{*2} + 5,7264 \%C^* \cdot EC^* - 2,3864 \%C^* \cdot TA^* - 1,1702 EC^* \cdot TA^*$$

Comparativa de resultados de Tenacidad a la Fractura						
Designación	Resultados de laboratorio			Superficies de Respuesta		
	7 días	28 días	56 días	7 días	28 días	56 días
Fuerza Máxima de Fractura (KN)						
BAS-A-NA	0,068	-	0,069	0,039	0,149	0,111
BAS-A-NA/LF	-	0,095	-	-0,022	0,066	-0,003
BAS-A-LF	0,062	-	0,124	0,118	0,183	0,084
BAS-B-NA	-	0,423	-	0,277	0,437	0,466
BAS-B-NA/LF	0,096	0,270	0,193	0,088	0,225	0,223
BAS-B-LF	-	0,206	-	0,100	0,214	0,182
BAS-C-NA	0,508	-	0,904	0,539	0,750	0,845
BAS-C-NA/LF	-	0,358	-	0,222	0,450	0,474
BAS-C-LF	0,156	-	0,278	0,105	0,270	0,304
Energía de Fractura (J/m ²)						
BAS-A-NA	6,915	-	7,566	6,662	6,781	7,843
BAS-A-NA/LF	-	9,943	-	6,389	7,511	9,911
BAS-A-LF	5,990	-	12,115	7,325	9,450	13,187
BAS-B-NA	-	17,102	-	14,526	19,550	27,160
BAS-B-NA/LF	11,175	18,168	27,397	11,867	17,897	26,841
BAS-B-LF	-	19,765	-	10,416	17,450	27,731
BAS-C-NA	20,998	-	44,650	19,543	29,479	43,630
BAS-C-NA/LF	-	22,869	-	14,498	25,437	40,925
BAS-C-LF	10,980	-	39,201	10,661	22,603	39,428

Tabla 5.14 Comparativa de resultados de Tenacidad a la Fractura para el Plan de Experimentación 1 (NA-LF).

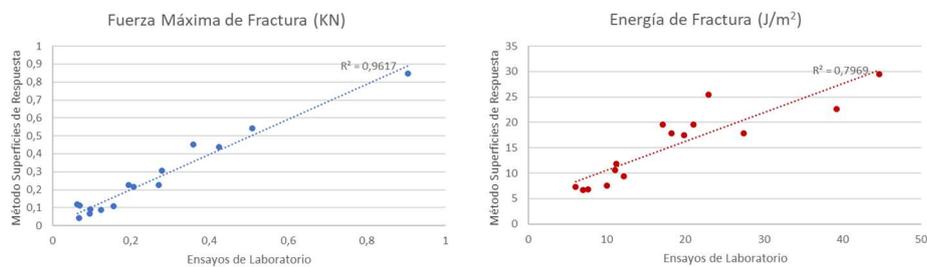


Gráfico 5.3 Comparativa de resultados de Tenacidad a la Fractura para el Plan de Experimentación 1 (NA-LF).

Plan de Experimentación 2 (NA-EAF): f (%C*, EC*, TA*) $F_{4,8} = 0,4506 + 0,3912 \%C^* + 0,1640 EC^* + 0,1098 TA^* + 0,0489 \%C^{*2} - 0,0765 EC^{*2} + 0,0484 TA^{*2} + 0,1373 \%C^* \cdot EC^* + 0,0655 \%C^* \cdot TA^* + 0,0780 EC^* \cdot TA^*$

Plan de Experimentación 2 (NA-EAF): f (%C*, EC*, TA*) $G_{4,8} = 32,6345 + 25,6572 \%C^* + 16,2196 EC^* + 17,3887 TA^* + 2,2639 \%C^{*2} + 2,3307 EC^{*2} + 0,6499 TA^{*2} + 13,2624 \%C^* \cdot EC^* + 13,3224 \%C^* \cdot TA^* + 11,5093 EC^* \cdot TA^*$

Comparativa de resultados de Tenacidad a la Fractura						
Designación	Resultados de laboratorio			Superficies de Respuesta		
	7 días	28 días	56 días	7 días	28 días	56 días
Fuerza Máxima de Fractura (KN)						
BAS-A-NA	0,068	-	0,069	0,117	0,148	0,015
BAS-A-NA/EAF	-	0,110	-	0,035	0,133	0,089
BAS-A-EAF	0,087	-	0,240	0,050	0,215	0,259
BAS-B-NA	-	0,423	-	0,257	0,405	0,429
BAS-B-NA/EAF	0,269	0,436	0,522	0,240	0,456	0,568
BAS-B-EAF	-	0,595	-	0,320	0,603	0,804
BAS-C-NA	0,508	-	0,904	0,494	0,760	0,904
BAS-C-NA/EAF	-	0,909	-	0,543	0,876	1,146
BAS-C-EAF	0,631	-	1,495	0,689	1,089	1,447
Energía de Fractura (J/m ²)						
BAS-A-NA	6,915	-	7,566	16,708	7,092	-0,396
BAS-A-NA/EAF	-	11,470	-	8,615	8,865	14,529
BAS-A-EAF	7,526	-	24,276	1,822	11,938	30,755
BAS-B-NA	-	17,102	-	13,516	15,269	22,937
BAS-B-NA/EAF	24,833	27,259	46,650	18,746	30,364	51,185
BAS-B-EAF	-	46,479	-	25,275	46,759	80,733
BAS-C-NA	20,998	-	44,650	14,852	27,974	50,798
BAS-C-NA/EAF	-	55,339	-	33,404	56,391	92,368
BAS-C-EAF	45,111	-	144,437	53,256	86,109	135,238

Tabla 5.15 Comparativa de resultados de Tenacidad a la Fractura para el Plan de Experimentación 2 (NA-EAF).

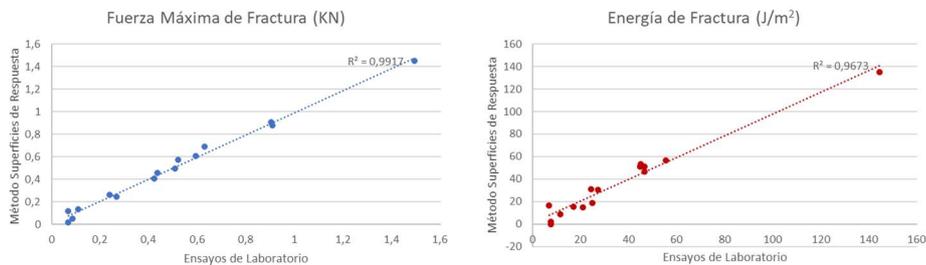


Gráfico 5.4 Comparativa de resultados de Tenacidad a la Fractura para el Plan de Experimentación 2 (NA-EAF).

Ecuación 5.6

$$\text{Plan de Experimentación 3 (LF-EAF): } f(\%C^*, EC^*, TA^*) F_{4,8} = 0,2866 + 0,2360 \%C^* + 0,1341 EC^* + 0,2252 TA^* + 0,0350 \%C^{*2} - 0,0701 EC^{*2} + 0,1330 TA^{*2} + 0,0992 \%C^* \cdot EC^* + 0,1939 \%C^* \cdot TA^* + 0,1047 EC^* \cdot TA^*$$

Ecuación 5.7

$$\text{Plan de Experimentación 3 (LF-EAF): } f(\%C^*, EC^*, TA^*) G_{4,8} = 17,4200 + 21,0900 \%C^* + 15,3900 EC^* + 18,2700 TA^* + 3,6200 \%C^{*2} - 3,0000 EC^{*2} + 18,1600 TA^{*2} + 13,4600 \%C^* \cdot EC^* + 15,7100 \%C^* \cdot TA^* + 10,3400 EC^* \cdot TA^*$$

Comparativa de resultados de Tenacidad a la Fractura						
Designación	Resultados de laboratorio			Superficies de Respuesta		
	7 días	28 días	56 días	7 días	28 días	56 días
Fuerza Máxima de Fractura (KN)						
BAS-A-LF	0,062	-	0,124	0,187	0,196	0,047
BAS-A-LF/EAF	-	0,160	-	-0,019	0,079	0,050
BAS-A-EAF	0,087	-	0,240	0,040	0,228	0,319
BAS-B-LF	-	0,206	-	0,095	0,189	0,154
BAS-B-LF/EAF	0,148	0,260	0,288	0,082	0,266	0,350
BAS-B-EAF	-	0,595	-	0,335	0,609	0,813
BAS-C-LF	0,156	-	0,278	0,073	0,252	0,330
BAS-C-LF/EAF	-	0,445	-	0,254	0,522	0,720
BAS-C-EAF	0,631	-	1,495	0,701	1,060	1,378
Energía de Fractura (J/m ²)						
BAS-A-LF	5,990	-	12,115	20,910	16,689	4,094
BAS-A-LF/EAF	-	9,983	-	-0,502	-0,383	-1,162
BAS-A-EAF	7,526	-	24,276	5,364	18,865	29,900
BAS-B-LF	-	19,765	-	9,210	16,525	19,314
BAS-B-LF/EAF	12,436	15,962	15,916	-1,014	15,162	29,766
BAS-B-EAF	-	46,479	-	25,079	50,119	76,538
BAS-C-LF	10,980	-	39,201	4,747	23,560	41,771
BAS-C-LF/EAF	-	27,180	-	10,230	37,246	67,932
BAS-C-EAF	45,111	-	144,437	52,032	88,612	130,413

Tabla 5.16 Comparativa de resultados de Tenacidad a la Fractura para el Plan de Experimentación 3 (LF-EAF).

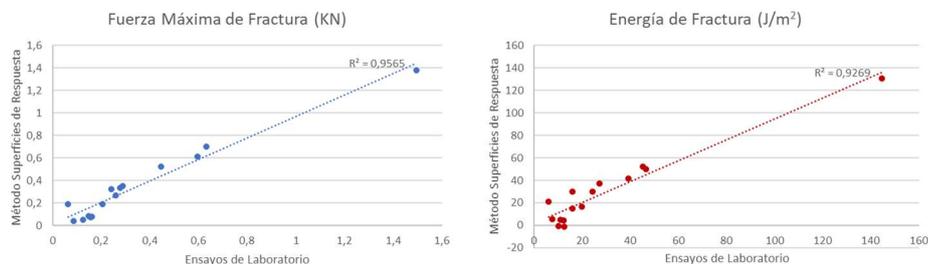


Gráfico 5.5 Comparativa de resultados de Tenacidad a la Fractura para el Plan de Experimentación 3 (LF-EAF).

Del estudio comparativo cabe destacar en primer lugar la exactitud de los valores obtenidos, tanto experimentalmente como con el Análisis de las Superficies de Respuesta, cuando el resultado es significativo, mientras que se observan dispersiones y valores que no responden a la lógica del proceso experimental cuando los valores son más pequeños.

El segundo lugar, destaca la coherencia de los datos obtenidos para la Fuerza Máxima. Los valores obtenidos son pequeños, pero coherentes, ya que a las primeras edades los morteros desarrollan resistencias mecánicas a flexión muy bajas. A este respecto cabe señalar que los morteros y hormigones se comportan muy bien a compresión, pero no tanto a tracción o a flexión.

En tercer lugar, las energías de fracturas obtenidas son igualmente lógicas y relacionadas con la fuerza máxima hasta rotura que soportan los morteros.

Por otra parte, es significativa la poca exactitud de los resultados obtenidos en el experimento que combina ambos tipos de escoria, Plan de Experimentación 3 (LF-EAF), obteniendo incluso resultados negativos, circunstancia no compatible con la naturaleza del ensayo realizado. Por esta circunstancia, los resultados obtenidos son menos fiables que los registrados en los primeros experimentos.

Resumen de resultados de Energía de Fractura (J/m ²)			
Designación	7 días	28 días	56 días
BAS-A-NA	6,662	6,781	7,843
BAS-A-LF	7,325	9,451	13,187
BAS-A-EAF	1,522	11,938	30,755
BAS-A-NA/LF	6,389	7,512	9,911
BAS-A-NA/EAF	8,615	8,866	14,529
BAS-A-LF/EAF	2,180	7,929	1,100
BAS-B-NA	12,139	17,167	24,773
BAS-B-LF	12,803	19,836	30,117
BAS-B-EAF	26,838	28,593	36,259
BAS-B-NA/LF	11,867	17,897	26,841
BAS-B-NA/EAF	18,746	30,365	51,185
BAS-B-LF/EAF	6,590	21,800	19,010
BAS-C-NA	14,773	24,706	38,857
BAS-C-LF	15,434	27,736	44,201
BAS-C-EAF	26,611	59,465	108,509
BAS-C-NA/LF	14,498	25,438	40,925
BAS-C-NA-EAF	33,404	56,391	92,768
BAS-C-LF/EAF	6,900	27,215	30,660

Tabla 5.17 Resumen de resultados de Energía de Fractura (J/m²) para los morteros estudiados.

Por último, con el fin de poder observar en conjunto la Tenacidad a la Fractura de este tipo de morteros, en la Tabla 5.17 se muestran los resultados obtenidos para el ensayo de Energía a la Fractura. Para configurar esta tabla, se han utilizado los valores medios coherentes para este tipo de ensayos, entre los obtenidos en los diferentes Planes de Experimentación.

5.5.3. Análisis de los resultados

Para el análisis de la Tenacidad a la Fractura de los morteros bastardos con residuos siderúrgicos se utilizan los gráficos obtenidos mediante el Método de Superficies de Respuesta.

Para ello, es necesario fijar uno de los tres parámetros objeto de estudio, con el fin de poder representar gráficamente los otros dos y la respuesta buscada.

El primer análisis de estudio se realiza a la edad de 28 días, (Gráfico 5.6 - Gráfico 5.8) referencia temporal característica para determinar la Resistencia Nominal de los morteros, es decir, el tiempo medio para garantizar la hidratación de los componentes y asegurar su fraguado y endurecimiento.

El segundo análisis se basa en la edad de curado (Gráfico 5.9 - Gráfico 5.11), para ello es necesario bloquear otra variable diferente. En este caso con el fin de ver cómo afecta el comportamiento del tipo de conglomerante, se bloquea el parámetro de la sustitución de árido, estudiando las mezclas que tiene un 50% de cada uno de los dos áridos.

Se puede observar la evolución que muestra la resistencia mecánica a compresión de los morteros con mayor cantidad de cemento dosificada, comprobando que los mayores registros se producen a los 56 días.

Por el contrario, en los morteros con predominio de cal apenas se observan incremento de la resistencia entre los 28 y 56 días, circunstancia que permite afirmar la necesidad de esperar más tiempo para garantizar el proceso de carbonatación de la cal.

Es evidente que las reacciones de hidratación del cemento y de carbonatación no se producen con la misma cinética de reacción, por lo que para poder ser comparadas deben considerarse tiempos diferentes.

Capítulo V

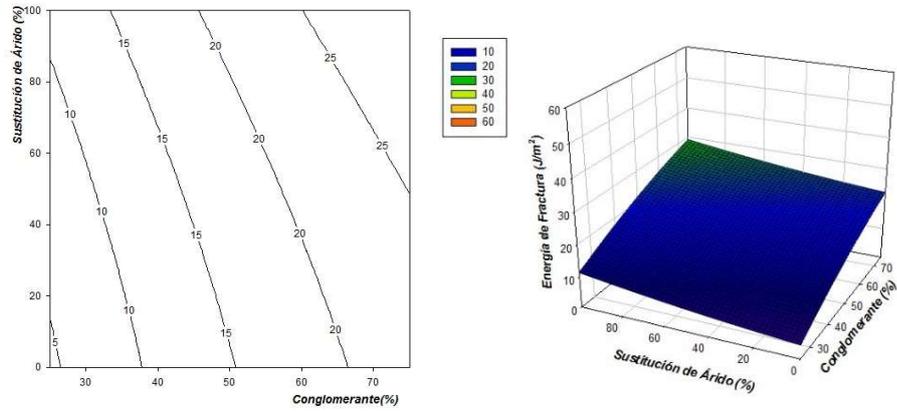


Gráfico 5.6 Gráfica de Contornos y Superficie de Respuesta Energía de Fractura ($G_{4,8}$), en función de %C y TA para una edad de 28 días. (Plan de Experimentación 1)

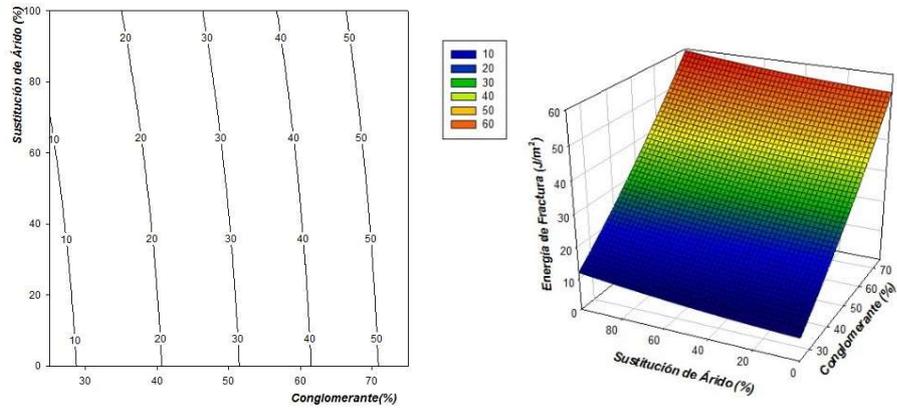


Gráfico 5.7 Gráfica de Contornos y Superficie de Respuesta Energía de Fractura ($G_{4,8}$), en función de %C y TA para una edad de 28 días. (Plan de Experimentación 2).

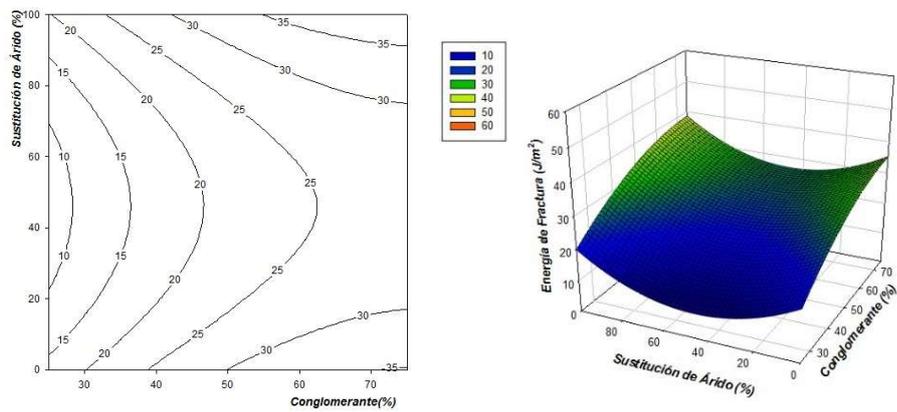


Gráfico 5.8 Gráfica de Contornos y Superficie de Respuesta Energía de Fractura ($G_{4,8}$), en función de %C y TA para una edad de 28 días. (Plan de Experimentación 3).

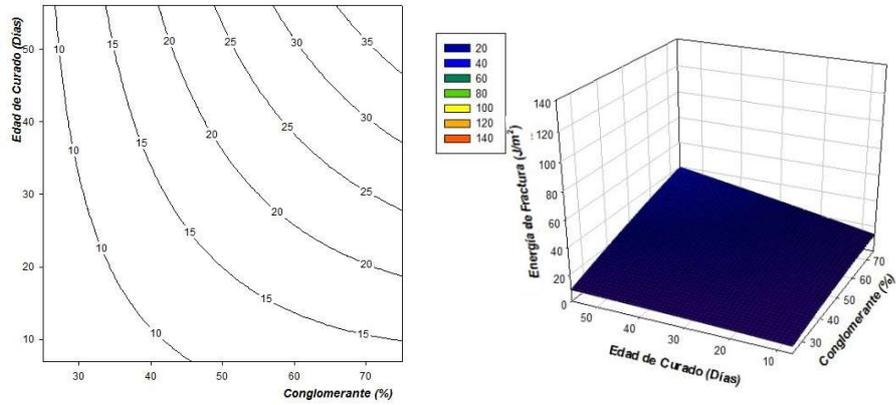


Gráfico 5.9 Gráfica de Contornos y Superficie de Respuesta Energía de Fractura ($G_{4,8}$), en función de %C y EC para para la dosificación tipo B. (Plan de Experimentación 1).

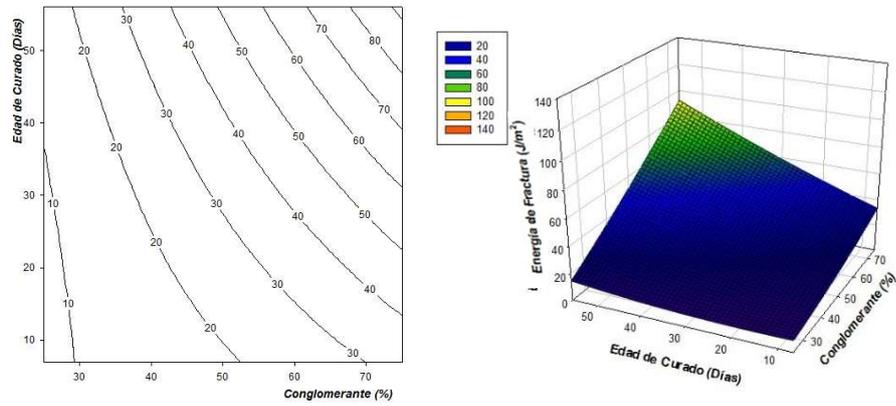


Gráfico 5.10 Gráfica de Contornos y Superficie de Respuesta Energía de Fractura ($G_{4,8}$), en función de %C y EC para para la dosificación tipo B. (Plan de Experimentación 2).

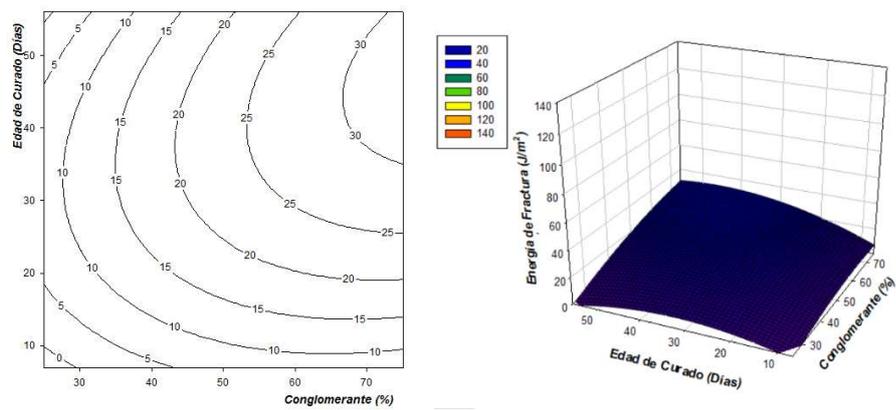


Gráfico 5.11 Gráfica de Contornos y Superficie de Respuesta Energía de Fractura ($G_{4,8}$), en función de %C y EC para para la dosificación tipo B. (Plan de Experimentación 3).

5.6. ESTUDIO DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN

La resistencia mecánica a compresión de un mortero es la propiedad que mejor describe su comportamiento y de la que pueden deducirse otras propiedades. Además, es un indicio fiable para determinar su durabilidad en el tiempo.

Cuando los morteros forman parte de muros de carga portantes de ladrillo, piedra natural o bloques, deben dimensionarse para que puedan soportar los esfuerzos de compresión, tratando de evitar flexiones o tracciones en su sección.

Así como la resistencia mecánica de un muro es función de la capacidad resistente de los elementos que lo componen, la resistencia mecánica de un mortero también depende de las propiedades del conglomerante, del árido o de la cantidad de agua añadida para su mezcla, así como de los aditivos añadidos para mejorar sus propiedades.

Los morteros utilizados en fábricas portantes deben aportar suficiente resistencia mecánica, evitando superar a la de los materiales que unen para evitar rigideces (Código Técnico de la Edificación)²³². No obstante, bajas resistencias mecánicas a compresión del mortero no son recomendables. Lo aconsejable es prescribir la resistencia suficiente que asegure la respuesta mecánica proyectada sin excesos, ya que podrían comprometerse otras propiedades.

5.6.1. Realización del ensayo de resistencia a compresión

La resistencia a compresión de los morteros se determina de acuerdo con las especificaciones recogidas en la *Norma EN 1015-11*. Las doce mitades obtenidas tras el estudio de la tenacidad a la fractura han sido utilizadas para el estudio de la resistencia a compresión de los morteros.

A modo de ejemplo, en la Figura 5.9 y la Tabla 5.18 se muestran los registros obtenidos en el ensayo de resistencia a compresión del mortero BAS-A-NA a 7 días de edad.



Figura 5.9 Probetas BAS-A-NA con edad de 7 días sometidas al ensayo de Resistencia a Compresión.

²³² Ministerio_de_Vivienda (2006). "Código Técnico de la Edificación. DB-SE-F."

Tabla de resultados al ensayo de Resistencia a Compresión							
Días	Tamaño Entalla: 4.8 mm			Tamaño Entalla: 6.4 mm			Fuerza (KN)
	Probeta	Carga (KN)		Probeta	Carga (KN)		
7 días	1	1,42	1,49	4	1,26	1,00	1,28
	2	1,34	1,44	5	1,12	1,29	
	3	1,33	1,47	6	1,08	1,15	
Resistencia a compresión (MPa)							0,802

Tabla 5.18 Tabla de resultados al ensayo de Resistencia a Compresión (BAS-A-NA con edad 7 días).

Los resultados obtenidos para todos los morteros se muestran en la Tabla 5.19, Tabla 5.20 y Tabla 5.21, refiriendo la media entre los doce valores obtenidos.

Resultados obtenidos para el ensayo de Resistencia a Compresión					
N.º	Descripción	R. Comp. (MPa)	N.º	Descripción	R. Comp. (MPa)
1	BAS-A-NA (7 días)	0,802	9	BAS-A-NA/LF (28 días)	1,683
2	BAS-C-NA (7 días)	6,335	10	BAS-C-NA/LF (28 días)	11,186
3	BAS-A-NA (56 días)	1,330	11	BAS-B-NA/LF (7 días)	3,243
4	BAS-C-NA (56 días)	11,080	12	BAS-B-NA/LF (56 días)	5,661
5	BAS-A-LF (7 días)	1,166	13	BAS-B-NA (28 días)	3,971
6	BAS-C-LF (7 días)	1,530	14	BAS-B-LF (28 días)	2,321
7	BAS-A-LF (56 días)	1,362	15	BAS-B-NA/LF (28 días)	4,819
8	BAS-C-LF (56 días)	3,594			

Tabla 5.19 Resultados obtenidos para el ensayo de Resistencia a Compresión (MPa).
Plan de Experimentación 1 (NA – LF).

Resultados obtenidos para el ensayo de Resistencia a Compresión					
N.º	Descripción	R. Comp. (MPa)	N.º	Descripción	R. Comp. (MPa)
1	BAS-A-NA (7 días)	0,802	20	BAS-A-NA/EAF (28 días)	0,974
2	BAS-C-NA (7 días)	6,335	21	BAS-C-NA/EAF (28 días)	4,695
3	BAS-A-NA (56 días)	1,330	22	BAS-B-NA/EAF (7 días)	1,379
4	BAS-C-NA (56 días)	11,080	23	BAS-B-NA/EAF (56 días)	2,620
16	BAS-A-EAF (7 días)	1,099	13	BAS-B-NA (28 días)	3,971
17	BAS-C-EAF (7 días)	7,277	24	BAS-B-EAF (28 días)	7,448
18	BAS-A-EAF (56 días)	2,471	25	BAS-B-NA/EAF (28 días)	2,410
19	BAS-C-EAF (56 días)	17,039			

Tabla 5.20 Resultados obtenidos para el ensayo de Resistencia a Compresión (MPa).
Plan de Experimentación 2 (NA – EAF).

Resultados obtenidos para el ensayo de Resistencia a Compresión					
N.º	Descripción	R. Comp. (MPa)	N.º	Descripción	R. Comp. (MPa)
5	BAS-A-LF (7 días)	1,166	26	BAS-A-LF/EAF (28 días)	1,511
6	BAS-C-LF (7 días)	1,530	27	BAS-C-LF/EAF (28 días)	4,863
7	BAS-A-LF (56 días)	1,362	28	BAS-B-LF/EAF (7 días)	1,572
8	BAS-C-LF (56 días)	3,594	29	BAS-B-LF/EAF (56 días)	3,302
16	BAS-A-EAF (7 días)	1,099	14	BAS-B-LF (28 días)	2,321
17	BAS-C-EAF (7 días)	7,277	24	BAS-B-EAF (28 días)	7,448
18	BAS-A-EAF (56 días)	2,471	30	BAS-B-LF/EAF (28 días)	2,827
19	BAS-C-EAF (56 días)	17,039			

Tabla 5.21 Resultados obtenidos para el ensayo de Resistencia a Compresión (MPa). Plan de Experimentación 3 (LF – EAF).

5.6.2. Obtención de resultados mediante superficies de respuesta

Para el diseño de las superficies de respuesta se procede de igual modo que en el Ensayo de Tenacidad a la Fractura.

La Tabla 5.22 recoge los valores de los coeficientes de las fórmulas para cada parámetro, así como el valor de R^2 utilizado en el Ensayo de Resistencia a Compresión.

Coeficientes de regresión y valor de R^2			
Parámetros	Plan de Experimentación 1: R. Comp.	Plan de Experimentación 2: R. Comp.	Plan de Experimentación 3: R. Comp.
b_0	5,335	2,601	3,206
b_1 %C	2,758	4,022	2,707
b_2 EC	0,995	1,765	1,512
b_3 TA	-1,366	1,202	2,568
b_{11} %C ²	1,173	0,520	0,177
b_{22} EC ²	-0,970	-0,580	-0,806
b_{33} TA ²	-2,115	3,390	1,874
b_{12} %C·EC	0,686	1,645	1,312
b_{13} %C·TA	-1,586	0,683	2,269
b_{23} EC·TA	-0,394	0,710	1,104
R^2 (%)	92,02%	94,54%	96,60%

Tabla 5.22 Coeficientes de regresión y valor de R^2 para el ensayo de Resistencia a Compresión.

De igual modo, se muestran las ecuaciones del diseño experimental (Ecuación 5.8, Ecuación 5.9 y Ecuación 5.10), introduciendo los coeficientes obtenidos con el software para cada uno los experimentos (Ecuación 5.1).

Ecuación 5.1

$$f(\%C^*, EC^*, TA^*) = b_0 + b_1 \cdot \%C^* + b_2 \cdot EC^* + b_3 \cdot TA^* + b_{11} \cdot \%C^{*2} + b_{22} \cdot EC^{*2} + b_{33} \cdot TA^{*2} + b_{12} \cdot \%C^* \cdot EC^* + b_{13} \cdot \%C^* \cdot TA^* + b_{23} \cdot EC^* \cdot TA^*$$

Una vez configuradas las expresiones, se sustituyen en la ecuación los parámetros conocidos y se resuelve la ecuación.

Ecuación 5.8

$$\text{Plan de Experimentación 1 (NA-LF): } f(\%C^*, EC^*, TA^*) \text{ R. Comp.} = 5,335 + 2,758 \%C^* + 0,995 EC^* - 1,366 TA^* + 1,173 \%C^{*2} - 0,97 EC^{*2} - 2,115 TA^{*2} + 0,686 \%C^* \cdot EC^* - 1,586 \%C^* \cdot TA^* - 0,394 EC^* \cdot TA^*$$

Ecuación 5.9

$$\text{Plan de Experimentación 2 (NA-LF): } f(\%C^*, EC^*, TA^*) \text{ R. Comp.} = 2,601 + 4,022 \%C^* + 1,765 EC^* + 1,202 TA^* + 0,52 \%C^{*2} - 0,58 EC^{*2} + 3,39 TA^{*2} + 1,645 \%C^* \cdot EC^* + 0,683 \%C^* \cdot TA^* + 0,710 EC^* \cdot TA^*$$

Ecuación 5.10

$$\text{Plan de Experimentación 3 (LF-EAF): } f(\%C^*, EC^*, TA^*) \text{ R. Comp.} = 3,206 + 2,707 \%C^* + 1,512 EC^* + 2,568 TA^* + 0,177 \%C^{*2} - 0,806 EC^{*2} + 1,874 TA^{*2} + 1,312 \%C^* \cdot EC^* + 2,269 \%C^* \cdot TA^* + 1,104 EC^* \cdot TA^*$$

Para poder contrastar la fiabilidad del método utilizado, en la Tabla 5.23, Tabla 5.24 y Tabla 5.25, y en el Gráfico 5.12, Gráfico 5.13 y Gráfico 5.14, se muestran los resultados obtenidos en el laboratorio y las predicciones del modelo matemático para cada Plan de Experimentación.

Comparativa de resultados de Resistencia a Compresión						
Designación	Resultados de laboratorio			Superficies de Respuesta		
	7 días	28 días	56 días	7 días	28 días	56 días
Resistencia a compresión (MPa)						
BAS-A-NA	0,802	-	1,330	-0,259	1,295	1,147
BAS-A-NA/LF	-	1,683	-	2,470	3,686	3,088
BAS-A-LF	1,166	-	1,362	0,969	1,847	0,780
BAS-B-NA	-	3,971	-	2,225	4,367	5,003
BAS-B-NA/LF	3,243	4,819	5,661	3,368	5,173	5,359
BAS-B-LF	-	2,321	-	0,281	1,748	1,484
BAS-C-NA	6,335	-	11,080	7,056	9,786	11,206
BAS-C-NA/LF	-	11,186	-	6,613	9,006	9,976
BAS-C-LF	1,530	-	3,594	1,941	3,996	4,512

Tabla 5.23 Comparativa de resultados de Resistencia a Compresión (MPa) para el Plan de Experimentación 1 (NA-LF).

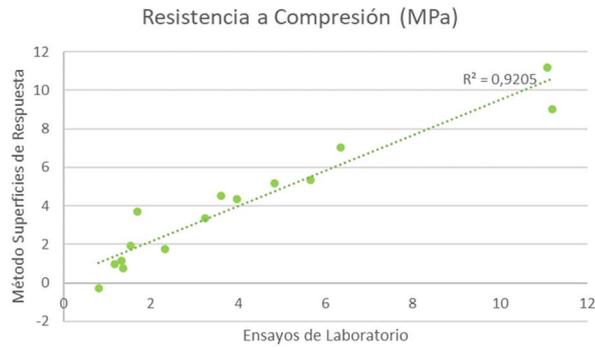


Gráfico 5.12 Comparativa de resultados de Resistencia a Compresión (MPa) para el Plan de Experimentación 1 (NA-LF).

Comparativa de resultados de Resistencia a Compresión						
Designación	Resultados de laboratorio			Superficies de Respuesta		
	7 días	28 días	56 días	7 días	28 días	56 días
Resistencia a compresión (MPa)						
BAS-A-NA	0,802	-	1,330	1,973	2,039	0,794
BAS-A-NA/EAF	-	0,974	-	-1,608	-0,934	-1,368
BAS-A-EAF	1,099	-	2,471	1,592	2,874	3,251
BAS-B-NA	-	3,971	-	3,152	4,627	5,262
BAS-B-NA/EAF	1,379	2,410	2,620	0,253	2,337	3,783
BAS-B-EAF	-	7,448	-	4,136	6,828	9,085
BAS-C-NA	6,335	-	11,080	5,362	8,247	10,761
BAS-C-NA/EAF	-	4,695	-	3,146	6,670	9,965
BAS-C-EAF	7,277	-	17,039	7,712	11,814	15,951

Tabla 5.24 Comparativa de resultados de Resistencia a Compresión (MPa) para el Plan de Experimentación 2 (NA-EAF).

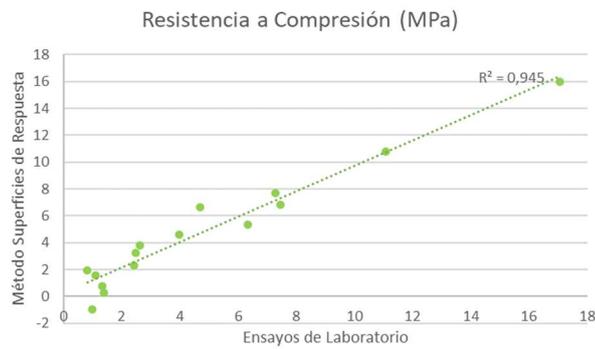


Gráfico 5.13 Comparativa de resultados de resistencia a compresión (MPa) para el Plan de Experimentación 2 (NA-EAF).

Comparativa de resultados de Resistencia a Compresión						
Designación	Resultados de laboratorio			Superficies de Respuesta		
	7 días	28 días	56 días	7 días	28 días	56 días
Resistencia a compresión (MPa)						
BAS-A-LF	1,166	-	1,362	2,349	2,364	0,540
BAS-A-LF/EAF	-	1,511	-	-0,330	0,631	0,070
BAS-A-EAF	1,099	-	2,471	0,740	2,646	3,347
BAS-B-LF	-	2,321	-	1,298	2,478	2,116
BAS-B-LF/EAF	1,572	2,827	3,302	0,888	2,974	3,913
BAS-B-EAF	-	7,448	-	4,226	7,258	9,458
BAS-C-LF	1,530	-	3,594	0,601	2,865	4,043
BAS-C-LF/EAF	-	4,863	-	2,459	5,670	8,109
BAS-C-EAF	7,277	-	17,039	8,066	12,223	15,923

Tabla 5.25 Comparativa de resultados de Resistencia a Compresión (MPa) para el Plan de Experimentación 3 (LF-EAF).

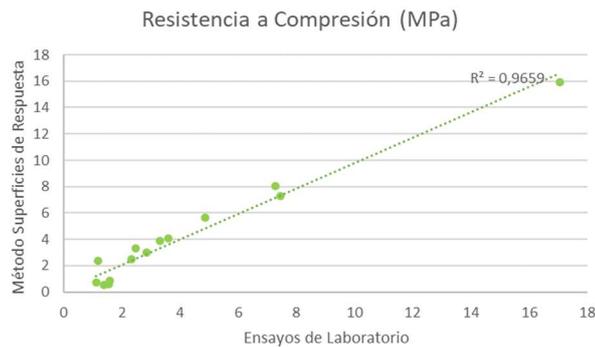


Gráfico 5.14 Comparativa de resultados de Resistencia a Compresión (MPa) para el Plan de Experimentación 3 (LF-EAF).

Del estudio comparativo de los resultados, se puede observar que los registros obtenidos mediante procesos experimentales y las predicciones del modelo de análisis mediante superficies de respuesta son equivalentes cuando los valores de resistencia mecánica son altos, mientras que hay una mayor dispersión para las resistencias bajas.

Cabe destacar las dispersiones obtenidas en las resistencias mecánicas de los morteros que combinan ambos tipos de escoria, registrando incluso valores negativos, circunstancia que conceptualmente no es posible al no existir una resistencia negativa.

Por último, en la Tabla 5.26 se muestran los valores obtenidos para el ensayo de Resistencia a Compresión para los diferentes tipos de morteros ensayados, utilizando los registros medios obtenidos en los diferentes

Planes de Experimentación. De este modo, se puede observar la evolución de su resistencia mecánica a 7, 28 y 56 días de edad.

Resumen de resultados de Resistencia a Compresión			
Designación	7 días (MPa)	28 días (MPa)	56 días (MPa)
BAS-A-NA	0,510	1,230	1,490
BAS-A-LF	1,720	1,790	1,200
BAS-A-EAF	0,857	2,557	2,937
BAS-A-NA/LF	0,270	0,670	0,510
BAS-A-NA/EAF	0,590	1,620	1,200
BAS-A-LF/EAF	0,330	0,648	0,070
BAS-B-NA	1,380	2,750	3,890
BAS-B-LF	2,590	3,310	3,590
BAS-B-EAF	3,290	6,630	8,520
BAS-B-NA/LF	1,140	2,180	2,900
BAS-B-NA/EAF	2,300	4,910	6,070
BAS-B-LF/EAF	0,888	3,047	3,912
BAS-C-NA	7,284	10,427	12,733
BAS-C-LF	4,520	5,900	7,040
BAS-C-EAF	8,220	13,130	16,600
BAS-C-NA/LF	3,070	4,770	6,340
BAS-C-NA-EAF	6,950	10,730	13,46
BAS-C-LF/EAF	2,460	5,799	8,108

Tabla 5.26 Resumen de resultados de Resistencia a Compresión (MPa) para los morteros estudiados.

5.6.3. Análisis de los resultados

Las consideraciones obtenidas de los ensayos a compresión de los morteros bastardos son muy similares a las obtenidas en los ensayos a fractura.

El primer análisis de estudio se realiza a la edad de 28 días, (Gráfico 5.15, Gráfico 5.16 y Gráfico 5.17) referencia temporal característica para determinar la Resistencia Nominal de los morteros, es decir, el tiempo medio para garantizar la hidratación de los componentes y asegurar su fraguado y endurecimiento.

El segundo análisis se basa en la edad de curado (Gráfico 5.18, Gráfico 5.19 y Gráfico 5.20), para ello es necesario bloquear otra variable diferente. En este caso con el fin de ver cómo afecta el comportamiento del tipo de conglomerante, se bloquea el parámetro de la sustitución de árido, estudiando las mezclas que tiene un 50% de cada uno de los dos áridos.

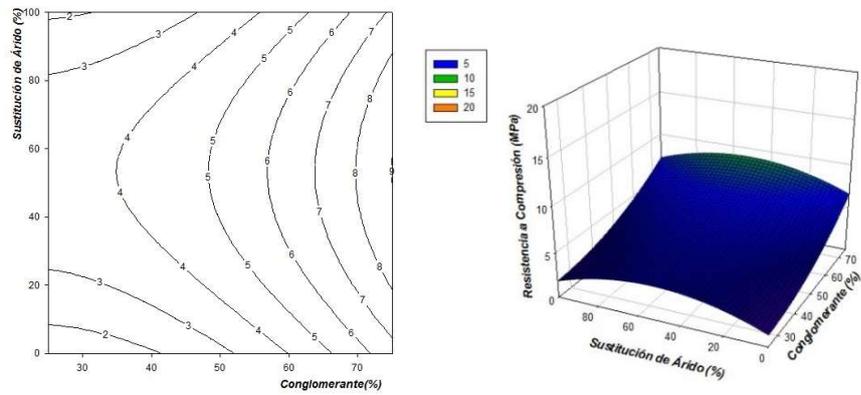


Gráfico 5.15 Gráfica de Contornos y Superficie de Respuesta Resistencia a Compresión (R.Comp.), en función de %C y TA para una edad de 28 días. (Plan de Experimentación 1).

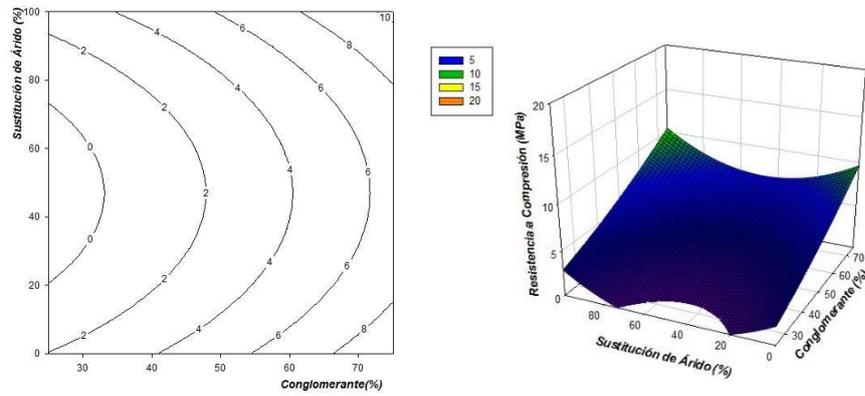


Gráfico 5.16 Gráfica de Contornos y Superficie de Respuesta Resistencia a Compresión (R.Comp.), en función de %C y TA para una edad de 28 días. (Plan de Experimentación 2).

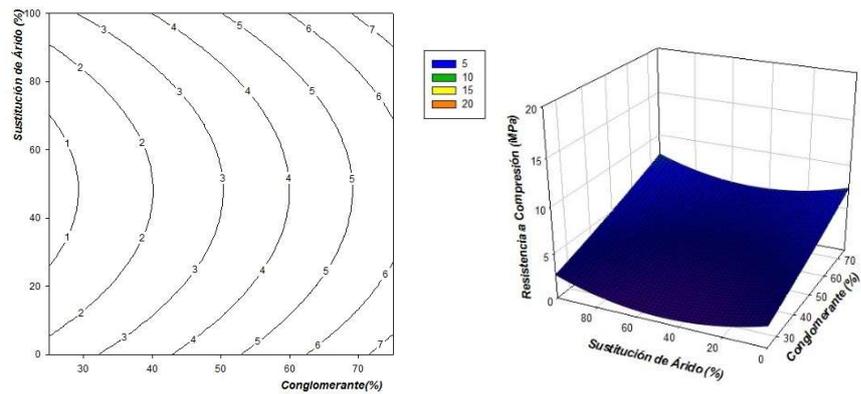


Gráfico 5.17 Gráfica de Contornos y Superficie de Respuesta Resistencia a Compresión (R.Comp.), en función de %C y TA para una edad de 28 días. (Plan de Experimentación 3).

Capítulo V

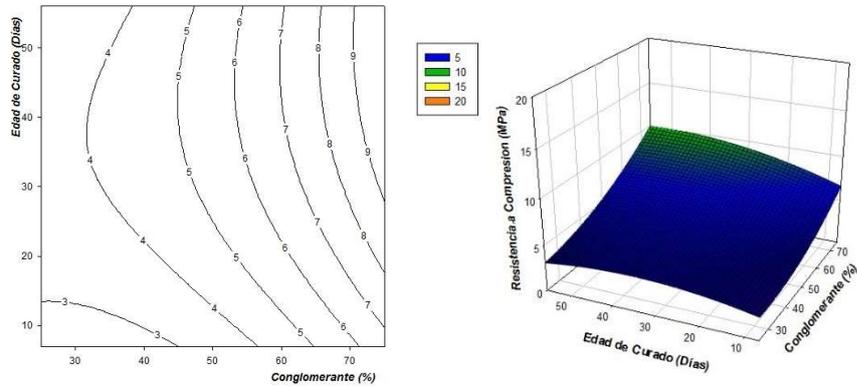


Gráfico 5.18 Gráfica de Contornos y Superficie de Respuesta Resistencia a Compresión (R.Comp.), en función de %C y EC para para la dosificación tipo B. (Plan de Experimentación 1).

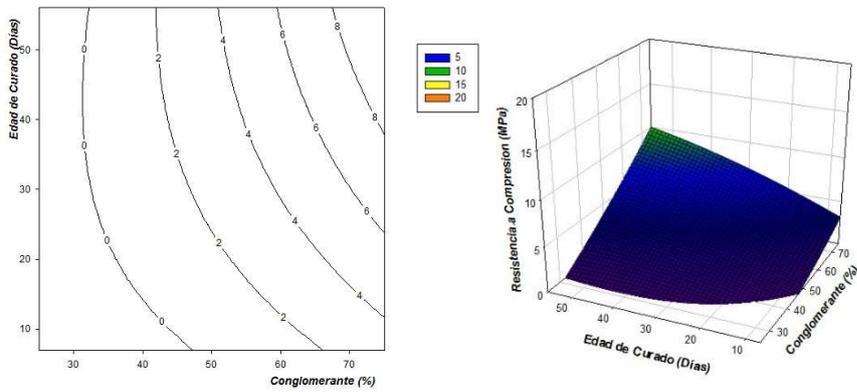


Gráfico 5.19 Gráfica de Contornos y Superficie de Respuesta Resistencia a Compresión (R.Comp.), en función de %C y EC para para la dosificación tipo B. (Plan de Experimentación 2).

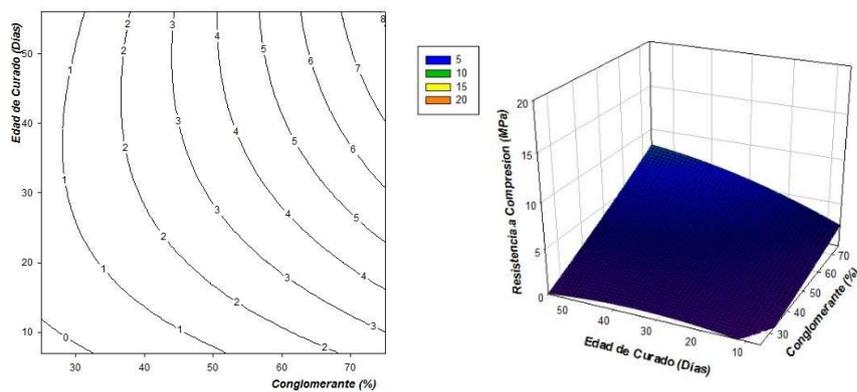


Gráfico 5.20 Gráfica de Contornos y Superficie de Respuesta Resistencia a Compresión (R.Comp.), en función de %C y EC para para la dosificación tipo B. (Plan de Experimentación 3).

En general, cabe destacar la elevada resistencia mecánica que aporta la escoria EAF en los morteros objeto de estudio, registrando los mayores valores de todas las posibles combinaciones.

La resistencia mecánica de los morteros fabricados con escoria LF y con arena silícica muestra distintos comportamientos. En efecto, cuando la cantidad de cal dosificada es mayor que la de cemento, los morteros con escoria LF registran valores mayores.

Por el contrario, los morteros fabricados con arena silícica mejoran su comportamiento mecánico conforme se incrementa la proporción de cemento/cal.

La escoria LF influye menores resistencias mecánicas en los morteros. Los registros obtenidos muestran que los morteros dosificados con escoria LF, en cualquier proporción junto con el resto de áridos, muestran comportamientos mecánicos semejantes a los que solo incorpora escoria LF, lo que da una idea de la influencia de este tipo de residuo en el comportamiento final de los morteros.

Por el contrario, la incorporación de escoria negra a las mezclas determina un incremento de las resistencias mecánicas en todos los casos.

Si se considera la edad de curado, los morteros dosificados con mayores proporciones de cemento incrementan progresivamente su resistencia mecánica, como se puede observar si se compara los registros a 7, 28 y 56 días de edad.

Por el contrario, los morteros con menor proporción cemento/cal no muestran incrementos significativos, por lo que se puede afirmar que el proceso de carbonatación de la cal precisa de más tiempo para poder completarse.

5.7. CONCLUSIONES

Respecto del Método de Análisis:

1. La aplicación del Método de Análisis Mediante Superficies de Respuesta al estudio de las Resistencias Mecánicas de los morteros bastardos objeto de estudio es un procedimiento de análisis útil para conocer su comportamiento.
2. De los resultados obtenidos en la investigación se puede concluir que el Método de Análisis Mediante Superficies de Respuesta puede ser utilizado en el estudio de las mezclas con comportamientos mecánicos idóneos, especialmente cuando los valores de resistencia mecánica son especialmente altos.
3. Los morteros con resistencias mecánicas bajas presentan dispersiones elevadas en los resultados, probablemente justificadas por el grado de

fiabilidad del propio programa (en torno al 95%) y por la sensibilidad de los equipos de rotura utilizados en el ensayo de fractura.

Respecto del material ensayado:

4. Los morteros fabricados con escoria negra presentan mejores comportamientos mecánicos que los fabricados con escoria blanca o con arena.
5. Las resistencias mecánicas de los morteros diseñados varían en función de la cantidad de cal sustituida por cemento y del tipo de árido utilizado.
6. En los morteros con mayores cantidades de cal dosificada es necesario más tiempo de curado para favorecer los procesos de carbonatación, y así poder realizar los ensayos de resistencia mecánica a mayores edades para que los valores obtenidos puedan ser validados.
7. Los morteros fabricados con áridos silíceos incrementan sus propiedades mecánicas proporcionalmente en función de la cantidad de cemento utilizada. No es el caso de los morteros con escoria LF, que presentan mayores resistencias mecánicas que los morteros de arena cuanto mayor es la cantidad de cal dosificada, produciéndose un incremento menor de resistencia al añadir mayores cantidades de cemento, o lo que es lo mismo, presentando las mezclas con mayor cantidad de cemento menores resistencias que sus equivalentes en árido natural.
8. No obstante, para morteros con grandes cantidades de cal es posible la sustitución de la arena por la escoria blanca, ya que los resultados de resistencia mecánica son adecuados. No es el caso cuando la presencia de cemento es mayor.
9. De las mezclas caracterizadas, las dosificadas con escoria EAF o escoria EAF y arena permiten obtener resistencias mecánicas medias (7 N/mm^2), lo que las hace idóneas para su utilización como morteros de albañilería en construcción.



CAPITULO VI

Caracterización de los morteros con áridos siderúrgicos

6. CARACTERIZACIÓN DE LOS MORTEROS CON ÁRIDOS SIDERÚRGICOS

Aunque los morteros bastardos fabricados con áridos siderúrgicos muestran un comportamiento mecánico aceptable, es preciso conocer más propiedades de las mezclas, tanto en estado fresco como endurecido, con el fin de determinar si cumplen con las prescripciones técnicas establecidas por la normativa vigente, para ser utilizadas para morteros en construcción.

La gran cantidad de dosificaciones estudiadas obliga a realizar un número ingente de ensayos, por lo que, a partir de las consideraciones aportadas en la fase experimental previa, de acuerdo con los criterios de resistencia a compresión y tenacidad a la fractura, se determinan los morteros que son objeto de análisis en este capítulo.

Por un lado, se seleccionan las dosificaciones realizadas con un solo árido, eliminando las que combinan dos tipos (arena-escoria blanca, arena-escoria negra o escoria blanca-escoria negra).

Al mismo tiempo, para obtener información relativa a la dosificación de los conglomerantes utilizados (cal y cemento), se estudian también las mezclas realizadas con un 100% de cal y un 100% de cemento. Estas dosificaciones habían quedado excluidas debido al diseño de experimentos planteando en el apartado anterior.

Manteniendo la designación de los morteros anteriores (página 136), las nuevas dosificaciones serán identificadas de acuerdo con los siguientes criterios:

- CAL: si se trata de un mortero que utiliza como conglomerante solo cal aérea.
- CEM: para los morteros que utilizan como conglomerante solo cemento.
- Seguimiento del tipo de árido: NA (Ar) para el árido natural, LF (Eb) para la escoria blanca y EAF (En) para la escoria negra.

Es necesario señalar que estas dos mezclas no son morteros bastardos, puesto que solo incorporan un conglomerante, pero sí lo serían si se consideran los extremos de mínima y máxima sustitución de cal. Por ello, la incorporación de estas dosificaciones no solo proporciona los datos obtenidos para ellas, si no que permite estudiar todo el espectro posible de sustitución de cal y cemento, es decir, las sustituciones progresivas de cal por cemento desde el 0% al 100%.

Por esta razón, estas mezclas serán estudiadas conjuntamente con los morteros bastardos, con el fin de simplificar los subapartados de este capítulo. Además, al tratarse de dosificaciones en relación de componentes

en peso 1/6, se pueden comparar con las dosificaciones iniciales (BAS-A, BAS-B y BAS-C).

Las quince dosificaciones resultantes que se estudian se muestran en la Tabla 6.1:

Dosificaciones y nomenclatura utilizada para los morteros bastardos								
Designación			% Cal	% Cemento	% Arena Silícea	% Escoria Blanca (LF)	% Escoria Negra (EAF)	Dosificación
100		NA			100	-	-	
100		LF	100	-	-	100	-	1/6
100		EAF			-	-	100	
75	25	NA			100	-	-	
75	25	LF	75	25	-	100	-	1/6
75	25	EAF			-	-	100	
50	50	NA			100	-	-	
50	50	LF	50	50	-	100	-	1/6
50	50	EAF			-	-	100	
25	75	NA			100	-	-	
25	75	LF	25	75	-	100	-	1/6
25	75	EAF			-	-	100	
100		NA			100	-	-	
100		LF	-	100	-	100	-	1/6
100		EAF			-	-	100	

Tabla 6.1 Dosificaciones y nomenclatura utilizada para los morteros bastardos.

Por la baja resistencia mecánica de los morteros BAS-A (75% cal y 25 cemento), es previsible que las mezclas diseñadas sólo con cal como conglomerante en una dosificación 1/6, no alcancen los requerimientos técnicos establecidos para que los morteros puedan ser utilizados. Por ello, y con el fin de trabajar con mezclas que presenten mejores comportamientos, en este capítulo se procede al estudio de los morteros de cal fabricados con áridos siderúrgicos en cantidades mayores a la dosificación 1/6.

Son muy pocos los estudios precedentes de morteros diseñados con cal como conglomerante y escorias siderúrgicas como árido, por lo que tampoco existen demasiadas referencias bibliográficas en esta materia para fundamentar la investigación desarrollada. Como referencia para el estudio de los morteros de cal se utilizan las reflexiones recogidas en la

investigación de Raúl Zarzosa Tartilán²³³, ya que es uno de los pocos estudios realizados para el diseño de morteros fabricados con cal como conglomerante y escorias siderúrgicas como árido.

En este estudio se analiza la combinación de la escoria blanca con la cal aérea con las relaciones de componentes cal/árido mostradas en la Tabla 6.2:

Relación cal/árido		
Cal/árido	% Cal	% Árido
1/4	20	80
1/1,5	40	60
1/0,66	60	40

Tabla 6.2 Nuevas relaciones cal/árido estudiadas.

La línea granulométrica empleada en este trabajo es idéntica a la utilizada en esta Tesis, por lo que los morteros diseñados pueden ser comparados con los morteros bastardos de dosificación 1/6.

Con el fin de realizar un estudio completo, se revisan y repiten los ensayos realizados y se incrementa el número de dosificaciones estudiadas, incorporando nuevos materiales: cal hidráulica como conglomerante y escoria negra como árido.

De este modo, en el proceso experimental se han utilizado dos tipos de cales: una cal aérea (CL-90 S), para comprobar la compatibilidad de la cal pura con los áridos siderúrgicos, y cal hidráulica (NHL-5) con la que se pretende observar la mejora de las propiedades en comparación con los morteros fabricados con cal aérea y con los morteros bastardos.

La designación para las dosificaciones realizadas con cal es:

- C: dado que es un mortero de cal.
- Seguido de la letra A o H: A para cal aérea o H para la cal hidráulica.
- Acompañado del porcentaje en masa del conglomerante empleado (20, 40, 60) %.
- A continuación, el tipo de árido: NA (Ar) para el árido natural, LF (Eb) para la escoria blanca y EAF (En) para la escoria negra.

De acuerdo con este planteamiento, resultan las dieciocho dosificaciones que se muestran en la Tabla 6.3:

²³³ Zarzosa Tartilán, R. (2012). Fabricación de morteros de cal con escorias blancas de horno cuchara, Escuela Politécnica Superior. Universidad Politécnica de Burgos, España.

Dosificaciones y nomenclatura utilizada para los morteros realizados con cales aéreas e hidráulicas									
Designación			% Cal		% Árido		Dosificación		
	Aérea	Hidra.	Arena	Escoria Blanca	Escoria Negra				
20	80		CA20-NA	20	-	80	-	-	1/4
40	60		CA40-NA	40	-	60	-	-	1/1,5
60	40		CA60-NA	60	-	40	-	-	1/0,66
20	80		CH20-NA	-	20	80	-	-	1/4
40	60		CH40-NA	-	40	60	-	-	1/1,5
60	40		CH60-NA	-	60	40	-	-	1/0,66
20	80		CA20-LF	20	-	-	80	-	1/4
40	60		CA40-LF	40	-	-	60	-	1/1,5
60	40		CA60-LF	60	-	-	40	-	1/0,66
20	80		CH20-LF	-	20	-	80	-	1/4
40	60		CH40-LF	-	40	-	60	-	1/1,5
60	40		CH60-LF	-	60	-	40	-	1/0,66
20	80		CA20-EAF	20	-	-	-	80	1/4
40	60		CA40-EAF	40	-	-	-	60	1/1,5
60	40		CA60-EAF	60	-	-	-	40	1/0,66
20	80		CH20-EAF	-	20	-	-	80	1/4
40	60		CH40-EAF	-	40	-	-	60	1/1,5
60	40		CH60-EAF	-	60	-	-	40	1/0,66

Tabla 6.3 Dosificaciones y nomenclatura utilizada para los morteros realizados con cales aéreas e hidráulicas.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos en los ensayos de caracterización de los morteros. La Tesis Doctoral recoge conjuntamente ambos estudios, con el fin de poder realizar el comparativo entre el comportamiento de los morteros bastardos, los morteros de cemento y los morteros de cal, de acuerdo con los criterios de dosificación descritos.

6.1. ESTADO FRESCO

Los ensayos en estado fresco se realizan antes de que el mortero haya perdido parte del agua de amasado, finalizando su fraguado y

endurecimiento como consecuencia de los procesos simultáneos de carbonatación de la cal y de hidratación del cemento.

La relación agua/conglomerante, densidad y aire ocluido son tres propiedades necesarias para definir las características del mortero. Al mismo tiempo, se analizan otras propiedades no ensayadas en el capítulo anterior, como la trabajabilidad y la retención de agua.

6.1.1. Consistencia y relación agua/conglomerante

El mortero en estado fresco viene condicionado por las relaciones entre los componentes que lo integran. Esta unión se conoce con el nombre de consistencia y determina la facilidad de su puesta en obra o trabajabilidad.

La consistencia de un mortero depende fundamentalmente de la dosificación de la mezcla diseñada, es decir, de la relación entre el conglomerante y el árido, de la relación entre el agua y el conglomerante y de la naturaleza del árido y de su granulometría.

Cuando la consistencia es seca, el mortero es menos trabajable, pues se produce un excesivo rozamiento entre las partículas del árido, ya que la pasta formada por el conglomerante y el agua no rellena bien los huecos existentes. Por otro lado, 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 de conglomerante.

Por todo ello, los morteros utilizados en las investigaciones se diseñan con una consistencia plástica, con un escurrimiento en la mesa de sacudidas de 175 ± 10 mm. De esta forma, se garantiza que todo el árido esté perfectamente rodeado de pasta, sin perder cohesión.

6.1.1.1. Análisis de los morteros bastardos

La relación agua/conglomerante obtenida para los diferentes morteros se muestra en la Tabla 6.4:

Relación agua/conglomerado de los morteros bastardos					
	CAL-NA	BAS-A-NA	BAS-B-NA	BAS-C-NA	CEM-NA
Variación	1,45	1,28	1,20	1,13	1,09
		-11,72%	-17,24%	-22,07%	-24,83%
	CAL-LF	BAS-A-LF	BAS-B-LF	BAS-C-LF	CEM-LF
Variación	2,61	2,54	2,45	2,38	2,30
		-2,68%	-6,13%	-8,81%	-11,88%
	CAL-EAF	BAS-A-EAF	BAS-B-EAF	BAS-C-EAF	CEM-EAF
Variación	1,23	1,15	1,08	1,02	0,95
		-6,50%	-12,20%	-17,07%	-22,76%

Tabla 6.4 Relación agua/conglomerante de los morteros bastardos.

En el Gráfico 6.1 se observa que, para cualquiera que sea el tipo de árido utilizado, la cantidad de agua requerida es menor cuando se aumenta el porcentaje de cemento y disminuye el porcentaje de cal. La disminución es constante de una dosificación a otra (con un 25% más de cemento) y es aproximadamente de un 5-6% en todos los casos. La presencia de mayor cantidad de cal en la relación cal/cemento, determina un incremento progresivo de la cantidad de agua necesaria para obtener morteros de consistencia plástica.

La extraordinaria finura de la mayor parte de las partículas que componen la cal utilizada (Superficie Especifica Blaine entre 8.000 y 10.000 cm^2/g), puede justificar este comportamiento, ya que se requiere una mayor cantidad de agua para su hidratación y posterior carbonatación.

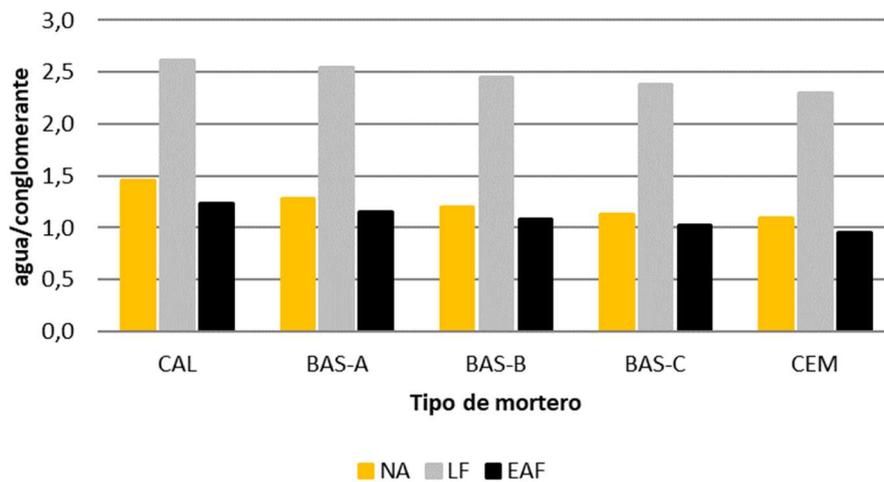


Gráfico 6.1 Relación agua/conglomerante de los morteros bastardos.

Si el estudio se orienta desde el punto de vista del árido utilizado, se observa cómo la escoria blanca precisa mayores cantidades de agua, aproximadamente el doble en todos los casos. Este comportamiento puede ser explicado mediante dos razonamientos:

El primero, debido a su finura (Superficie Especifica Blaine entre 2.654-3.091 cm^2/g), y al carácter hidrófobo de este material, observado por otros autores en este tipo de residuos²³⁴.

El segundo razonamiento puede explicarse mediante el análisis químico de la escoria blanca, en el que se puede observar una gran cantidad de CaO en su composición. Por ello, los morteros fabricados con escoria blanca contienen, además de la cal que actúa como conglomerante, un

²³⁴ Bouasker, M., N. E. H. Khalifa, P. Mounanga and N. B. Kahla (2014). "Early-age deformation and autogenous cracking risk of slag-limestone filler-cement blended binders." *Construction and Building Materials* **55**: 158-167.

porcentaje adicional aportado por la propia escoria, demandando mayor cantidad de agua de dosificación.

Respecto a las mezclas con escoria negra, la cantidad de agua de amasado es ligeramente inferior a la de los morteros análogos dosificados con árido natural, aproximadamente un 10%.

6.1.1.2. Análisis de los morteros de cal

La relación agua/cal obtenida para los morteros de cal se muestra en la Tabla 6.5:

Relación agua/cal de los morteros de cal							
	CAL-NA	CA20-NA	CA40-NA	CA60-NA	CH20-NA	CH40-NA	CH60-NA
Variación	1,45	1,25	0,97	0,95	0,96	0,60	0,51
			-22,40%	-24,00%		-37,50%	-46,88%
	CAL-LF	CA20-LF	CA40-LF	CA60-LF	CH20-LF	CH40-LF	CH60-LF
Variación	2,61	1,85	1,15	0,93	1,67	0,87	0,60
			-37,84%	-49,73%		-47,90%	-64,07%
	CAL-EAF	CA20-EAF	CA40-EAF	CA60-EAF	CH20-EAF	CH40-EAF	CH60-EAF
Variación	1,23	1,04	0,82	0,70	0,79	0,52	0,43
			-21,15%	-32,69%		-34,18%	-45,57%

Tabla 6.5 Relación agua/cal de los morteros de cal aérea e hidráulica.

Como se puede observar (Gráfico 6.2), la relación de agua/cal requerida para llegar a consistencia plástica disminuye con el incremento de la cantidad de cal. Sin embargo, aunque la relación de agua/cal sea baja, la cantidad de cal es muy elevada, por lo que el agua necesaria para alcanzar la consistencia plástica también es una cantidad importante.

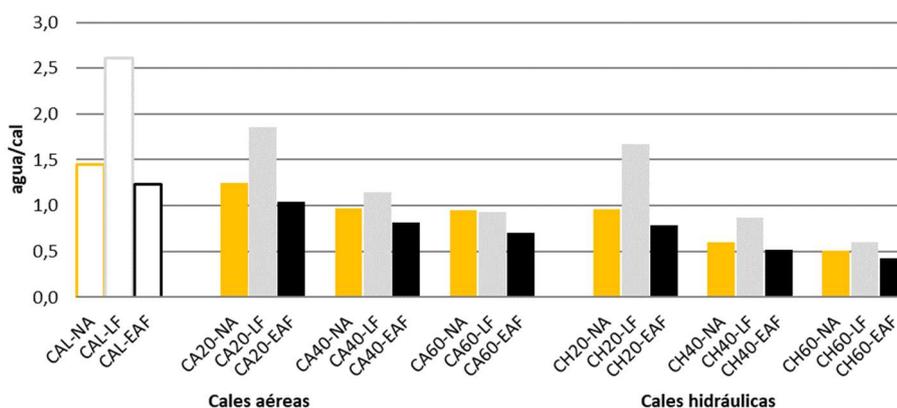


Gráfico 6.2 Relación agua/cal en los morteros de cal aérea e hidráulica.

El agua requerida por la cal aérea para el amasado es siempre mayor que la necesaria para hidratar la cal hidráulica, observándose una mayor disminución en las últimas. Este fenómeno es debido a que la cal hidráulica tiene un comportamiento más parecido a un cemento o a un mortero de cal y cemento, que al de la cal aérea.

En la fabricación de las mezclas, cuando los criterios de dosificación se mantienen iguales, la utilización de la escoria blanca como árido implica una mayor cantidad de agua de dosificación que en los morteros fabricados con arena, al igual que ocurre en los morteros bastardos.

De igual modo, los morteros que emplean escoria negra como árido, requieren una cantidad de agua ligeramente inferior a los dosificados con árido natural.

6.1.2. Densidad aparente

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. Es un factor que condiciona otras características de los morteros, como su trabajabilidad.

6.1.2.1. Análisis de los morteros bastardos

La densidad aparente del mortero fresco obtenida para las diferentes dosificaciones se muestra en la Tabla 6.6:

Densidad aparente en estado fresco de los morteros bastardos (kg/m ³)					
	CAL-NA	BAS-A-NA	BAS-B-NA	BAS-C-NA	CEM-NA
	1.963	2.020	2.052	2.069	2.098
Variación		2,90%	4,53%	5,40%	6,88%
	CAL-LF	BAS-A-LF	BAS-B-LF	BAS-C-LF	CEM-LF
	1.597	1.608	1.675	1.691	1.720
Variación		0,69%	4,88%	5,89%	7,70%
	CAL-EAF	BAS-A-EAF	BAS-B-EAF	BAS-C-EAF	CEM-EAF
	2.376	2.463	2.502	2.522	2.598
Variación		3,66%	5,30%	6,14%	9,34%

Tabla 6.6 Densidad aparente en estado fresco (kg/m³) de los morteros bastardos.

Las dosificaciones aumentan su densidad según se incrementa la cantidad de cemento dosificado y se reduce la cantidad de cal añadida. El incremento es progresivo y proporcional a la cantidad de cemento incorporado a las mezclas. Esto es debido a que el cemento tiene mayor densidad que la cal aérea. Sin embargo, de acuerdo con los resultados obtenidos, este incremento es poco significativo (Gráfico 6.3). Por ello, es el tipo de árido el que condiciona esta propiedad, siendo independiente del conglomerante utilizado en las mezclas.

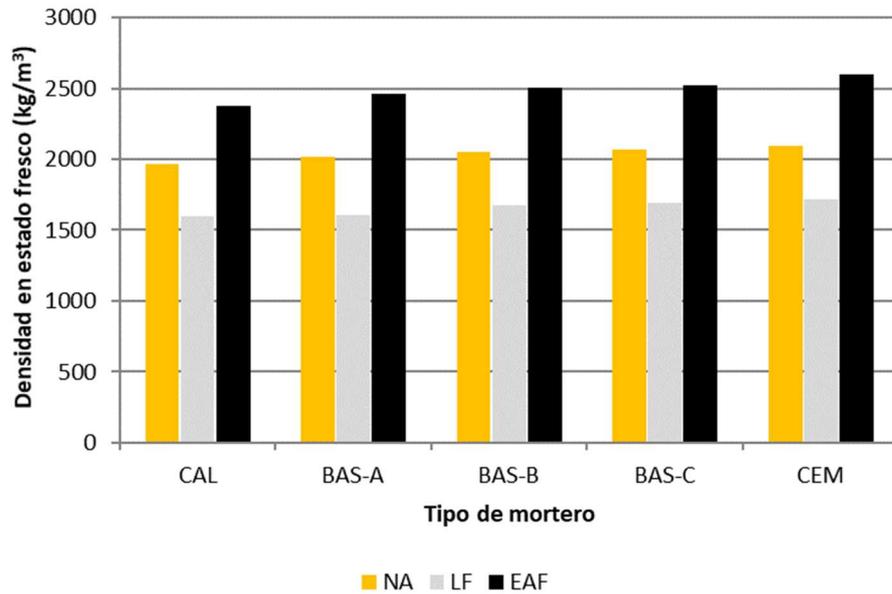


Gráfico 6.3 Densidad en estado fresco (kg/m^3) de los morteros bastardos.

Si el estudio se realiza tomando como referencia el árido utilizado, la naturaleza de la escoria condiciona la densidad de las mezclas. Se obtienen menores densidades en los morteros dosificados con escoria blanca que en los dosificados con arena silícica. Por el contrario, las densidades son mayores en los morteros dosificados con escoria negra. En ambos casos, la variación media es de un 20%, respecto de la densidad del mortero patrón de referencia.

Las densidades de los morteros fabricados con escoria negra son mayores por la propia naturaleza de este tipo de residuo, con una densidad muy alta (3.645 kg/m^3) en comparación con la del árido silícico natural utilizado (2.600 kg/m^3).

Según este mismo razonamiento, la densidad de los morteros de escoria blanca debería ser ligeramente superior a los morteros de árido natural, pues la densidad de la escoria blanca es también superior (2.860 kg/m^3). Sin embargo, esto no se cumple, presentando los morteros dosificados con escoria blanca las menores densidades.

Este comportamiento se justifica porque las mezclas precisan una mayor cantidad de agua de amasado, lo que determina una mayor porosidad en ese tipo de morteros.

El Gráfico 6.4 muestra la relación que existe entre la densidad en estado fresco del mortero y su relación agua conglomerante.

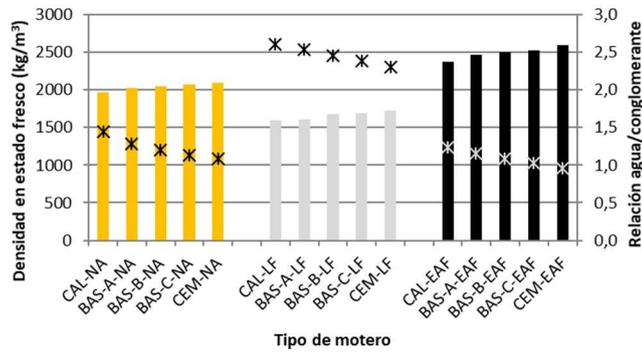


Gráfico 6.4 Relación entre la densidad en estado fresco (kg/m^3) y la cantidad de agua de amasado de los morteros bastardos.

6.1.2.2. Análisis de los morteros de cal

La densidad en estado fresco de los morteros de cal se recoge en la Tabla 6.7:

Densidad aparente en estado fresco de los morteros (Kg/m^3)							
	CAL-NA	CA20-NA	CA40-NA	CA60-NA	CH20-NA	CH40-NA	CH60-NA
Variación	1.963	1.960	1.720	1.560	2.083	1.935	1.894
			-12,24%	-20,41%		-7,11%	-9,07%
	CAL-LF	CA20-LF	CA40-LF	CA60-LF	CH20-LF	CH40-LF	CH60-LF
Variación	1.597	2.020	1.642	1.366	1.751	1.770	1.776
			-18,71%	-32,38%		1,09%	1,43%
	CAL-EAF	CA20-EAF	CA40-EAF	CA60-EAF	CH20-EAF	CH40-EAF	CH60-EAF
Variación	2.376	2.504	1.934	1.641	2.465	2.290	2.054
			-22,76%	-34,46%		-7,10%	-16,67%

Tabla 6.7 Densidad aparente en estado fresco (Kg/m^3) de los morteros de cal aérea e hidráulica.

De acuerdo con los resultados obtenidos, la densidad del mortero baja progresivamente según se va aumentando la cantidad de cal aérea añadida, debido a que la densidad de la cal es mucho más baja que la de los áridos utilizados.

Sin embargo, en las mezclas dosificadas con cal hidráulica, se observa como el efecto que produce la densidad de la propia cal es menor, obteniendo mezclas con similares densidades, independientemente de la cantidad de cal hidráulica utilizada, igual que ocurre para los morteros bastardos.

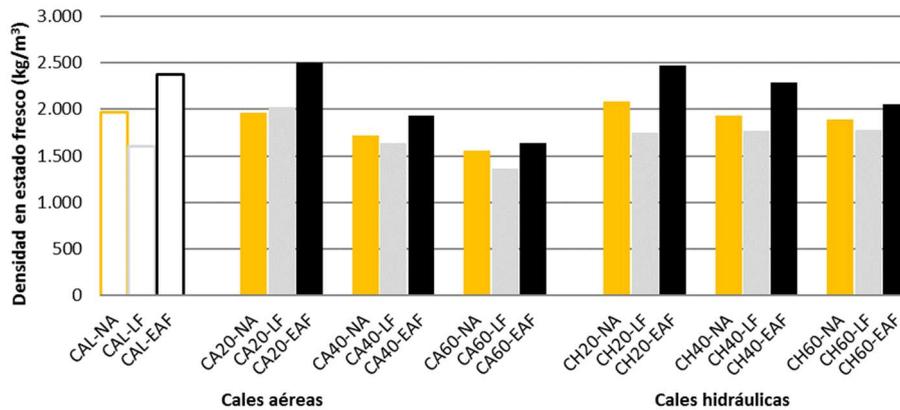


Gráfico 6.5 Densidad aparente en estado fresco (kg/m³) de los morteros de cal aérea e hidráulica.

En el caso del uso de la cal hidráulica como conglomerante, en los morteros de escoria blanca se observa que las densidades obtenidas son muy similares entre sí, aunque de igual modo, menores.

Para los morteros con escoria negra, los valores muestran densidades mucho mayores que en los otros dos casos, nuevamente debido a la alta densidad de la escoria negra. La diferencia al comparar las dosificaciones elaboradas con escoria negra y arena es mayor, siendo la densidad de las mezclas con escoria negra mucho más elevada que las de las mezclas patrón (Gráfico 6.5).

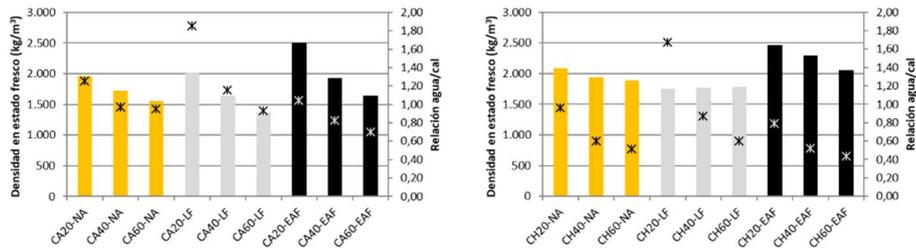


Gráfico 6.6 Relación entre la densidad en estado fresco (kg/m³) y la cantidad de agua de amasado de los morteros de cal aérea e hidráulica.

El Gráfico 6.6 muestra la relación que existe entre la densidad en estado fresco del mortero y su relación agua conglomerante.

6.1.3. Cantidad de aire ocluido

La cantidad de aire ocluido en las mezclas de mortero en estado fresco favorece la manipulación y trabajabilidad del mismo. Además, es

determinante en el comportamiento del mortero cuando está expuesto a los agentes meteorológicos externos.

6.1.3.1. Análisis de los morteros bastardos

En la Tabla 6.8 se muestra la cantidad de aire ocluido obtenida en las diferentes dosificaciones:

Cantidad de aire ocluido de los morteros bastardos (%)					
	CAL-NA	BAS-A-NA	BAS-B-NA	BAS-C-NA	CEM-NA
Variación	3,10	4,80	6,20	7,40	5,40
		54,84%	100,00%	138,71%	74,19%
	CAL-LF	BAS-A-LF	BAS-B-LF	BAS-C-LF	CEM-LF
Variación	8,00	9,30	11,50	11,90	11,20
		16,25%	43,75%	48,75%	40,00%
	CAL-EAF	BAS-A-EAF	BAS-B-EAF	BAS-C-EAF	CEM-EAF
Variación	3,90	4,20	5,80	6,90	6,80
		7,69%	48,72%	76,92%	74,36%

Tabla 6.8 Cantidad de aire ocluido (%) de los morteros bastardos.

Tomando como referencia las diferentes cantidades de cal y cemento dosificadas en las mezclas, los resultados muestran una tendencia uniforme. El aire ocluido aumenta en los morteros según se va incrementando la cantidad de cemento en la dosificación, mientras que las mezclas con más cantidad de cal contienen menos aire ocluido. Este comportamiento se puede explicar por el menor volumen de huecos que determina la granulometría más fina de la cal, en comparación con la del cemento, algo más gruesa. Al incrementarse la Superficie Específica Blaine, el volumen de huecos es menor (Superficie Específica Blaine entre 8.000 y 10.000 cm²/g de la cal, frente a los 3.934 cm²/g del cemento).

Sin embargo, cuando la cantidad de cemento es elevada, sin presencia de cal (CEM-NA, CEM-LF y CEM-EAF), esta tendencia se invierte, descendiendo la cantidad de aire ocluido con respecto a la dosificación anterior. Esto se debe a que el cemento se compacta mejor sin la presencia de la cal entre sus granos, debido a su peso.

Por otra parte, es preciso considerar que la mezcla de dos conglomerantes puede dar resultados muy diferentes cuando se dosifican por separado. No sería extraño obtener comportamientos diferentes en los morteros de cal aérea o en los morteros de cemento, respecto de los morteros bastardos.

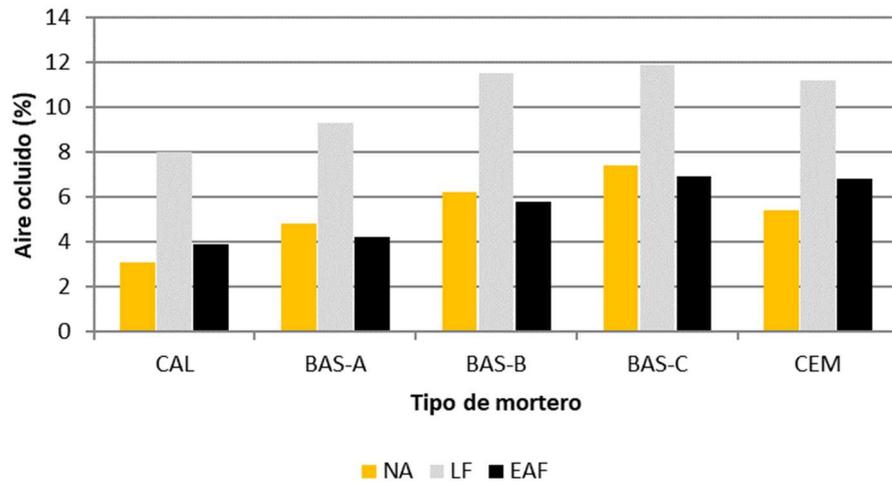


Gráfico 6.7 Cantidad de aire ocluido (%) de los morteros bastardos.

En el Gráfico 6.7 se observa cómo las mezclas con escoria blanca presentan un mayor porcentaje de aire ocluido, debido probablemente a la cantidad de agua de amasado necesaria, que al evaporarse crea más espacios entre grano y grano.

Por el contrario, las dosificaciones de escoria negra y árido natural poseen menos cantidad que las de escoria blanca, lo que indica un comportamiento totalmente diferente entre las partículas de los dos tipos de escorias utilizados, siendo el comportamiento de la escoria negra similar al del árido natural.

Tras estudiar la cantidad de aire ocluido en las mezclas, se explica con mayor claridad el comportamiento de las mismas respecto a su densidad aparente.

En las mezclas de arena y de escoria negra, es determinante la densidad de las propias partículas, al ser las cantidades de aire ocluido similares, presentando una mayor densidad las mezclas con escoria negra, al tener esta mayor densidad que la arena.

Sin embargo, en el caso de la sustitución por escoria blanca, la gran cantidad de aire ocluido hace mínima la influencia de la densidad de las partículas, provocando que la densidad de las mezclas sea mucho menor.

El Gráfico 6.8 muestra la relación que existe entre la densidad en estado fresco del mortero y el aire ocluido.

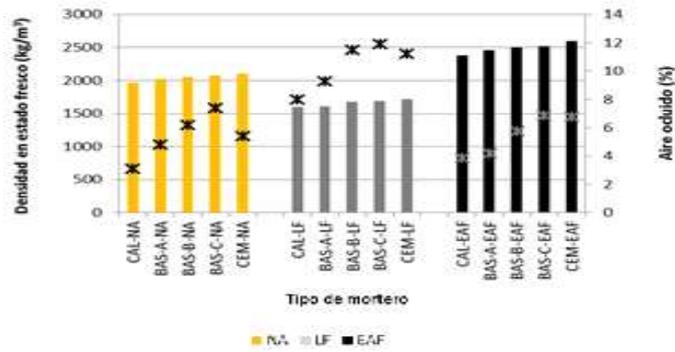


Gráfico 6.8 Relación existente entre densidad aparente del mortero fresco (kg/m^3) y cantidad de aire ocluido (%) de los morteros bastardos.

6.1.3.2. Análisis de los morteros de cal

En la Tabla 6.9 se muestra la cantidad de aire ocluido obtenida en las diferentes dosificaciones:

Aire ocluido de los morteros de cal (%)							
	CAL-NA	CA20-NA	CA40-NA	CA60-NA	CH20-NA	CH40-NA	CH60-NA
Variación	3,10	4,40	4,10	4,30	2,20	4,00	3,50
			-6,82%	-2,27%		81,82%	59,09%
	CAL-LF	CA20-LF	CA40-LF	CA60-LF	CH20-LF	CH40-LF	CH60-LF
Variación	8,00	4,00	6,60	6,80	10,00	7,10	5,60
			65,00%	70,00%		-29,00%	-44,00%
	CAL-EAF	CA20-EAF	CA40-EAF	CA60-EAF	CH20-EAF	CH40-EAF	CH60-EAF
Variación	3,90	6,50	4,20	3,60	4,60	4,30	4,10
			-35,38%	-44,62%		-6,52%	-10,87%

Tabla 6.9 Cantidad de aire ocluido (%) de los morteros de cal aérea e hidráulica.

En el caso de los morteros dosificados con cal aérea, un primer análisis de los resultados obtenidos en los ensayos permite afirmar que el aire ocluido no sufre variaciones importantes cuando utilizamos árido natural. Sin embargo, si se utiliza escoria blanca el porcentaje de aire aumenta conforme se incrementa la cantidad de cal añadida. En el caso de la escoria negra, los registros son menores y se produce una reducción progresiva conforme se incrementa la cantidad de cal.

En los morteros dosificados con cal hidráulica, el aire ocluido disminuye progresivamente conforme se incrementa la cantidad de cal dosificada, tanto en el caso de la escoria blanca como de la negra. Los registros de aire son mayores en el caso de la escoria blanca, probablemente justificado por la mayor cantidad de agua necesaria para conseguir la consistencia plástica.

Caracterización de los morteros con áridos siderúrgicos

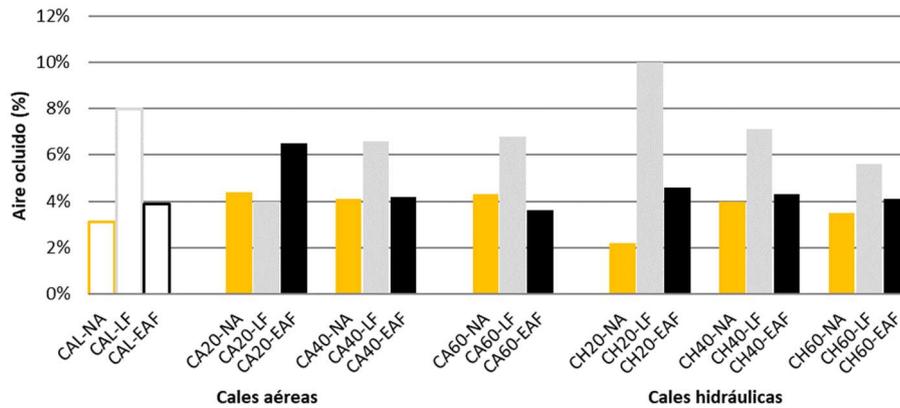


Gráfico 6.9 Cantidad de aire ocluido (%) en los morteros de cal aérea e hidráulica.

De los resultados obtenidos (Gráfico 6.9) se evidencia que, salvo en la mezcla CA20-LF, la cantidad de aire ocluido es mayor para los morteros dosificados con escoria blanca, lo que confiere morteros con mucha menos densidad.

En el caso de los morteros dosificados con escoria blanca, la tendencia es contraria si observamos su comportamiento tomando como referencia el tipo de cal utilizada. Con la cal aérea, la diferencia entre los valores obtenidos aumenta progresivamente según se va incrementando la cantidad de material añadido, mientras, en el caso de la cal hidráulica, cuanto mayor es la cantidad dosificada, menor es el volumen de aire ocluido.

Respecto a la utilización de la escoria negra se puede afirmar que ésta confiere cantidades de aire ocluido parecidas a las que se obtienen cuando se dosifica árido natural.

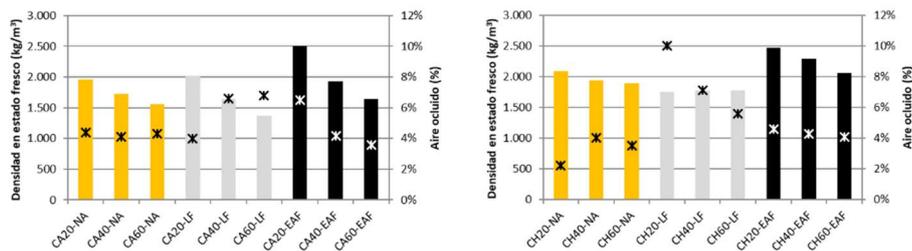


Gráfico 6.10 Comparativo densidad aparente del mortero fresco (kg/m^3) y cantidad de aire ocluido (%) para los morteros de cal aérea y cal hidráulica.

El Gráfico 6.10 muestra la relación que existe entre la densidad en estado fresco del mortero y el aire ocluido.

6.1.4. Tiempo de utilización o trabajabilidad

Tal y como se ha explicado anteriormente, todas las propiedades estudiadas hasta este momento influyen directamente en la trabajabilidad del mortero.

Las mezclas menos densas y con una mayor cantidad de aire ocluido en su interior, permiten la obtención de morteros más trabajables. Por lo general, los morteros diseñados con una consistencia plástica presentan una buena trabajabilidad, debido a que la pasta formada por el conglomerante y el agua rodea completamente los áridos. Esto permite un buen deslizamiento entre los granos sin perder la cohesión del conjunto.

6.1.4.1. Análisis de los morteros bastardos

Una vez mezclados los componentes del mortero, según la dosificación correspondiente en cada caso, el tiempo de uso en función de la velocidad de la reacción de hidratación del cemento y la carbonatación de la cal se muestran en la Tabla 6.10:

Tiempo de utilización de los morteros bastardos (minutos)					
	CAL-NA	BAS-A-NA	BAS-B-NA	BAS-C-NA	CEM-NA
	1.254	742	205	173	154
Variación		-40,83%	-83,65%	-86,20%	-87,72%
	CAL-LF	BAS-A-LF	BAS-B-LF	BAS-C-LF	CEM-LF
	384	310	205	175	127
Variación		-19,27%	-46,61%	-54,43%	-66,93%
	CAL-EAF	BAS-A-EAF	BAS-B-EAF	BAS-C-EAF	CEM-EAF
	300	239	153	135	117
Variación		-20,33%	-49,00%	-55,00%	-61,00%

Tabla 6.10 Tiempo de utilización (minutos) de los morteros bastardos.

Todas las muestras tienen un tiempo de trabajabilidad óptimo, entre 100 minutos y 400 minutos, menos en el caso de la utilización de árido natural, cuyas mezclas con gran cantidad de cal (CAL-NA y BAS-A-NA) presentan un tiempo de utilización mucho más elevado.

La cal es un material utilizado históricamente para mejorar la trabajabilidad de las mezclas, por lo que el tiempo de manipulación disminuye según se añade más cemento. Este comportamiento se explica por la diferencia entre los dos fenómenos de curado de las mezclas, puesto que la reacción de hidratación del cemento se produce con más velocidad que el proceso de carbonatación de la cal aérea.

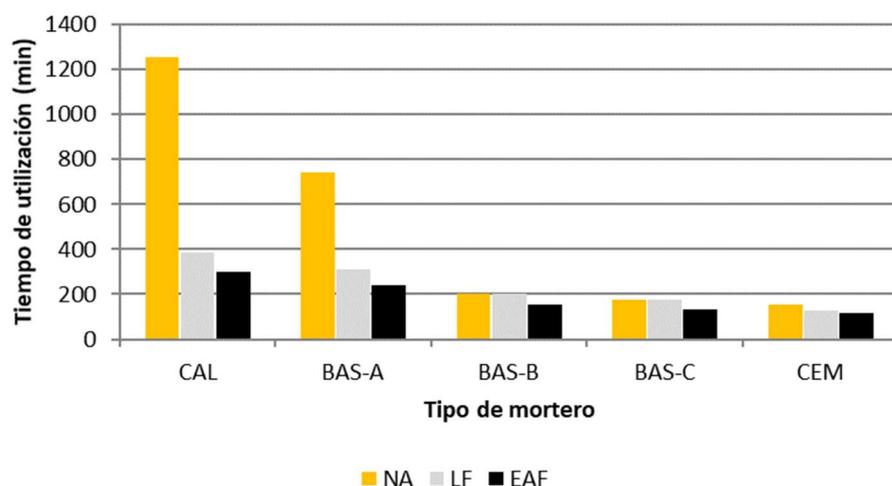


Gráfico 6.11 Tiempo de utilización (min) de los morteros bastardos.

Se completa esta observación (Gráfico 6.11) destacando el similar comportamiento por parte de los dos tipos de escoria con el árido natural, siempre que el contenido de cemento sea superior al 50%.

6.1.4.2. Análisis de los morteros de cal

En la Tabla 6.11 se recogen los valores de cada muestra de mortero de cal ensayada:

Tiempo de utilización de los morteros de cal (minutos)							
	CAL-NA	CA20-NA	CA40-NA	CA60-NA	CH20-NA	CH40-NA	CH60-NA
Variación	1.254	1.498	4.454	8.908	386	623	607
			197,33%	494,66%		61,40%	57,25%
	CAL-LF	CA20-LF	CA40-LF	CA60-LF	CH20-LF	CH40-LF	CH60-LF
Variación	384	535	1.502	2.932	241	273	337
			180,75%	448,04%		13,28%	39,83%
	CAL-EAF	CA20-EAF	CA40-EAF	CA60-EAF	CH20-EAF	CH40-EAF	CH60-EAF
Variación	300	2.905	2.364	1.430	390	333	228
			-18,62%	-50,77%		-14,62%	-41,54%

Tabla 6.11 Tiempo de utilización de los morteros de cal estudiados.

El primer aspecto que destaca es el elevado tiempo de utilización de los morteros dosificados con cal aérea en todos los casos, aumentando considerablemente según se va incrementando la cantidad del conglomerante. Sin embargo, cuando se trata de morteros con escoria negra la tendencia a aumentar se invierte, viéndose reducido el tiempo de trabajabilidad de los morteros según se aumenta la cantidad de cal. Es probable que se produzcan reacciones de combinación de los componentes silícicos de la escoria negra con el óxido de cal, formando

Capítulo VI

compuestos silicatados que reducen los tiempos de fraguado y endurecimiento y, como consecuencia, su trabajabilidad.

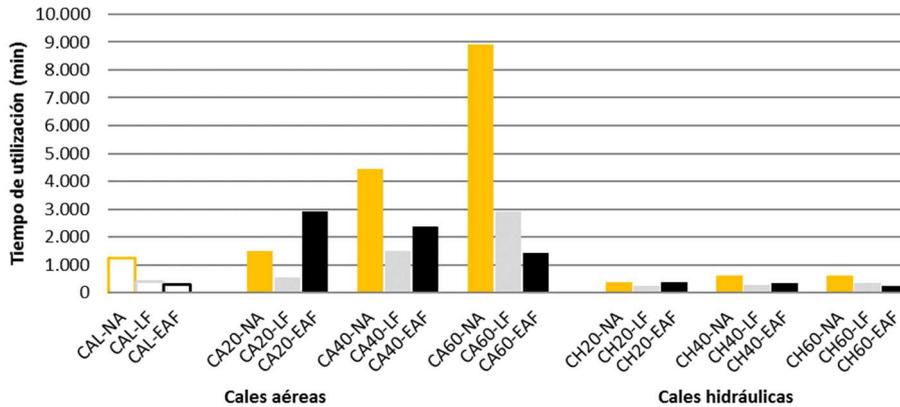


Gráfico 6.12 Tiempo de utilización (min) de los morteros de cal.

Los morteros fabricados con cal aérea tienen un tiempo de trabajabilidad muchísimo mayor que los dosificados con cal hidráulica, el tiempo tiende a aumentar con el incremento del conglomerante. Este efecto no se manifiesta si se utiliza escoria negra, donde el tiempo de utilización disminuye con el aumento de cal, justificado por el razonamiento expresado en el párrafo anterior (Gráfico 6.12).

Según el tipo de árido utilizado, se observa como la incorporación de escoria blanca reduce en gran cantidad el tiempo de utilización con respecto a los morteros de arena. Esto ocurre al utilizar cualquiera de los dos tipos de cal, si bien es más evidente en el caso de la cal aérea, al tener mayores tiempos de utilización. Además, por el carácter hidráulico de la escoria blanca, se potencia el proceso de carbonatación, endureciendo la pasta de mortero con mayor rapidez.

Los morteros dosificados con escoria negra se comportan de manera contraria a los de escoria blanca. Como se puede observar, los tiempos de utilización son mayores para pequeñas cantidades de cal, y estos van disminuyendo conforme se aumenta la cantidad de conglomerante, llegando a tener tiempos de trabajabilidad menores que los morteros patrón.

Por todo lo expuesto anteriormente se concluye que tanto la tipología de árido como de cal utilizados son parámetros fundamentales en el tiempo de utilización de los morteros.

6.1.5. Capacidad de retención de agua

La determinación de la capacidad de retención de agua permite establecer criterios para estudiar el proceso de curado, especialmente si los morteros se disponen sobre soportes en los que, por su porosidad, se van a presentar elevados Coeficientes de Succión por Capilaridad.

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 aplica²⁰².

6.1.5.1. Análisis de los morteros bastardos

De acuerdo con el procedimiento de análisis, los resultados obtenidos se recogen en la Tabla 6.12:

Retención de agua de los morteros bastardos (%)					
	CAL-NA	BAS-A-NA	BAS-B-NA	BAS-C-NA	CEM-NA
Variación	90,72	88,50	88,18	79,99	78,88
		-2,45%	-2,80%	-11,83%	-13,05%
	CAL-LF	BAS-A-LF	BAS-B-LF	BAS-C-LF	CEM-LF
Variación	86,40	87,84	88,97	92,18	89,11
		1,67%	2,97%	6,69%	3,14%
	CAL-EAF	BAS-A-EAF	BAS-B-EAF	BAS-C-EAF	CEM-EAF
Variación	94,13	91,30	88,86	84,90	85,90
		-3,01%	-5,60%	-9,81%	-8,74%

Tabla 6.12 Retención de agua (%) de los morteros bastardos.

Si se toma de referencia el valor de 80,0% como límite mínimo con el que habitualmente trabajan los fabricantes de morteros, se observa que los morteros fabricados con escoria, tanto blanca como negra, cumplen con este valor práctico de referencia. Los morteros BAS-C-NA y CEM-NA no lo alcanzan, pero se sitúan muy próximos, con lo que pueden considerarse aceptables.

La capacidad de retención de agua que tienen los morteros con árido natural y escoria negra disminuye según se incrementa la presencia de cemento, mientras que la capacidad de retención de agua aumenta en el caso de la escoria blanca, al ser esta muy fina y presentar mayor superficie específica de contacto.

²⁰² Rodríguez-Mora, O. (2003). Morteros: guía general, AFAM, Asociación Nacional de Fabricantes de Mortero.

Estas tendencias cambian cuando se trata de morteros de cemento: en el caso de la escoria blanca se produce una retención de agua algo menor, mientras que, por el contrario, si se utiliza escoria negra, se incrementa ligeramente, siendo en ambos casos variaciones poco significativas.

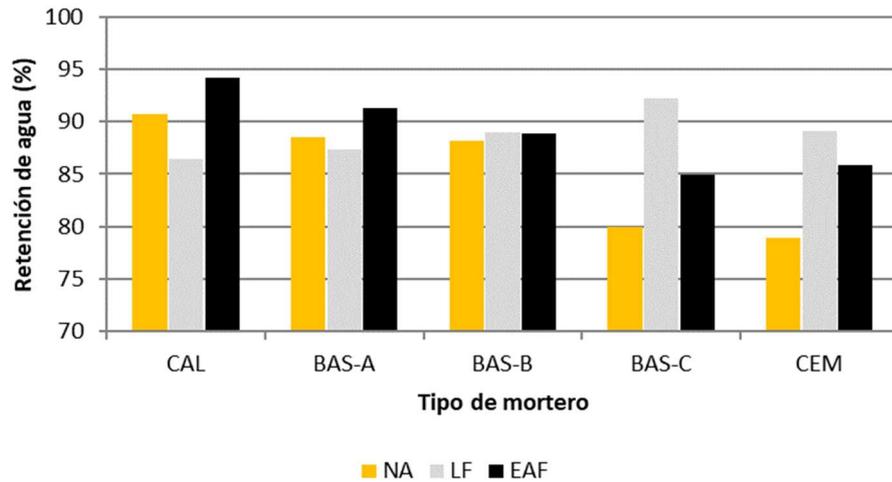


Gráfico 6.13 Retención de agua (%) de los morteros bastardos.

Se puede observar en el Gráfico 6.13, cuando se dosifica la misma cantidad de cal y cemento (BAS-B), la retención de agua es similar, con independencia del árido utilizado en la mezcla.

Por otra parte, los morteros con escoria negra retienen mayor cantidad de agua que los morteros con arena, también con independencia del conglomerante utilizado. Además, la diferencia es mayor para mayores cantidades de cemento.

En tercer lugar, los morteros de escoria blanca retienen menos agua cuando se dosifica mayor cantidad de cal, mientras que para los morteros de cemento es menor. Como ocurre en el caso de la escoria negra, la diferencia de la capacidad de retención de agua es más elevada en los morteros de cemento.

6.1.5.2. Análisis de los morteros de cal

Los resultados obtenidos en el ensayo para los morteros de cal aérea e hidráulica se muestran en la Tabla 6.13:

Caracterización de los morteros con áridos siderúrgicos

Retención de agua de los morteros de cal (%)							
	CAL-NA	CA20-NA	CA40-NA	CA60-NA	CH20-NA	CH40-NA	CH60-NA
Variación	90,72	91,90	95,60	98,40	89,46	90,88	91,29
			4,03%	7,07%		1,59%	2,05%
	CAL-LF	CA20-LF	CA40-LF	CA60-LF	CH20-LF	CH40-LF	CH60-LF
Variación	86,40	75,86	89,53	93,94	83,13	90,11	92,40
			18,02%	23,83%		8,40%	11,15%
	CAL-EAF	CA20-EAF	CA40-EAF	CA60-EAF	CH20-EAF	CH40-EAF	CH60-EAF
Variación	94,13	95,71	96,03	96,64	87,88	91,72	93,77
			0,33%	0,97%		4,37%	6,70%

Tabla 6.13 Retención de agua de los morteros de cal aérea e hidráulica.

De igual modo, se toma como referencia el valor mínimo de límite del 80% de retención de agua con el que trabajan los fabricantes. Los morteros estudiados cumplen en su mayoría con este valor práctico de referencia y tan solo el CA20-LF no llega a este valor, aunque está muy próximo.

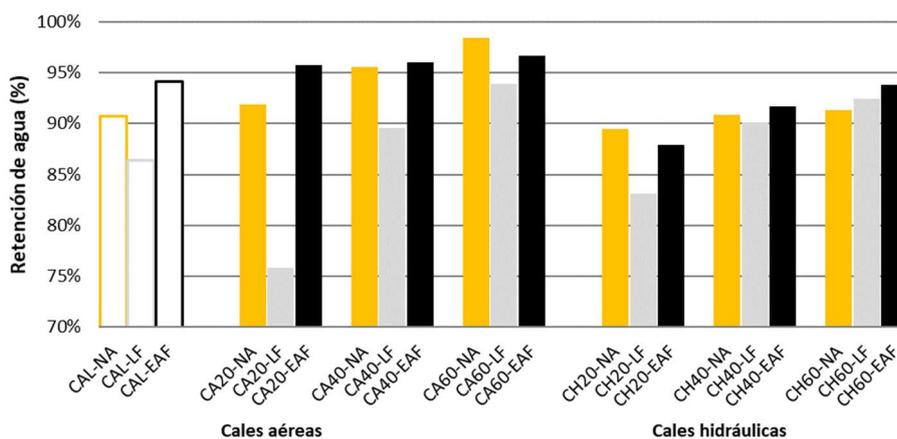


Gráfico 6.14 Retención de agua (%) de los morteros de cal área e hidráulica.

En todos los casos se observa un incremento de la retención de agua cuanto mayor es la cantidad de conglomerante (Gráfico 6.14). Los valores de retención de agua obtenidos son menores para las dosificaciones de cal hidráulica que de cal aérea, probablemente debido a su menor finura.

La incorporación de escorias confiere morteros con similar comportamiento a la retención de agua, siendo en el caso de la escoria blanca la que más diferencia aporta.

6.2. ESTADO ENDURECIDO

A continuación, se estudia el comportamiento del mortero en estado endurecido, cuando éste ha perdido por completo el agua de amasado.

Aunque la norma señala que dichas propiedades deben ser estudiadas a la edad de 28 días, al tratarse de morteros que incorporan en sus dosificaciones cal como conglomerante, esta edad es insuficiente.

Como consecuencia, se propone la realización de los ensayos a una edad de curado superior, tomando como referencia 56 días^{235,236}.

6.2.1. Densidad aparente en seco

La densidad de un mortero en estado endurecido depende de sus propiedades en estado fresco. La densidad del mortero depende del agua de dosificación, ya que un exceso dará lugar a 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 en su estado endurecido.

6.2.1.1. Análisis de los morteros bastardos

La densidad en estado endurecido obtenida para los diferentes morteros se muestra en la Tabla 6.14:

Densidad aparente en estado endurecido de los morteros bastardos (kg/m ³)					
	CAL-NA	BAS-A-NA	BAS-B-NA	BAS-C-NA	CEM-NA
Variación	1.735	1.760 -4,09%	1.812 -1,25%	1.872 2,02%	1.909 4,03%
	CAL-LF	BAS-A-LF	BAS-B-LF	BAS-C-LF	CEM-LF
Variación	1.262	1.295 -4,92%	1.326 -2,64%	1.357 -0,37%	1.423 4,48%
	CAL-EAF	BAS-A-EAF	BAS-B-EAF	BAS-C-EAF	CEM-EAF
Variación	2.103	2.159 2,66%	2.236 6,32%	2.292 8,99%	2.369 12,65%

Tabla 6.14 Densidad aparente en estado endurecido (kg/m³) de los morteros bastardos.

Los resultados muestran un comportamiento semejante al del estado fresco, es decir, densidades más altas para las mezclas dosificadas con escoria negra y menores para los morteros fabricados con escoria blanca (Gráfico 6.15).

²³⁵ Ince, C., S. Derogar and T. Michelitsch (2015). "Influence of supplementary cementitious materials on water transport kinetics and mechanical properties of hydrated lime and cement mortars." *Materiales de Construcción* **65**(318): 056.

²³⁶ Pavía, S. and M. Aly (2016). "Influence of aggregate and supplementary cementitious materials on the properties of hydrated lime (CL90s) mortars." *Ibid.* **66**(324): 104.

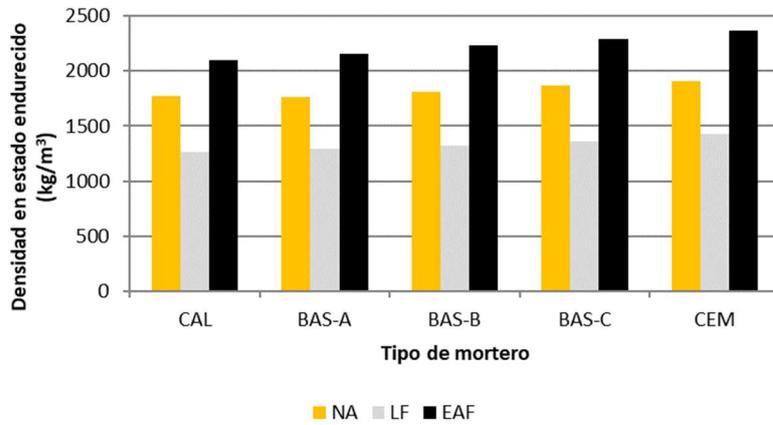


Gráfico 6.15 Densidad en estado endurecido (kg/m³) de los morteros bastardos.

Los resultados de la densidad aparente en estado endurecido son ligeramente inferiores a los obtenidos en estado fresco, ya que la única variación entre ambas es la pérdida del agua de amasado con el curado del mortero.

Al igual que se ha realizado en el caso de la densidad en estado fresco, en el Gráfico 6.16 se muestra un gráfico con la relación entre la densidad de los morteros y la cantidad de aire ocluido.

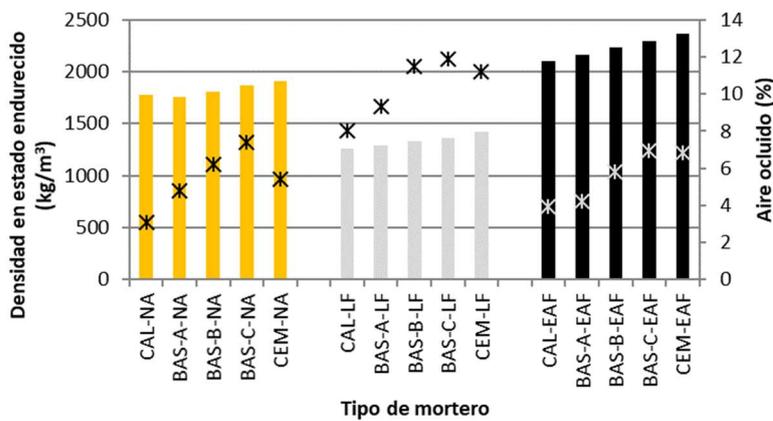


Gráfico 6.16 Comparativo densidad aparente del mortero endurecido (kg/m³) y cantidad de aire ocluido (%) de los morteros bastardos.

6.2.1.2. Análisis de los morteros de cal

La densidad en estado endurecido obtenida para los morteros de cal viene reflejada en la Tabla 6.14:

Capítulo VI

Densidad aparente en estado fresco de los morteros de cal (Kg/m ³)							
	CAL-NA	CA20-NA	CA40-NA	CA60-NA	CH20-NA	CH40-NA	CH60-NA
Variación	1.735	1.750	1.350	1.110	1.947	1.755	1.447
			-22,86%	-36,57%		-9,86%	-25,68%
	CAL-LF	CA20-LF	CA40-LF	CA60-LF	CH20-LF	CH40-LF	CH60-LF
Variación	1.262	1.790	1.360	1.110	1.366	1.369	1.373
			-24,02%	-37,99%		0,19%	0,48%
	CAL-EAF	CA20-EAF	CA40-EAF	CA60-EAF	CH20-EAF	CH40-EAF	CH60-EAF
Variación	2.103	2.062	1.490	1.330	2.229	1.916	1.679
			-27,72%	-35,48%		-14,06%	-24,68%

Tabla 6.15 Densidad aparente del mortero endurecido (kg/m³) de los morteros de cal aérea e hidráulica.

Al igual que ocurre en con el valor de la densidad en estado fresco, ésta baja progresivamente según se va aumentando la cantidad de cal. Las dosificaciones fabricadas con cal hidráulica y escoria blanca presentan una densidad similar, con independencia de la cal dosificada en el mortero.

Las dosificaciones de cal aérea presentan menores densidades que las que utilizan cal hidráulica, salvo de nuevo en el caso de la escoria blanca.

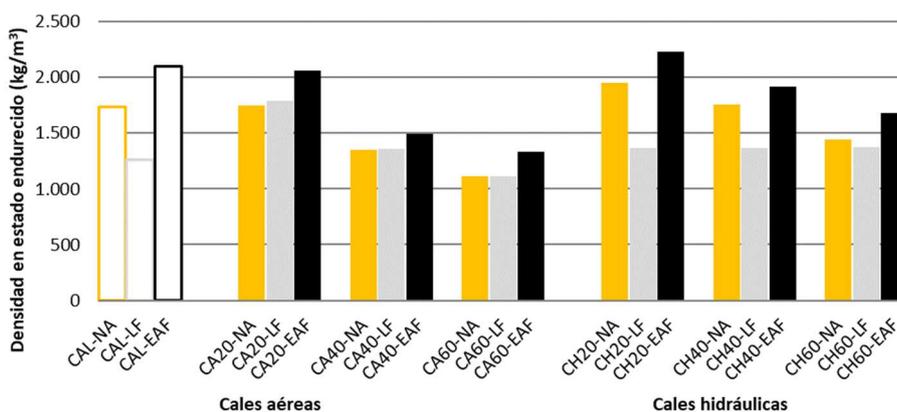


Gráfico 6.17 Densidad aparente en estado endurecido (kg/m³) de los morteros de cal aérea e hidráulica.

Para cada grupo de morteros dosificados (Gráfico 6.17), la densidad de los morteros que contienen escoria negra es siempre mayor, observando valores inferiores cuando el árido está formado por escoria blanca o árido natural.

Los morteros fabricados con cal aérea muestran valores equivalentes cuando se utiliza escoria blanca o árido natural en su dosificación, mientras que en el caso de la cal hidráulica los morteros con árido natural presentan mayores densidades que los de escoria blanca.

Si se comparan las dosificaciones elaboradas con escoria negra y arena, esta diferencia es mayor, siendo la densidad de las mezclas con escoria negra mucho más elevada que en el caso de las mezclas de los morteros patrón, debido de nuevo a la gran densidad que tiene la escoria negra.

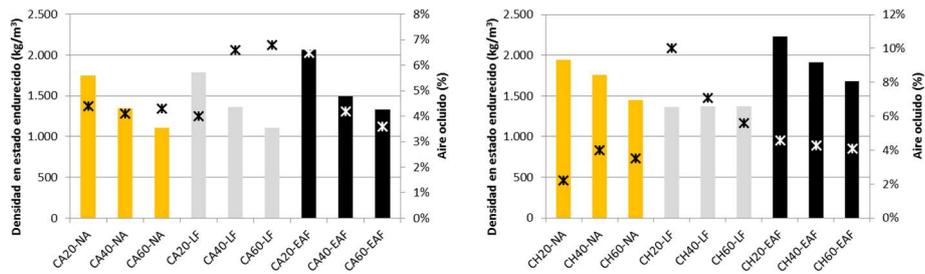


Gráfico 6.18 Comparativo densidad aparente del mortero endurecido (kg/m^3) y cantidad de aire ocluido (%) de los morteros de cal aérea y cal hidráulica.

El Gráfico 6.18 muestra un comparativo de la influencia que tiene el aire ocluido en la densidad en estado endurecido de las mezclas.

6.2.2. Absorción de agua a presión atmosférica

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.

Este fenómeno se conoce como absorción y es propio de los materiales no porosos abiertos y con superficies externas romas y lisas. Por ello, el estudio de la absorción de agua de un material es sumamente importante.

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 vapor de agua contenido en el interior del inmueble.

6.2.2.1. Análisis de los morteros bastardos

Los valores expresados en tanto por ciento están recogidos en la Tabla 6.16:

Capítulo VI

Absorción de agua de los morteros bastados (%)					
	CAL-NA	BAS-A-NA	BAS-B-NA	BAS-C-NA	CEM-NA
Variación	13,13	13,04	13,49	12,50	11,80
		-0,69%	2,74%	-4,80%	-10,13%
	CAL-LF	BAS-A-LF	BAS-B-LF	BAS-C-LF	CEM-LF
Variación	30,44	30,23	29,67	29,84	24,92
		-0,69%	-2,53%	-1,97%	-18,13%
	CAL-EAF	BAS-A-EAF	BAS-B-EAF	BAS-C-EAF	CEM-EAF
Variación	16,60	14,45	13,15	11,59	10,30
		-12,95%	-20,78%	-30,18%	-37,95%

Tabla 6.16 Absorción de agua a presión atmosférica (%) de los morteros bastados.

El porcentaje de absorción de agua disminuye según se aumenta la cantidad de cemento. Sin embargo, solo parece significativa esta variación en el caso de la escoria negra, mientras que los valores obtenidos para la arena o la escoria blanca son similares sea cual sea la proporción de cemento y cal.

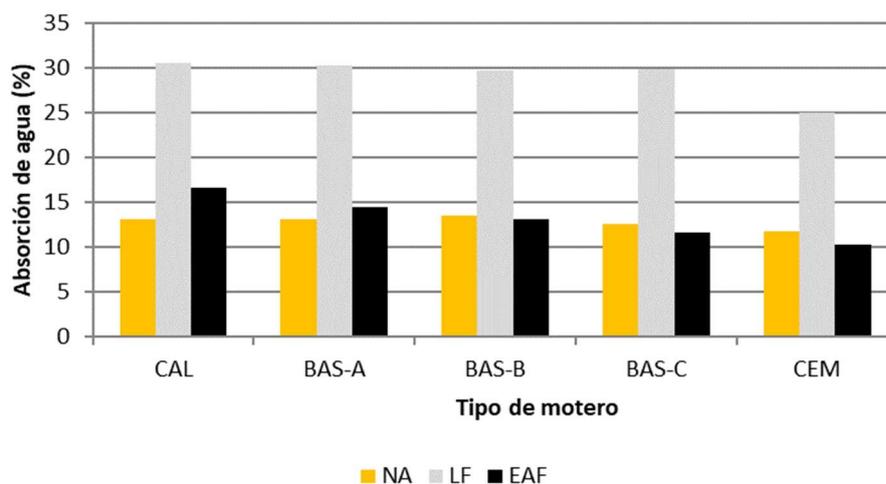


Gráfico 6.19 Absorción de agua a presión atmosférica (%) de los morteros bastados.

Las probetas de escoria blanca presentan una gran cantidad de poros, no solo en su interior, sino también en la superficie, lo que determina un elevado porcentaje de absorción de agua en estos morteros, muy superior al obtenido en el resto de los casos (Gráfico 6.19). Por el contrario, las probetas de arena y escoria negra presentan una superficie más lisa y cerrada, lo que determina una mayor resistencia a la penetración de agua en su interior.

6.2.2.2. Análisis de los morteros de cal

Los valores expresados en tanto por ciento están recogidos en la Tabla 5.23:

Absorción de agua de los morteros de cal (%)							
	CAL-NA	CA20-NA	CA40-NA	CA60-NA	CH20-NA	CH40-NA	CH60-NA
Variación	13,13	16,40	31,80	46,30	25,38	34,94	38,45
			93,90%	182,32%		37,67%	51,50%
	CAL-LF	CA20-LF	CA40-LF	CA60-LF	CH20-LF	CH40-LF	CH60-LF
Variación	30,44	18,50	33,90	48,10	30,76	31,82	31,98
			83,24%	160,00%		3,44%	3,97%
	CAL-EAF	CA20-EAF	CA40-EAF	CA60-EAF	CH20-EAF	CH40-EAF	CH60-EAF
Variación	16,60	15,74	29,70	47,30	13,29	18,62	22,90
			88,74%	200,58%		40,09%	72,27%

Tabla 6.17 Absorción de agua a presión atmosférica (%) de los morteros de cal aérea e hidráulica.

Tras el análisis de los resultados obtenidos, se puede percibir como la absorción de agua es siempre mayor cuanto más cal se dosifica en los morteros, ya sea cal aérea o hidráulica. Esta absorción alcanza porcentajes muy elevados en los que incorporan un 60% de cal aérea en su composición (se registran valores próximos al 50%).

En el caso de las mezclas con cal aérea, los valores obtenidos pueden considerarse semejantes en morteros análogos dosificados con la misma cantidad de cal. Sin embargo, la diferencia es mayor en el caso de los morteros fabricados con cal hidráulica.

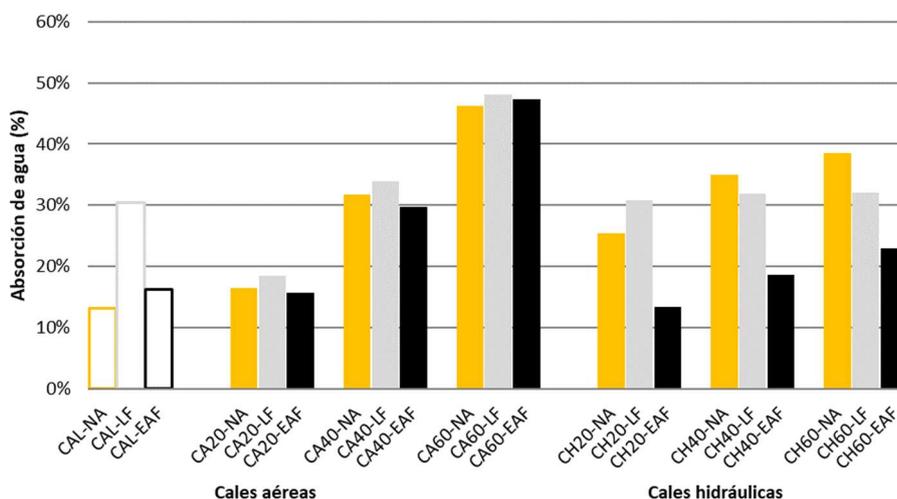


Gráfico 6.20 Absorción de agua a presión atmosférica (%) de los morteros de cal aérea e hidráulica.

Los morteros de escoria blanca absorben un mayor porcentaje de agua que los de arena silíceo cuando la cal utilizada es la cal aérea, mientras que este comportamiento no se observa en los morteros fabricados con cal hidráulica, donde según se añada más cal a la mezcla, la absorción de los morteros con escoria blanca es menor que los morteros con arena silíceo.

Por el contrario, en el Gráfico 6.20 se observa que en la mayoría de los casos la absorción de los morteros es menor cuando se utiliza escoria negra, siendo esta diferencia mucho más pronunciada en los morteros dosificados con cal hidráulica que con cal aérea.

6.2.3. Absorción de agua por capilaridad

Además de la absorción causada por la presión atmosférica y por permeabilidad a través de las caras del material, también puede producirse por fuerzas de atracción entre el líquido y los capilares internos comunicados con el exterior.

Este fenómeno se da en materiales con gran porosidad, en los que el volumen real y aparente de los mismos no coincide. En ellos los líquidos se depositan en el interior de los materiales a través de los intersticios internos abiertos al exterior y de la red capilar.

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.

6.2.3.1. Análisis de los morteros bastardos

La succión de agua obtenida para los diferentes morteros se muestra en la Tabla 6.18:

Succión de los morteros bastardos (kg/(m ² .min ^{0,5}))					
	CAL-NA	BAS-A-NA	BAS-B-NA	BAS-C-NA	CEM-NA
Variación	Sat.	Sat.	Sat.	0,65	0,55 -15,38%
	CAL-LF	BAS-A-LF	BAS-B-LF	BAS-C-LF	CEM-LF
Variación	Sat.	2,79	2,67 -4,30%	1,67 -40,14%	1,24 -55,56%
	CAL-EAF	BAS-A-EAF	BAS-B-EAF	BAS-C-EAF	CEM-EAF
Variación	1,37	1,36 -0,73%	0,65 -52,55%	0,26 -81,02%	0,21 -84,67%

Tabla 6.18 Absorción de agua por capilaridad (kg/(m².min^{0,5})) de los morteros bastardos.

La absorción de agua por capilaridad disminuye con la incorporación de cemento. Sin embargo, a diferencia de otras propiedades, esta disminución no es proporcional, observándose un cambio drástico en las dosificaciones BAS-B, (50% cal y 50% cemento). En las mezclas con gran cantidad de cal la succión es total o casi total, alcanzando en el caso de los morteros dosificados con arena natural y escoria blanca la saturación completa de las probetas.

Este fenómeno también se da en el caso de la escoria negra, aunque no tan evidente como en los anteriores casos. Se observa como la succión es en torno a un 80% mayor en los morteros con gran presencia de cal que en los morteros con mayor cantidad de cemento.

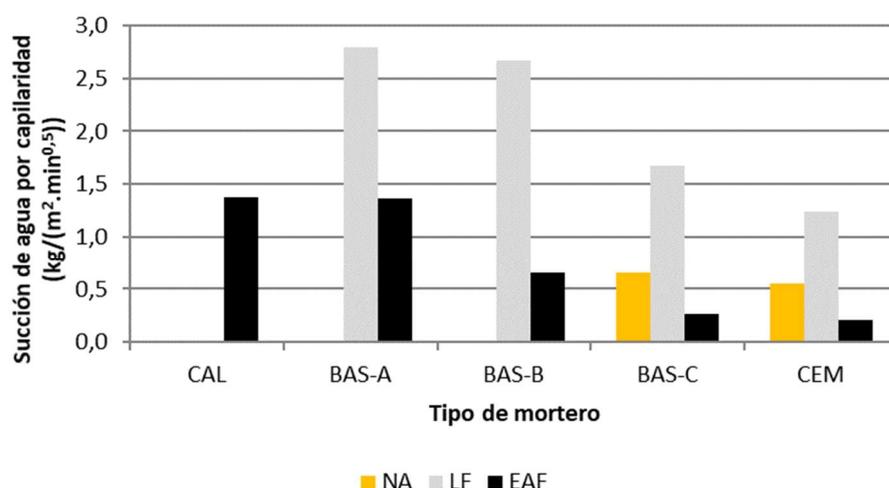


Gráfico 6.21 Succión de agua por capilaridad de los morteros bastardos.

Si se analiza en función del tipo de árido utilizado, los morteros dosificados con escoria negra son los que presenta una menor succión en todos los casos (Gráfico 6.21).

Por el contrario, los morteros fabricados con escoria blanca y arena presentan gran absorción de agua, mayor aun en los morteros con elevada cantidad de cal. En los morteros con arena la absorción es mucho mayor.

Cuando los morteros tienen mayor presencia de cemento, este comportamiento se invierte, siendo la escoria blanca quien presenta mayor succión de agua, casi el triple que en el caso de utilizar arena.

6.2.3.2. Análisis de los morteros de cal

La Tabla 6.19 recoge los coeficientes de absorción de agua de los diferentes tipos de morteros de cal:

Capítulo VI

Succión de los morteros de cal ($\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0.5})$)							
	CAL-NA	CA20-NA	CA40-NA	CA60-NA	CH20-NA	CH40-NA	CH60-NA
Variación	Sat.	1,79	2,06	3,13	1,62	1,63	1,82
			15,08%	74,86%		0,62%	12,35%
	CAL-LF	CA20-LF	CA40-LF	CA60-LF	CH20-LF	CH40-LF	CH60-LF
Variación	Sat.	2,56	3,08	4,03	3,35	1,30	1,38
			20,31%	57,42%		-61,19%	-58,81%
	CAL-EAF	CA20-EAF	CA40-EAF	CA60-EAF	CH20-EAF	CH40-EAF	CH60-EAF
Variación	1,37	2,29	2,48	2,47	1,67	1,92	2,36
			8,30%	7,86%		14,97%	41,32%

Tabla 6.19 Absorción de agua por capilaridad ($\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0.5})$) de los morteros de cal aérea e hidráulica.

Aunque los registros de absorción son mayores en los morteros de cal que en los morteros bastardos, las probetas no llegaron a saturarse. Este comportamiento se puede justificar por presentar estos morteros una red capilar mayor, lo que induce a que el agua no se eleve con la suficiente fuerza como para producir su saturación (Ley de Jurin). Sería conveniente el estudio de la porosidad de los morteros para poder conocer el motivo que justifica de este comportamiento.

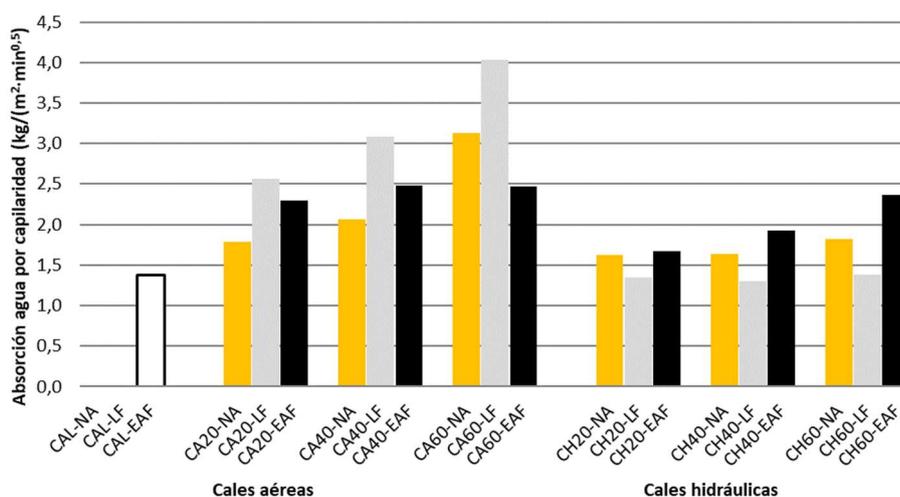


Gráfico 6.22 Absorción de agua por capilaridad ($\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0.5})$) de los morteros de cal aérea e hidráulica.

Analizando los resultados obtenidos, puede verse cómo la absorción de agua es siempre mayor cuanto más cal se dosifica en los morteros, ya sea cal aérea o hidráulica (Gráfico 6.22). Los porcentajes son muy elevados morteros que incorporan un 60% de cal aérea en su composición.

6.2.4. Permeabilidad al vapor de agua

En los recintos con temperatura interior distinta a la del ambiente exterior, existe la posibilidad de que el vapor de agua condense y precipite en el interior del mortero, provocando serios daños, afectando a las propiedades del mismo.

6.2.4.1. Análisis de los morteros bastardos

En el gráfico Gráfico 6.23 se observa la pérdida de peso de las probetas en función del tiempo, o lo que es lo mismo, el flujo de vapor de agua (kg/seg). Se muestra la línea de tendencia, lo que permite calcular la permeanza (Λ) y la Permeabilidad al Vapor de Agua de los morteros (W_{vp}). Dividiendo Permeabilidad Equivalente en Aire (F.P.V.A.) a 20°C entre la W_{vp} , se obtiene el Coeficiente de Permeabilidad (μ).

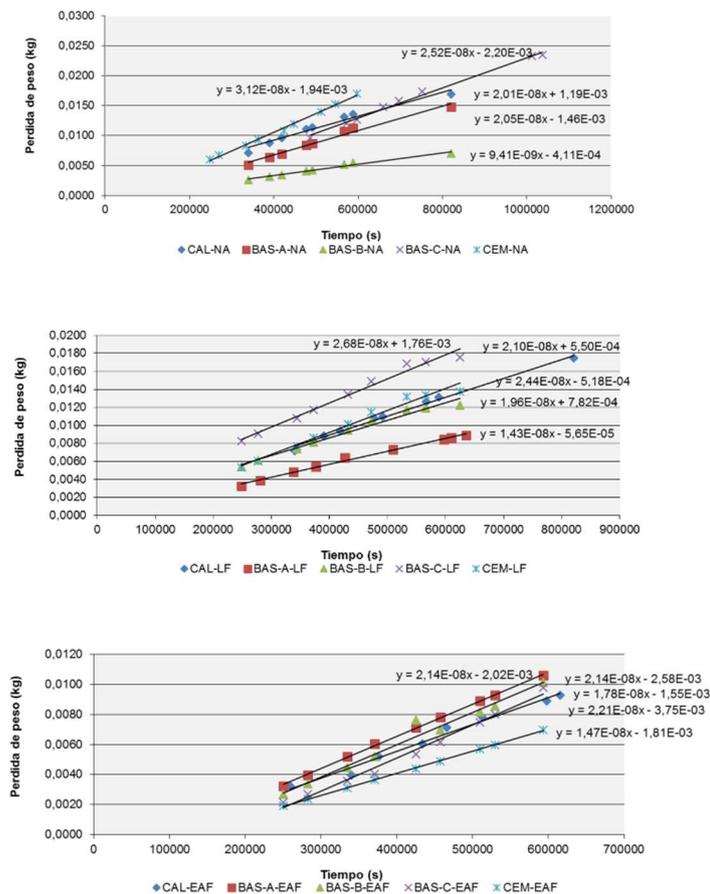


Gráfico 6.23 Flujo de vapor de agua (kg/seg) de los morteros bastardos (de arriba a abajo: Árido Natural, Escoria Blanca y Escoria Negra).

Estos datos están reflejados en la Tabla 6.20:

Coeficiente de permeabilidad al vapor de agua de los morteros bastardos (μ)					
	CAL-NA	BAS-A-NA	BAS-B-NA	BAS-C-NA	CEM-NA
Variación	13,82	14,18 12,60%	32,02 131,69%	11,36 -17,80%	9,00 -34,88%
	CAL-LF	BAS-A-LF	BAS-B-LF	BAS-C-LF	CEM-LF
Variación	13,82	19,86 43,70%	14,87 7,60%	10,63 -23,08%	11,76 -14,91%
	CAL-EAF	BAS-A-EAF	BAS-B-EAF	BAS-C-EAF	CEM-EAF
Variación	16,47	13,54 -17,79%	13,08 -20,58%	13,08 -20,58%	20,14 22,28%

Tabla 6.20 Coeficiente de permeabilidad al vapor de agua (μ) de los morteros bastardos.

Con el valor del Coeficiente de Permeabilidad al Vapor de Agua (μ) se pueden comparar las familias de morteros. Los valores obtenidos son altamente dispares, por lo que es difícil establecer alguna conclusión.

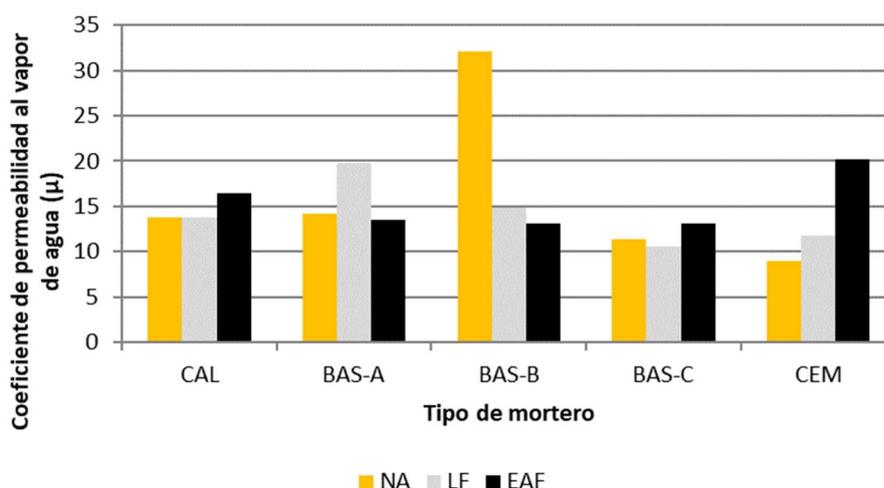


Gráfico 6.24 Coeficiente de permeabilidad al vapor de agua (μ) de los morteros bastardos.

Se observan valores similares entre los morteros con las mismas cantidades de cal y cemento para los tres tipos de áridos utilizados en las dosificaciones.

Sin embargo, los valores son elevados en el caso de las mezclas BAS-B-NA, CEM-EAF, CAL-EAF y BAS-A-LF. Salvo en el caso de estas mezclas, se observa que la permeabilidad aumenta conforme se incrementa la cantidad de cemento (Gráfico 6.24).

6.2.4.2. Análisis de los morteros de cal

Del mismo modo que para los morteros bastardos, en el Gráfico 6.25 se muestra la pérdida de peso en función del tiempo, o lo que es lo mismo, el flujo de vapor de agua (kg/seg). Se muestra la línea de tendencia, lo que permite calcular la permeanza (Λ) y la Permeabilidad al Vapor de Agua de los morteros (W_{vp}). Dividiendo Permeabilidad Equivalente en Aire (F.P.V.A.) a 20°C entre la W_{vp} , se obtiene el Coeficiente de Permeabilidad (μ).

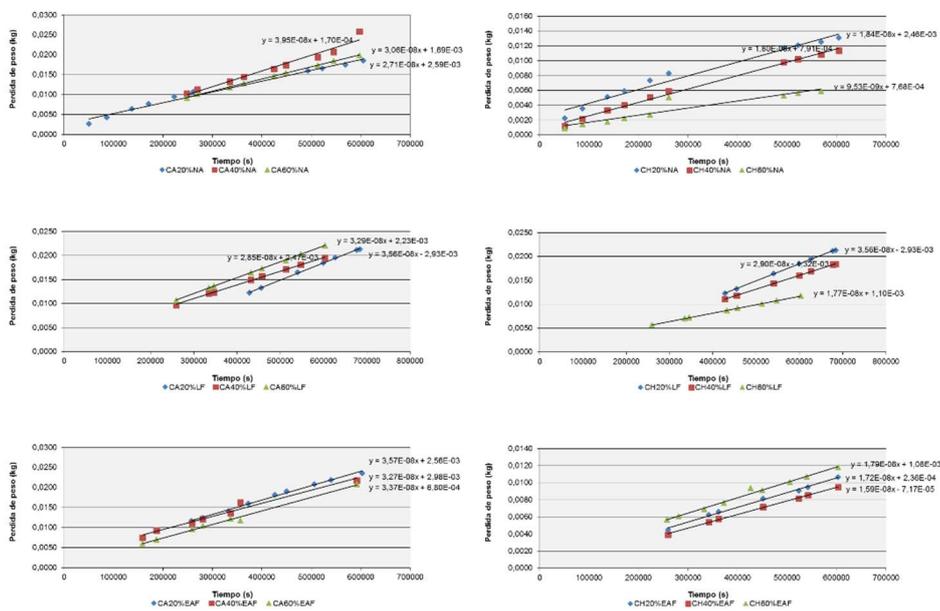


Gráfico 6.25 Flujo de vapor de agua (kg/seg) de los morteros de cal aérea (izquierda) e hidráulica (derecha) (de arriba a abajo: Árido Natural, Escoria Blanca y Escoria Negra).

Los valores se muestran en la Tabla 6.21:

Permeabilidad al vapor de agua de los morteros de cal (μ)							
	CAL-NA	CA20-NA	CA40-NA	CA60-NA	CH20-NA	CH40-NA	CH60-NA
Variación	13,82	10,50	8,60	9,19	15,90	16,28	31,44
			-18,10%	-12,48%		2,39%	97,74%
	CAL-LF	CA20-LF	CA40-LF	CA60-LF	CH20-LF	CH40-LF	CH60-LF
Variación	13,82	7,77	9,94	8,48	7,77	9,75	16,57
			27,93%	9,14%		25,48%	113,26%
	CAL-EAF	CA20-EAF	CA40-EAF	CA60-EAF	CH20-EAF	CH40-EAF	CH60-EAF
Variación	16,47	7,75	8,54	8,26	17,08	18,55	16,37
			10,19%	6,58%		8,61%	-4,16%

Tabla 6.21 Coeficiente de permeabilidad al vapor de agua (μ) de los morteros de cal aérea e hidráulica.

Con el valor del Coeficiente de Permeabilidad al Vapor de Agua (μ) se puede comparar las familias de morteros. Los valores obtenidos son, de nuevo, altamente dispares, por lo que es difícil establecer alguna conclusión.

En el Gráfico 6.26 puede observar cómo la incorporación de una mayor cantidad de cal área no determina morteros más o menos permeables. De igual modo, la incorporación de cal hidráulica puede considerarse que no afecta a la permeabilidad.

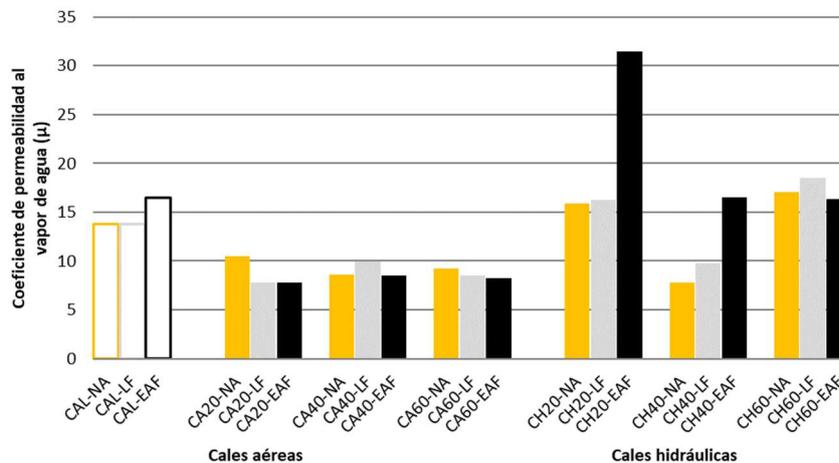


Gráfico 6.26 Coeficiente de permeabilidad al vapor de agua (μ) de los morteros de cal aérea e hidráulica.

Si se analiza las mezclas fabricadas con cal aérea, se observa que los valores de la permeabilidad se encuentran comprendidas entre el 5 y el 10, cuando para las dosificaciones 1/6 alcanzaba el valor de 15.

Este valor es el obtenido para la mayoría de las mezclas dosificadas con cal hidráulica. Salvo en el caso del mortero CH20-EAF, el resto de las dosificaciones muestran un comportamiento más permeable al vapor de agua, especialmente en el caso de los morteros CH40-LF y CH40-NA, con valores próximos a 10, semejantes a los registros obtenidos para los morteros bastardos y los morteros de cal aérea.

6.3. COMPORTAMIENTO MECANICO DE LOS MORTEROS

El comportamiento mecánico es una propiedad de especial importancia en el estudio de los morteros, de la que depende la estabilidad de las uniones entre materiales o de éstos a un soporte, con la finalidad de garantizar la estabilidad del conjunto y la durabilidad de las uniones con el paso del tiempo. El mortero debe ser capaz de soportar los esfuerzos mecánicos a los que está sometido como material o los de la unidad de la obra de la que forma parte.

En el siguiente apartado se estudia la dureza superficial (resistencia al punzonamiento), la resistencia mecánica a flexión y compresión, y la adhesión, como forma de estudiar la resistencia a tracción indirecta.

Para el estudio de estas propiedades se analiza la evolución a lo largo del tiempo, en un total de cinco edades diferentes (salvo en el caso de la adherencia que solo se analiza a los 28 y 56 días de curado).

Se realiza un primer estudio a los 7 días para comprobar las resistencias mecánicas de los morteros en sus primeras edades. En el caso de los morteros con un 100% de cal, al no haberse producido una completa carbonatación del material y no haberse alcanzado la resistencia suficiente, estos ensayos no se realizan.

Un segundo estudio a los 28 días, de acuerdo con las prescripciones de la normativa, y un tercero a los 56 días para poder comparar estos resultados con los obtenidos en el Capítulo 5.

Por último, un cuarto y quinto estudio, a los 90 y 180 días respectivamente, con el fin de comprobar si estas propiedades se van estabilizando.

6.3.1. Dureza superficial

En el caso de los morteros para revestimiento, esta propiedad es crucial por su relación con el correcto funcionamiento del paramento y para posteriores tratamientos.

6.3.1.1. Análisis de los morteros bastardos

Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 6.22:

Evolución de la Dureza Shore C de los morteros bastardos (%)					
	7 días	28 días	56 días	90 días	180 días
CAL-NA	-	80,30	81,45	82,00	82,55
BAS-A-NA	71,30	80,90	82,50	83,60	84,05
BAS-B-NA	82,70	89,40	91,50	89,48	89,00
BAS-C-NA	90,98	92,00	93,70	93,47	92,50
CEM-NA	91,81	93,15	94,95	94,87	93,05
CAL-LF	-	63,30	65,30	64,15	63,30
BAS-A-LF	37,35	66,25	67,50	69,70	67,90
BAS-B-LF	52,60	75,55	76,75	77,20	79,60
BAS-C-LF	63,90	83,35	86,50	88,80	85,50
CEM-LF	75,90	86,80	92,50	92,30	91,20
CAL-EAF	-	68,78	76,20	78,75	83,30
BAS-A-EAF	73,40	81,63	85,65	88,75	88,80
BAS-B-EAF	83,50	88,33	89,30	90,43	91,15
BAS-C-EAF	90,55	93,00	92,70	92,30	95,65
CEM-EAF	93,45	93,95	93,90	94,00	95,40

Tabla 6.22 Evolución de la dureza superficial (%) de los morteros bastardos.

Capítulo VI

La dureza superficial que muestran estos morteros es elevada desde las primeras edades (Gráfico 6.27).

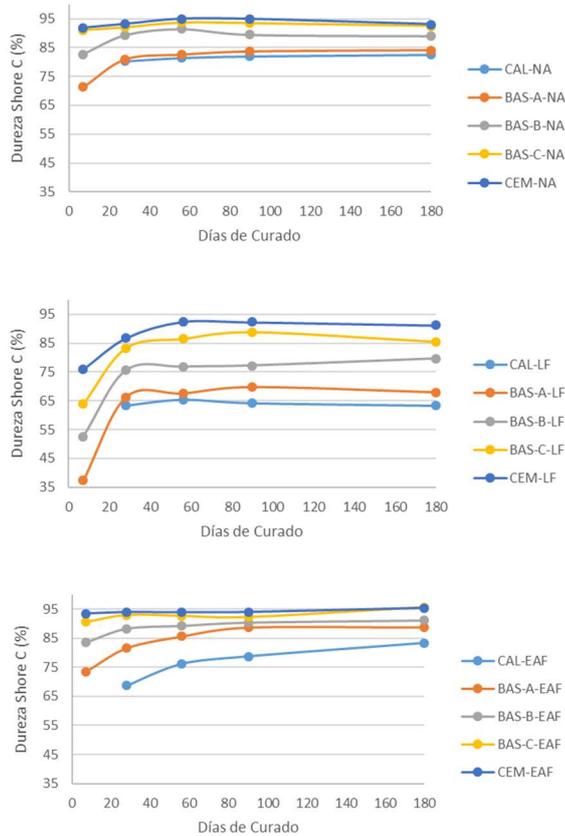


Gráfico 6.27 Evolución de la dureza superficial de los morteros bastardos (de arriba abajo: Árido Natural, Escoria Blanca y Escoria Negra).

Para los morteros dosificados con árido natural, el incremento mayor lo muestra la dosificación BAS-A-NA, alcanzando el 88% de su dureza a los 7 días, mientras que la dosificación CAL-NA presenta a los 28 días el 100% de su dureza. Todas las muestras presentan ya a los 28 días de edad una media del 98,4% de su dureza superficial, alcanzándose el 100% a los 56 días y considerándose estabilizada a los 90 y 180 días.

La dureza superficial es superior para los morteros con mayor presencia de cemento, siendo mayor la diferencia a las primeras edades, mientras que se va igualando conforme los morteros van endureciendo, debido a la dureza que confiere el cemento según va fraguando.

En el caso de la escoria blanca la dureza a la edad de 7 días es menor para todos los casos, siendo más significativa esta diferencia en el caso de los morteros dosificados con mayores cantidades de cal. La dosificación CEM-LF con un 75%, poco superior que BAS-A-NA y la menor en el caso

del árido natural, presenta un incremento en mayor proporción en el mismo periodo de tiempo. El mortero BAS-A-LF ha adquirido el 56,71% de su dureza, BAS-B-LF el 68,53% y BAS-C-LF el 73,07%, mientras que en el caso de CEM-LF se alcanza el 81,62%. De este modo se puede observar cómo la dureza alcanzada en las primeras edades es mayor en los morteros con mayor cantidad de cemento.

Por el contrario, la evolución experimentada entre los 28 y los 56 días es menor en todos los casos, y una vez transcurridos los 56 días la dureza se estabiliza y se puede considerar constante.

Por último, se analizan las dosificaciones que incorporan como árido la escoria negra. Si se considera que la mayor dureza se alcanza a los 56 días, se observa cómo la dosificación CAL-EAF a los 28 días registra ya el 90% de su dureza, la dosificación BAS-A-EAF ha adquirido a los 7 días más del 85% de la dureza y a los 28 días el 95%.

Por su parte, las dosificaciones con mayor cantidad de cal han adquirido en sus primeras edades casi el 100% de su dureza. El mortero BAS-C-EAF muestra una evolución aún mayor, alcanzando en torno al 93% de su dureza a los 7 días y casi el 99% a los 28 días. La CEM-EAF alcanza la dureza máxima a los 7 días.

En la mayoría de los casos se observa que, con el transcurso del tiempo, los morteros muestran un moderado incremento de la dureza, en muchos casos superior al 3%, o como en el caso del mortero CAL-EAF que supera el 10% a los 56 días.

Analizada la influencia de los conglomerantes cal y cemento en la dureza que adquieren los morteros ensayados, se realiza un estudio de la influencia del tipo de árido en la misma (Tabla 6.27). Para ello se ha tomado como referencia la edad de 56 días, tiempo suficiente para que los morteros hayan adquirido su máxima dureza.

Dureza Shore C de los morteros bastardos (%)					
	CAL-NA	BAS-A-NA	BAS-B-NA	BAS-C-NA	CEM-NA
Variación	81,45	82,50 1,29%	91,50 12,34%	93,70 15,04%	94,95 16,57%
	CAL-LF	BAS-A-LF	BAS-B-LF	BAS-C-LF	CEM-LF
Variación	65,30	67,50 3,37%	76,75 17,53%	86,50 32,47%	92,50 41,65%
	CAL-EAF	BAS-A-EAF	BAS-B-EAF	BAS-C-EAF	CEM-EAF
Variación	76,20	85,65 12,40%	89,30 17,19%	92,70 21,65%	93,90 23,23%

Tabla 6.23 Dureza superficial (%) de los morteros bastardos (56 días).

En todos los casos, los morteros dosificados con arena, escoria blanca o escoria negra muestran una evolución positiva. Conforme se incrementa la cantidad de cemento en las mezclas, también es mayor la dureza Shore C obtenida.

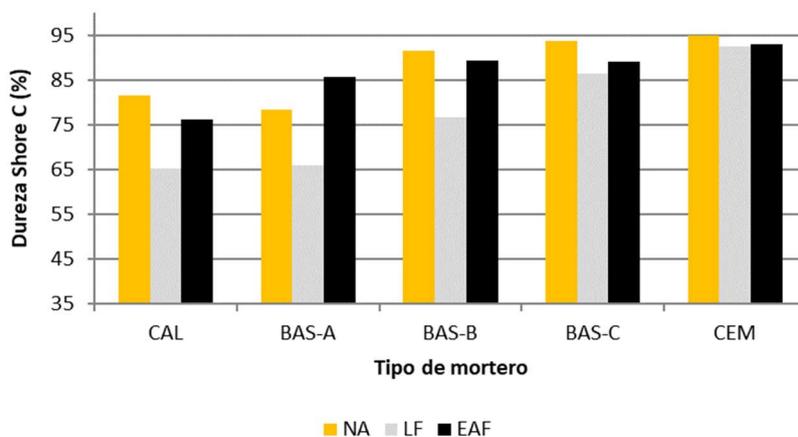


Gráfico 6.28 Dureza superficial (%) de los morteros bastardos (56 días).

Por último, como se puede comprobar en el Gráfico 6.28, si se comparan los morteros en función del tipo de árido, los morteros que menor dureza presentan son los fabricados con escoria blanca. La dureza que adquieren las probetas con escoria negra es muy elevada, similar a la de los morteros dosificados con arena natural. La dureza de las tres familias de morteros tiende a igualarse cuando la cantidad de cemento es cada vez mayor.

6.3.1.2. Análisis de los morteros de cal

En la Tabla 6.24 se muestran los valores obtenidos para los morteros de cal aérea e hidráulica.

Evolución de la Dureza Shore C de los morteros de cal (%)					
	7 días	28 días	56 días	90 días	180 días
CA20-NA	-	77,90	81,90	85,80	85,90
CA40-NA	-	77,35	79,33	82,50	83,35
CA60-NA	-	76,00	78,80	80,70	82,50
CH20-NA	-	78,80	81,25	81,80	81,05
CH40-NA	-	81,27	82,10	84,75	83,65
CH60-NA	-	87,20	89,15	86,55	86,50
CA20-LF	-	71,20	76,30	80,80	79,20
CA40-LF	-	76,50	84,80	81,10	82,00
CA60-LF	-	83,10	85,30	81,90	82,00
CH20-LF	-	73,65	73,50	75,20	77,20
CH40-LF	-	83,10	83,65	82,70	82,80
CH60-LF	-	83,45	85,55	86,50	87,20
CA20-EAF	-	82,25	86,45	85,80	89,33
CA40-EAF	-	82,75	84,53	85,30	86,70
CA60-EAF	-	81,30	80,80	81,50	82,45
CH20-EAF	-	84,75	89,50	88,65	88,13
CH40-EAF	-	84,38	89,63	90,50	89,70
CH60-EAF	-	87,18	89,98	90,80	94,00

Tabla 6.24 Evolución de la dureza superficial (%) de los morteros de cal aérea e hidráulica.

No es fácil observar las tendencias en los morteros de cal (Gráfico 6.29), puesto que su dureza es muy parecida en todos los casos. Por otra parte, al registrar valores muy bajos, el error experimental que se comete es mayor, lo que distorsiona el estudio realizado.

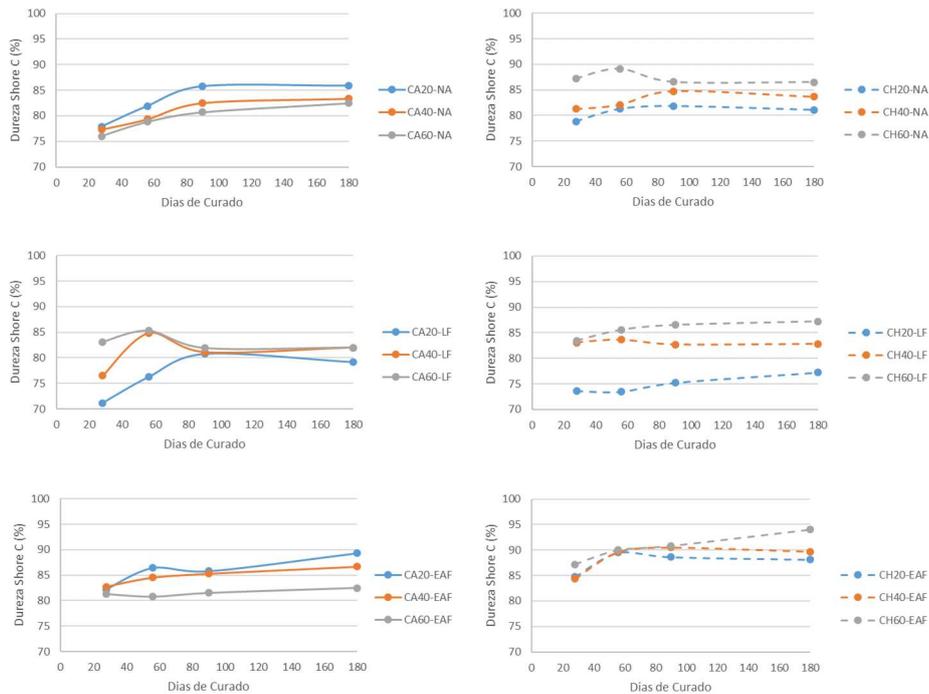


Gráfico 6.29 Evolución de la dureza Shore C (%) de los morteros de cal aérea (izquierda) e hidráulica (derecha) (de arriba a abajo: Árido Natural, Escoria Blanca y Escoria Negra).

En el caso de los morteros dosificados con árido natural se observa que la dureza alcanzada no es muy elevada y que ésta empieza a estabilizarse a los tres meses de edad. Todas son muy semejantes y están comprendidas entre el 75% y el 90%. Una vez estabilizadas, ninguna es inferior al 80%.

Los registros obtenidos para los morteros fabricados con escoria blanca son todavía más dispersos que los valores de dureza de los morteros dosificados con árido natural. Aunque en general éstos se estabilizan igualmente a los tres meses de curado (excepto en el caso de las dosificaciones con un 20% de cal).

Por último, se analizan las dosificaciones que incorporan como árido la escoria negra. Como en el estudio de otras propiedades, son los que muestran un mejor comportamiento, alcanzando la mayoría de las mezclas mayor dureza que sus homólogos fabricados con escoria blanca o arena.

Una vez estudiado cómo afecta la diferente cantidad de cal en la evolución de la dureza, se analiza la influencia del tipo de árido utilizado en

Capítulo VI

las mezclas (Tabla 6.25). También se establece la edad de 56 días como referencia, tiempo suficiente para que se haya producido la carbonatación de la cal.

Dureza Shore C de los morteros de cal (%)							
	CAL-NA	CA20-NA	CA40-NA	CA60-NA	CH20-NA	CH40-NA	CH60-NA
Variación	81,45	81,90	78,80	79,33	81,25	89,15	88,10
			-3,79%	-3,14%		9,72%	8,43%
	CAL-LF	CA20-LF	CA40-LF	CA60-LF	CH20-LF	CH40-LF	CH60-LF
Variación	65,30	76,30	84,80	85,30	73,50	83,65	85,55
			11,14%	11,80%		13,81%	16,39%
	CAL-EAF	CA20-EAF	CA40-EAF	CA60-EAF	CH20-EAF	CH40-EAF	CH60-EAF
Variación	76,20	86,45	84,53	80,80	89,50	89,98	89,63
			-2,22%	-6,54%		0,54%	0,15%

Tabla 6.25 Dureza superficial (%) de los morteros de cal aérea e hidráulica (56 días).

Los morteros fabricados con árido natural registran valores de dureza muy parecidos, con independencia de la cantidad de cal dosificada. En el caso de los morteros fabricados con escoria blanca el comportamiento es dispar, obteniendo valores de dureza superficial altos cuanto mayor es la cantidad de cal dosificada, y bajos cuando es menor.

En el caso de los morteros dosificados con escoria negra, los valores de dureza superficial son elevados en todos los casos, observando una disminución cuando se incrementa la cantidad de cal aérea añadida.

La cal hidráulica por su parte aporta más dureza a las mezclas, debido a que se trata de un conglomerante con mayor dureza propia. Esto no se produce cuando se dosifica escoria blanca como árido. Sin embargo, en todos los casos aumenta según se añade más cal a las mezclas. Para los morteros dosificados con escoria negra este incremento es tan bajo que podría considerarse prácticamente residual.

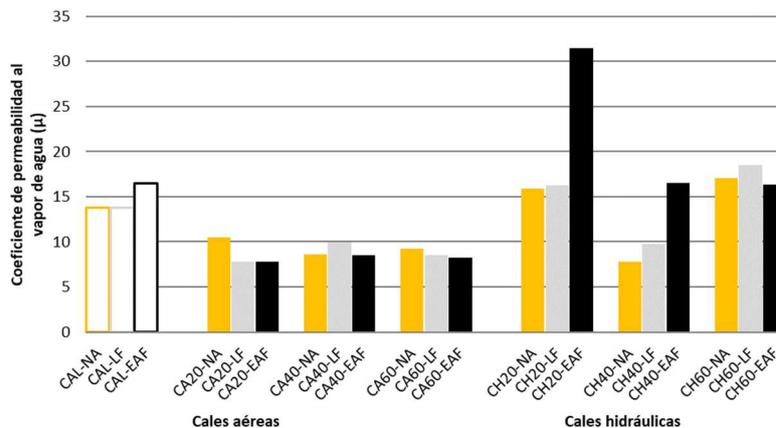


Gráfico 6.30 Dureza superficial de los morteros de cal aérea e hidráulica (56 días).

Por todo ello, se puede concluir que la escoria negra aporta a las mezclas la mayor dureza superficial, sea cual sea el tipo de cal utilizada. Por su parte, la escoria blanca combina mejor con la cal aérea, sobre todo cuando se dosifica en grandes cantidades, alcanzando valores parecidos a los obtenidos con los morteros dosificados con escoria negra, y siempre mayores que los morteros patrón, como así se observa en el Gráfico 6.30.

6.3.2. Resistencia a flexión

Para realizar el estudio de la resistencia a flexión hay que tener en cuenta que los morteros no son materiales que estén preparados para soportar esfuerzos de tracción.

Precisamente por las bajas resistencias mecánicas que se obtienen con los morteros de cal, los valores obtenidos pueden tener dispersiones importantes, por lo que el estudio realizado puede carecer de rigor científico.

6.3.2.1. Análisis de los morteros bastardos

En la Tabla 6.26 se muestran los valores obtenidos para el ensayo de resistencia a flexión. Como se puede comprobar los registros obtenidos son especialmente bajos.

Evolución de la Resistencia a Flexión de los morteros bastardos (MPa)					
	7 días	28 días	56 días	90 días	180 días
CAL-NA	-	0,242	0,598	0,492	1,559
BAS-A-NA	0,213	0,633	0,836	0,539	1,020
BAS-B-NA	0,691	1,438	1,441	1,711	2,508
BAS-C-NA	2,002	3,570	4,020	3,164	3,656
CEM-NA	3,109	4,406	5,360	3,563	4,441
CAL-LF	-	0,400	0,504	0,70	0,623
BAS-A-LF	0,180	0,883	0,700	0,705	0,713
BAS-B-LF	0,250	0,770	1,000	0,914	0,835
BAS-C-LF	0,344	0,750	1,501	1,600	1,321
CEM-LF	0,938	1,030	2,350	2,020	1,952
CAL-EAF	-	0,480	0,624	0,845	0,914
BAS-A-EAF	0,820	1,184	1,995	2,012	1,863
BAS-B-EAF	1,219	2,148	2,859	2,883	2,625
BAS-C-EAF	3,672	4,836	5,687	6,010	5,965
CEM-EAF	6,949	6,996	8,859	8,473	8,332

Tabla 6.26 Evolución de la resistencia a flexión (MPa) de los morteros bastardos.

En el Gráfico 6.31 viene reflejada la evolución de la resistencia a flexión:

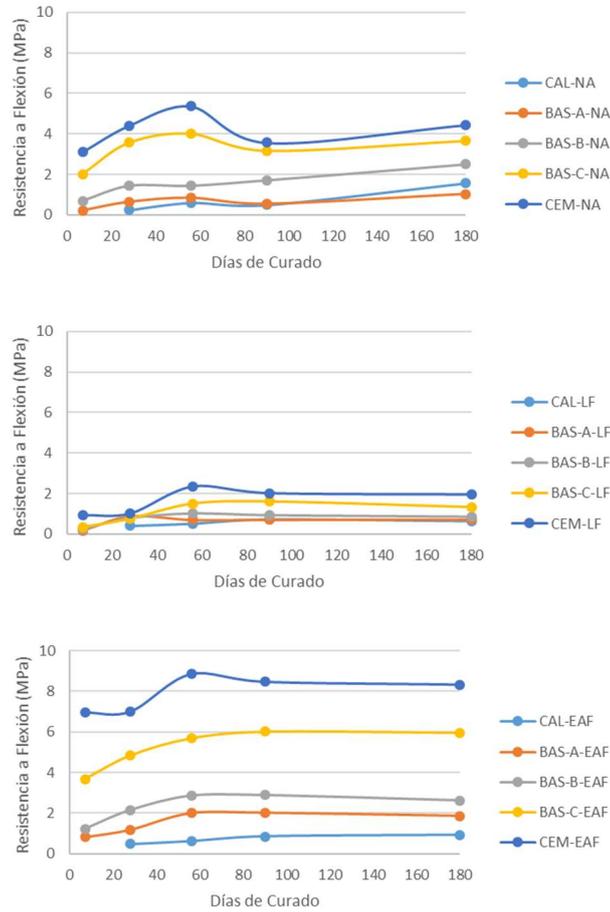


Gráfico 6.31 Evolución de la resistencia a flexión (MPa) de los morteros bastardos (de arriba abajo: Árido Natural, Escoria Blanca y Escoria Negra).

Las resistencias mecánicas a flexión de los morteros fabricados con arena son muy bajas o prácticamente nulas a la edad de 7 días, obtenido un valor significativo (3,109 MPa) sólo en el caso del mortero CEM-NA. Se pueden considerar aceptables las mezclas que contienen más de los 75% de cemento, y en todo caso una vez superados los 56 días de curado.

Las mezclas con más cantidad de cemento adquieren una mayor resistencia en sus primeras edades, experimentando una gran evolución entre los 7 y los 28 días, como en el caso de la mezcla CEM-NA que incrementa su resistencia en un 40%. Por el contrario, en las mezclas con mayor cantidad de cal su evolución es más lenta.

Cabe destacar el descenso observado en la resistencia a flexión de la mayoría de las mezclas entre los 56 y 90 días. No se ha encontrado

explicación a esta disminución, pudiendo ser debido simplemente a errores experimentales. Sin embargo, no resulta alarmante, puesto que a mayores edades de curado esta resistencia vuelve a incrementarse con el tiempo, aunque muy lentamente. Además, en el estudio de la resistencia a compresión esta retracción no se observa.

En el caso de los morteros fabricados con escoria blanca y cemento, los valores obtenidos para la resistencia a flexión son más bajos que en el caso de los morteros dosificados con árido natural, no así para mayores cantidades de cal. Estos resultados tan bajos dificultan un estudio más completo de este tipo de morteros.

Existen dosificaciones que *a priori* deberían presentar resistencias más elevadas que otras (en función al contenido de cemento). Entre los 7 y 28 días no se puede observar este comportamiento, por lo que hay que esperar a los 56 días, edad a la que las mezclas adquieren casi su total resistencia y comienza a estabilizarse al no presentar variaciones con el paso de los días.

Por todo ello, se puede determinar que el comportamiento a flexión de los morteros fabricados con escoria blanca no es bueno y que su evolución con el tiempo de curado prácticamente es residual.

Por último, se analizan las dosificaciones que incorporan como árido la escoria negra, observando que es la que más resistencia aporta a los morteros.

Presentan una resistencia a flexión elevada en sus primeras edades, adquiriendo aún mayores resistencias a los 56 días. La evolución de la resistencia se puede considerar estabilizada y no presenta grandes variaciones entre los 56, 90 y 180 días.

Los valores obtenidos en el ensayo de resistencia a flexión a los 56 días, edad a la que todas las mezclas han adquirido la máxima resistencia, observándose en todos los casos estabilizada, se muestran en la Tabla 6.27:

Resistencia a Flexión de los morteros bastados (MPa)					
	CAL-NA	BAS-A-NA	BAS-B-NA	BAS-C-NA	CEM-NA
Variación	0,598	0,836	1,441	4,020	5,360
		39,80%	140,97%	572,24%	796,32%
	CAL-LF	BAS-A-LF	BAS-B-LF	BAS-C-LF	CEM-LF
Variación	0,504	0,700	1,000	1,501	2,350
		38,89%	98,41%	197,82%	366,27%
	CAL-EAF	BAS-A-EAF	BAS-B-EAF	BAS-C-EAF	CEM-EAF
Variación	0,624	1,195	2,859	5,687	8,859
		91,51%	358,17%	811,38%	1319,71%

Tabla 6.27 Resistencia a flexión (MPa) de los morteros bastados (56 días).

Analizando los datos se determina que:

- La incorporación de cemento en las mezclas produce morteros más resistentes. Sin embargo, la mejora de la resistencia no se presenta por igual dependiendo del árido utilizado.
- Es muy notoria la evolución de las resistencias en el caso de los morteros con árido natural o escoria negra, mientras que, en el caso de los morteros con escoria blanca, las resistencias alcanzadas al añadir cemento son mucho menores.

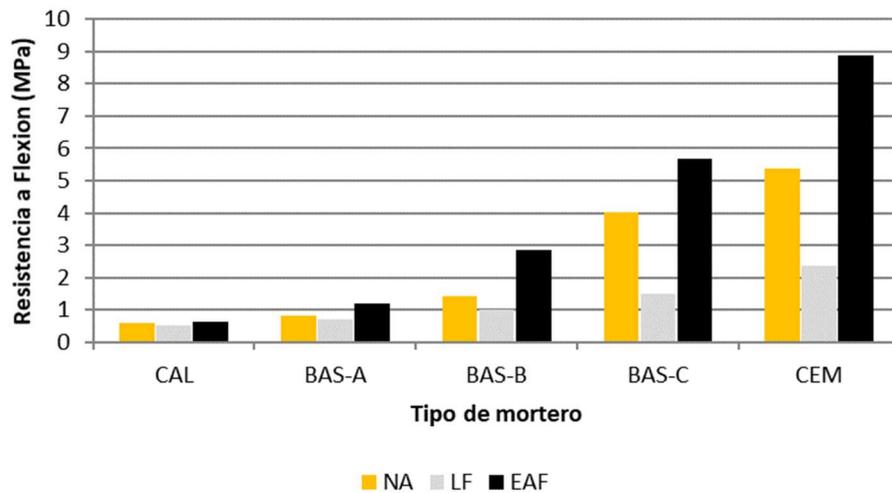


Gráfico 6.32 Resistencia a flexión (MPa) de los morteros bastardos (56 días).

Comparando las tres familias de morteros según el árido utilizado (Gráfico 6.32), se puede determinar que:

- Los morteros fabricados con escoria negra presentan mayores resistencias a flexión respecto de los morteros dosificados con escoria blanca o árido natural, incrementándose especialmente cuando la cantidad de cemento dosificada es cada vez mayor.
- De igual forma, se observa que la resistencia a flexión de los morteros fabricados con escoria blanca es siempre menor que la de los morteros fabricados con árido natural.
- La resistencia a flexión de los morteros se incrementa conforme se añaden mayores cantidades de cemento en las mezclas.

6.3.2.2. Análisis de los morteros de cal

Si los valores de resistencia a flexión aportados por los morteros bastardos son bajos, aún más son los obtenidos para los morteros de cal,

solo superando la resistencia de 1,5 MPa cuando se dosifica mayor cantidad de cal hidráulica y prácticamente a la edad de seis meses.

Por ello, para acometer un estudio eficaz de este tipo de morteros, es más apropiado recurrir al estudio de la resistencia a compresión para conocer con mayor certeza el comportamiento mecánico de este tipo de morteros. Los valores obtenidos se muestran en la Tabla 6.28:

Evolución de la Resistencia a Flexión de los morteros de cal (MPa)					
	7 días	28 días	56 días	90 días	180 días
CA20-NA	-	0,438	0,387	0,820	1,289
CA40-NA	-	0,273	0,281	0,668	1,020
CA60-NA	-	0,200	0,251	0,450	0,539
CH20-NA	-	0,234	0,840	0,801	0,792
CH40-NA	-	1,031	1,184	1,247	1,547
CH60-NA	-	0,922	1,219	1,348	1,688
CA20-LF	-	0,055	0,656	0,574	0,812
CA40-LF	-	0,023	0,223	0,434	0,621
CA60-LF	-	0,039	0,047	0,281	0,569
CH20-LF	-	0,680	0,973	1,012	1,100
CH40-LF	-	1,180	1,300	1,430	1,512
CH60-LF	-	1,445	1,992	1,899	2,124
CA20-EAF	-	0,250	0,398	0,574	0,800
CA40-EAF	-	0,234	0,275	0,398	0,586
CA60-EAF	-	0,117	0,100	0,352	0,423
CH20-EAF	-	1,063	1,214	1,325	1,430
CH40-EAF	-	1,180	1,582	1,430	1,758
CH60-EAF	-	1,348	1,852	2,121	2,098

Tabla 6.28 Evolución de la resistencia a flexión (MPa) de los morteros de cal aérea e hidráulica.

Como se puede comprobar, en todos los casos en los que se ha utilizado cal aérea como conglomerante, la resistencia a flexión de los morteros se incrementa con la edad, con independencia del tipo de árido utilizado, arena natural, escoria blanca o escoria negra. Esto justifica que para el estudio de la resistencia a flexión de los morteros dosificados con cal se precise más tiempo para la realización del ensayo, como se indica en otros apartados de esta Tesis Doctoral.

Para los casos en los que el mortero se dosifica con cal hidráulica, el incremento experimentado por las mezclas en el tiempo es menor, y podría considerarse estabilizado. No es el caso de los morteros fabricados con árido natural, en los que los incrementos también evolucionan a más cuanto mayor es la edad de curado.

Una vez más, el comportamiento de los morteros fabricados con cal hidráulica es semejante al de los morteros bastardos, en los que la

Capítulo VI

evolución de la resistencia mecánica a flexión no presenta incrementos significativos transcurridos 180 días de edad.

En el Gráfico 6.33 viene reflejada la evolución de la resistencia a flexión:

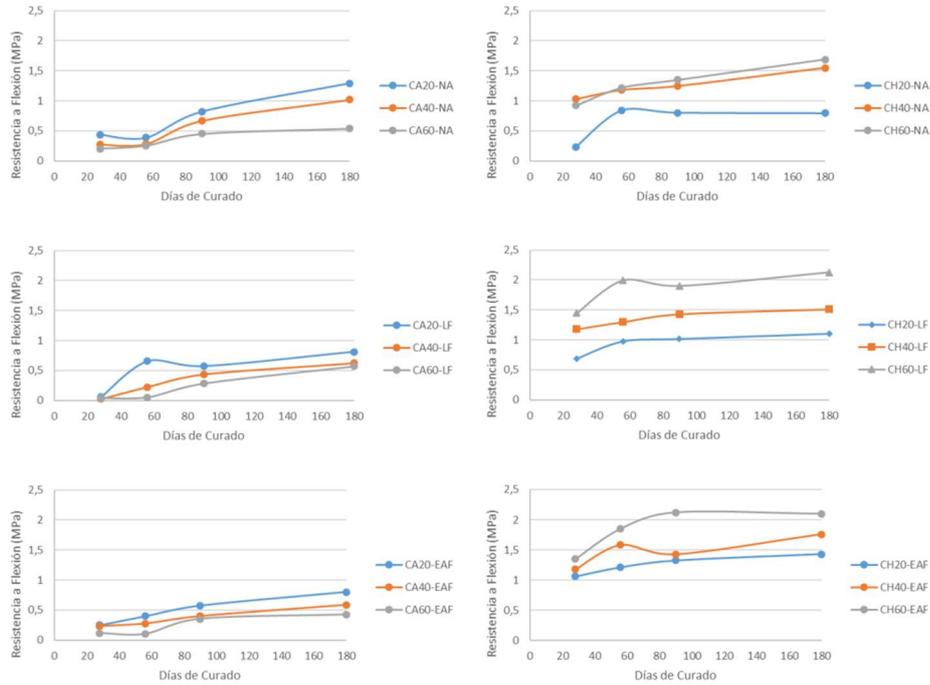


Gráfico 6.33 Evolución de la resistencia a flexión (MPa) de los morteros de cal aérea (izquierda) e hidráulica (derecha) (de arriba a abajo: Árido Natural, Escoria Blanca y Escoria Negra).

Aunque sería conveniente realizar el estudio a mayor edad, debido a los incrementos de resistencias a flexión de los morteros de cal aérea, se toma como referencia la edad de los 56 días para poder establecer relaciones con el resto de las mezclas (Tabla 6.29).

Resistencia a Flexión de los morteros de cal (MPa)							
	CAL-NA	CA20-NA	CA40-NA	CA60-NA	CH20-NA	CH40-NA	CH60-NA
Variación	0,598	0,387	0,281	0,251	0,840	1,184	1,219
			-27,39%	-35,14%		40,95%	45,12%
	CAL-LF	CA20-LF	CA40-LF	CA60-LF	CH20-LF	CH40-LF	CH60-LF
Variación	0,375	0,656	0,223	0,047	0,973	1,300	1,992
			-66,01%	-92,84%		33,61%	104,73%
	CAL-EAF	CA20-EAF	CA40-EAF	CA60-EAF	CH20-EAF	CH40-EAF	CH60-EAF
Variación	0,164	0,398	0,275	0,100	1,214	1,582	1,852
			-30,90%	-74,87%		30,31%	52,55%

Tabla 6.29 Resistencia a flexión (MPa) de los morteros de cal aérea e hidráulica (56 días).

Si se realiza el análisis según el tipo de cal utilizado, se puede observar una clara diferencia entre los valores de resistencia mecánica a flexión obtenidos para la cal aérea y para la cal hidráulica, siendo mayor en el caso de esta última.

En el caso de los morteros que incorporan cal aérea, los resultados obtenidos son muy bajos, aunque sí se observan variaciones entre las dosificaciones. Para cualquiera que sea el árido utilizado, la resistencia se reduce con el incremento de cal aérea, teniendo los morteros dosificados con un 60% de cal las resistencias a flexión más bajas.

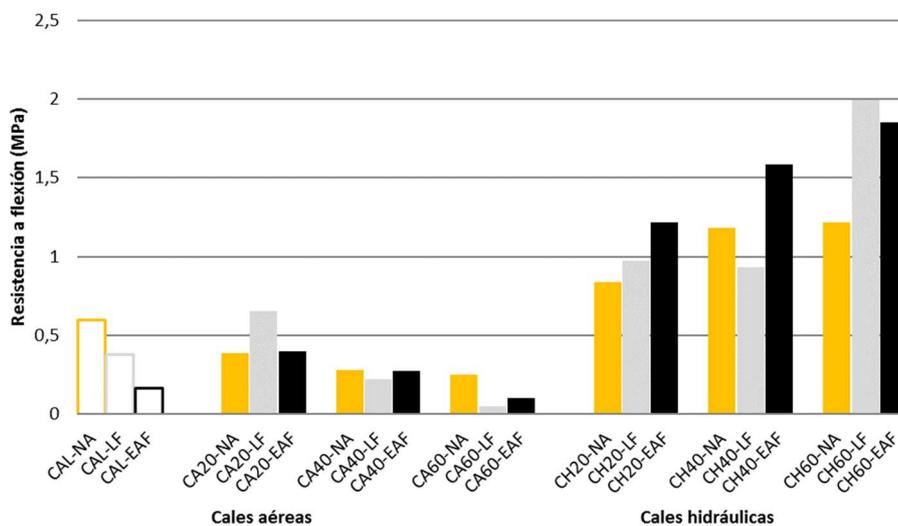


Gráfico 6.34 Resistencia a flexión (MPa) de los morteros de cal aérea e hidráulica (56 días).

Se puede observar (Gráfico 6.34) que, Si se utiliza cal hidráulica los valores de resistencia mecánica a flexión son más elevados y las diferencias entre los tipos de morteros se observan con más facilidad. Las resistencias aumentan con el incremento de la cantidad de la cal hidráulica dosificada, siendo los morteros que contienen un 60% de cal hidráulica los que mejores resistencias aportan. En el caso de la cal aérea, una mayor cantidad de conglomerante dosificado no produce morteros con suficiente resistencia mecánica a flexión.

No se puede olvidar que la cal hidráulica contiene componentes mineralógicos semejantes a los del cemento, por lo que, al incrementarse esta cantidad, la resistencia de las mezclas mejora considerablemente.

6.3.3. Resistencia a compresión

La resistencia a compresión es el criterio más empleado para identificar y prescribir un mortero. Existe una relación entre la resistencia mecánica a

flexión y compresión de un mortero, por lo que conociendo una se puede prever la otra, por ello el estudio de la resistencia a compresión ha ayudado a despejar dudas sobre el comportamiento a flexión de los morteros.

Es necesario indicar que para el caso de los ensayos coincidentes se han tomado los valores obtenidos de los ensayos experimentales del Capítulo 5 “Fase experimental previa”, completando con la realización del ensayo los no elaborados en dicho capítulo. De este modo, los valores obtenidos mediante las Superficies de Respuesta tan solo se han utilizado para hacer las correcciones precisas en el experimento.

Destacar que los comportamientos observados mediante las Superficies de Respuesta han sido comprobados con los resultados obtenidos en este apartado en el laboratorio.

Una de las resistencias comerciales más solicitadas para un mortero es la de 5 N/mm², prescrito como M5. Sin embargo, la resistencia aportada por la cal al mortero endurecido es menor, por lo que para este tipo de morteros se establece la referencia a alcanzar de 2,5 N/mm², con el objetivo de diseñar un mortero prescrito como M2,5²³⁷.

6.3.3.1. Análisis de los morteros bastardos

Para el estudio de la evolución de la resistencia a compresión, se repite el esquema utilizado anteriormente para los ensayos de dureza superficial y de resistencia a flexión. Los valores obtenidos se muestran en la Tabla 6.30:

Evolución de la Resistencia a Compresión de los morteros bastardos (MPa)					
	7 días	28 días	56 días	90 días	180 días
CAL-NA	-	0,628	0,794	1,205	2,002
BAS-A-NA	0,802	1,230	1,330	1,289	1,739
BAS-B-NA	2,475	3,971	4,493	4,98	5,739
BAS-C-NA	6,335	8,196	11,080	9,741	9,994
CEM-NA	9,708	15,304	18,134	17,103	17,954
CAL-LF	-	0,896	1,100	1,356	1,200
BAS-A-LF	1,166	1,790	1,362	1,550	1,371
BAS-B-LF	1,299	2,321	2,391	1,908	1,571
BAS-C-LF	1,53	2,589	3,594	3,653	2,814
CEM-LF	2,116	4,843	6,386	5,847	5,459
CAL-EAF	-	0,700	0,934	1,759	2,727
BAS-A-EAF	1,099	2,352	2,471	5,934	5,098
BAS-B-EAF	2,411	7,448	10,016	9,900	9,464
BAS-C-EAF	7,277	13,13	17,037	19,977	20,434
CEM-EAF	20,861	29,105	31,733	31,156	31,258

Tabla 6.30 Evolución de la resistencia a compresión (MPa) de los morteros bastardos.

²³⁷ González Cortina, M. and L. D. Villanueva Domínguez (2002). "Morteros hidráulicos de cal y chamota." Ibid. 52(266): 65-76.

En primer lugar, se realiza el análisis las mezclas de árido natural. Las mezclas CEM-NA y BAS-C-NA superan sobradamente los 5 N/mm² exigidos para los morteros de albañilería, mientras que la mezcla correspondiente al mortero BAS-B-NA supera los 2,5 N/mm² determinado para los morteros de cal a los 28 días, alcanzando los 5 N/mm² a los 56 días. Por el contrario, las mezclas con más proporción de cal, BAS-A-NA y CAL-NA, alcanzan resistencias muy alejadas de las establecidas como referencia.

Se observa también que la evolución de las resistencias en las primeras edades es poco significativa cuando existe una mayor presencia de cal, y que esta se mantiene casi igual sea cual sea su edad de curado.

Sin embargo, le evolución presentada por mezclas con gran cantidad de cemento (CEM-NA y BAS-C-NA) es más positiva con el paso del tiempo, aunque experimentan una pequeña reducción, no significativa, a los 90 días de curado, estabilizándose posteriormente. Se puede considerar que estos morteros alcanzan la resistencia máxima a los 56 días, estabilizándose a partir de esta edad.

Por otra parte, si se analizan las mezclas dosificadas con escoria blanca, las resistencias a compresión alcanzadas son muy inferiores. Tan solo la mezcla CEM-LF alcanza la resistencia de 5 N/mm² y lo hace a edades superiores a lo que exige la norma. Ninguna de las mezclas que incorpora cal llega a esa residencia a los 28 días. Además, tan solo la mezcla con menor cantidad de cal (BAS-C-LF), alcanza en algún momento los 2,5 N/mm².

En este caso también se observa una pérdida de resistencia una vez alcanzado el valor máximo, pero tampoco es significativa como en el caso de los morteros tradicionales, ya que los datos se pueden considerar análogos.

Por último, en el análisis de los morteros fabricados con escoria negra, se observa como este tipo de árido es el que mejores resistencias aporta a los morteros, como en el caso de otras propiedades estudiadas con anterioridad. Incluso el mortero CAL-EAF alcanza los 2,5 N/mm², aunque esto lo hace a los 180 días. Asimismo, las mezclas con presencia de cemento no solo superan este valor, si no que llegan a alcanzar los 5 N/mm².

La mezcla BAS-A-EAF alcanza valores cercanos a los 2,5 N/mm² a los 28 días. Otras mezclas presentan un mejor comportamiento, como la mezcla BAS-B-EAF que alcanza este valor antes de los 28 días, e incluso las mezclas BAS-C-EAF y CEM-EAF que lo superan a los 7 días. Los morteros que incorporan más del 50% de cemento pueden prescribirse como M7,5, al alcanzar los 7,5 N/mm².

Respecto a su evolución con la edad de curado, se observa como tardan más en alcanzar su resistencia máxima, puesto que algunas de ellas la alcanzan a los 90 días.

Capítulo VI

En el Gráfico 6.35 viene reflejada la evolución de la resistencia a compresión:

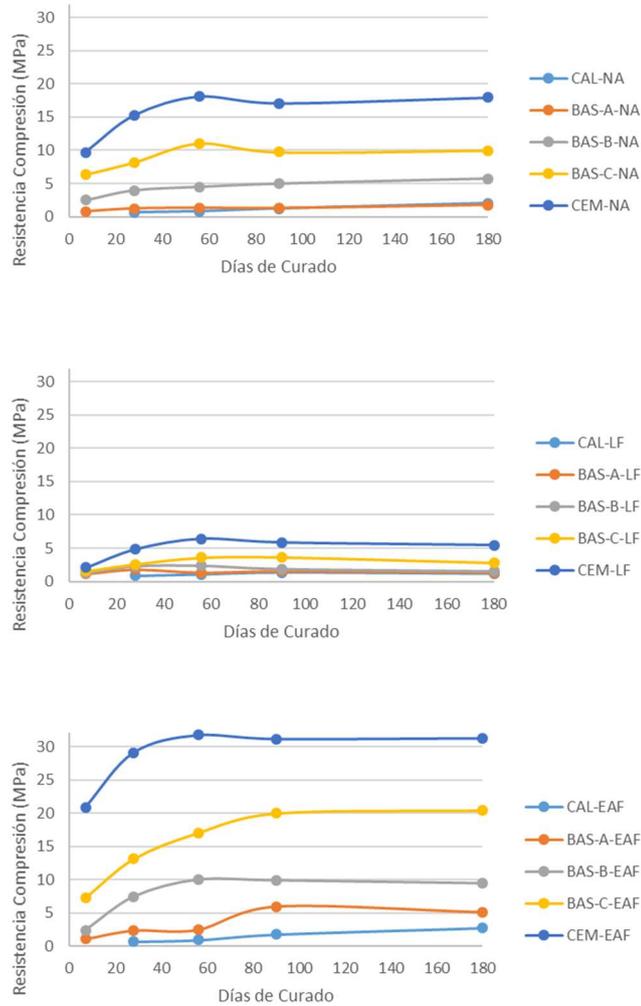


Gráfico 6.35 Evolución de la resistencia a compresión (MPa) de los morteros bastardos (de arriba abajo: Árido Natural, Escoria Blanca y Escoria Negra).

En la Tabla 6.31 se muestra la resistencia de las probetas a los 56 días. Aunque las mezclas realizadas con escoria negra no han alcanzado su máxima resistencia, no sería apropiado comparar resistencias a edades diferentes. De igual modo, la resistencia de éstos a los 56 días es suficientemente elevada como para superar al resto de morteros.

Caracterización de los morteros con áridos siderúrgicos

Resistencia a Compresión de los morteros bastados (MPa)					
	CAL-NA	BAS-A-NA	BAS-B-NA	BAS-C-NA	CEM-NA
Variación	0,794	1,330	4,493	11,080	18,134
		67,51%	465,87%	1295,47%	2183,88%
	CAL-LF	BAS-A-LF	BAS-B-LF	BAS-C-LF	CEM-LF
Variación	1,100	1,362	2,391	3,594	6,386
		23,82%	117,36%	226,73%	480,55%
	CAL-EAF	BAS-A-EAF	BAS-B-EAF	BAS-C-EAF	CEM-EAF
Variación	0,934	2,471	10,016	17,037	31,733
		164,56%	972,38%	1724,09%	3297,54%

Tabla 6.31 Resistencia a compresión (MPa) de los morteros bastados (56 días).

El mayor incremento se produce en los morteros fabricados con escoria negra, sobre todo conforme se incrementa la cantidad de cemento dosificada, alcanzando una resistencia 30 veces más que en el caso de los morteros dosificados con solo un conglomerante. Estos resultados muestran el buen comportamiento de los morteros dosificados con cemento y escoria negra, mientras que en el caso de la cal no es tan efectiva.

Aunque en menor medida, también resulta muy positiva la evolución en el caso de los morteros dosificados con arena natural, que multiplican por 20 su resistencia. En el caso de los morteros fabricados con escoria blanca, la resistencia es mucho menor.

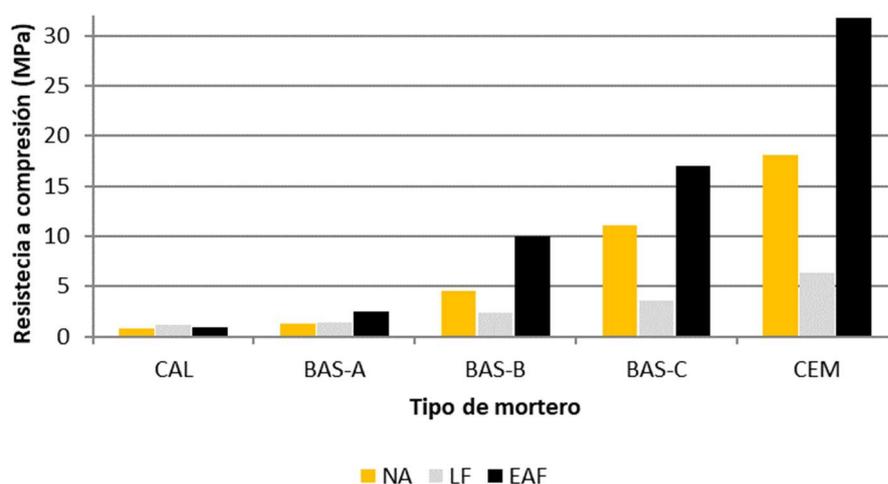


Gráfico 6.36 Resistencia a compresión de los morteros bastados (56 días).

En los morteros fabricados con escoria blanca se observa que su resistencia a compresión resulta ser menor que los morteros fabricados con áridos naturales. No obstante, los morteros dosificados con cal muestran buenos resultados cuando el árido es escoria blanca (Gráfico 6.36).

Esto invita a remarcar el fenómeno que ya se había visto en la fase experimental previa, pero que ahora con la incorporación de la dosificación CAL-LF queda mucho más evidenciado:

“Para morteros con grandes cantidades de cal, es posible la sustitución de la arena por la escoria blanca, ya que los resultados de resistencia mecánica son adecuados. No es el caso cuando la presencia de cemento es mayor”.

Ya se ha evidenciado el buen comportamiento en los morteros fabricado con cal y escoria blanca. Es probable que el análisis de la composición química de la escoria blanca explique este comportamiento por la existencia de cal libre en la escoria, lo que puede inducir a que, con el tiempo, se hidrate y carbonate, contribuyendo así al incremento de la resistencia mecánica.

Sin embargo, aunque en algunos estudios se ha comprobado una potencial capacidad hidráulica o puzolánica de la escoria blanca a largo plazo^{238,239}, este campo de estudio está menos desarrollado, ya que es un material difícil de combinar con el resto de los componentes del mortero (cemento y arena).

Los datos mostrados por la familia de mezclas con escoria negra permiten afirmar que los morteros fabricados con este tipo de árido son los que obtienen mejores resultados de resistencia a compresión.

Este comportamiento puede explicarse por la propia resistencia del árido y también nuevamente por el conocido efecto hidráulico y puzolánico de las escorias negras, lo que contribuye a incrementar la presencia en el mortero de los silicatos cálcicos (SC₂ y SC₃) que confieren resistencias mecánicas a las mezclas^{240,241}.

6.3.3.2. Análisis de los morteros de cal

Los valores obtenidos se muestran en la Tabla 6.32:

²³⁸ Maghool, F., A. Arulrajah, S. Horpibulsuk and Y.-J. Du (2016). "Laboratory Evaluation of Ladle Furnace Slag in Unbound Pavement-Base/Subbase Applications." Journal of Materials in Civil Engineering: 04016197.

²³⁹ Adolfsson, D., F. Engström, R. Robinson and B. Björkman (2011). "Cementitious phases in ladle slag." Steel research international **82**(4): 398-403.

²⁴⁰ Mahoutian, M., Y. Shao, A. Mucci and B. Fournier (2015). "Carbonation and hydration behavior of EAF and BOF steel slag binders." Materials and Structures **48**(9): 3075-3085.

²⁴¹ Kim, H.-S., K.-S. Kim, S. S. Jung, J. I. Hwang, J.-S. Choi and I. Sohn (2015). "Valorization of electric arc furnace primary steelmaking slags for cement applications." Waste Management **41**: 85-93.

Caracterización de los morteros con áridos siderúrgicos

Evolución de la Resistencia a Compresión de los morteros de cal (MPa)					
	7 días	28 días	56 días	90 días	180 días
CA20-NA	-	0,521	1,216	1,370	2,528
CA40-NA	-	0,529	0,619	1,186	2,113
CA60-NA	-	0,406	0,580	0,963	2,009
CH20-NA	-	0,408	1,291	1,284	1,175
CH40-NA	-	2,464	3,259	3,091	3,334
CH60-NA	-	3,145	4,983	4,319	4,997
CA20-LF	-	0,519	1,456	1,628	2,113
CA40-LF	-	0,602	1,291	1,361	1,622
CA60-LF	-	0,408	0,976	1,284	1,175
CH20-LF	-	1,575	1,600	1,605	1,33
CH40-LF	-	1,956	2,839	2,909	2,559
CH60-LF	-	3,048	3,361	3,077	2,169
CA20-EAF	-	0,608	1,319	1,572	2,505
CA40-EAF	-	0,691	1,124	1,286	1,509
CA60-EAF	-	0,911	0,947	0,983	1,191
CH20-EAF	-	1,857	2,218	2,175	2,192
CH40-EAF	-	3,224	3,293	5,934	5,675
CH60-EAF	-	5,082	6,184	7,245	7,540

Tabla 6.32 Evolución de la Resistencia a Compresión (MPa) de los morteros de cal aérea e hidráulica.

En el Gráfico 6.37 viene reflejada la evolución de la resistencia a compresión:

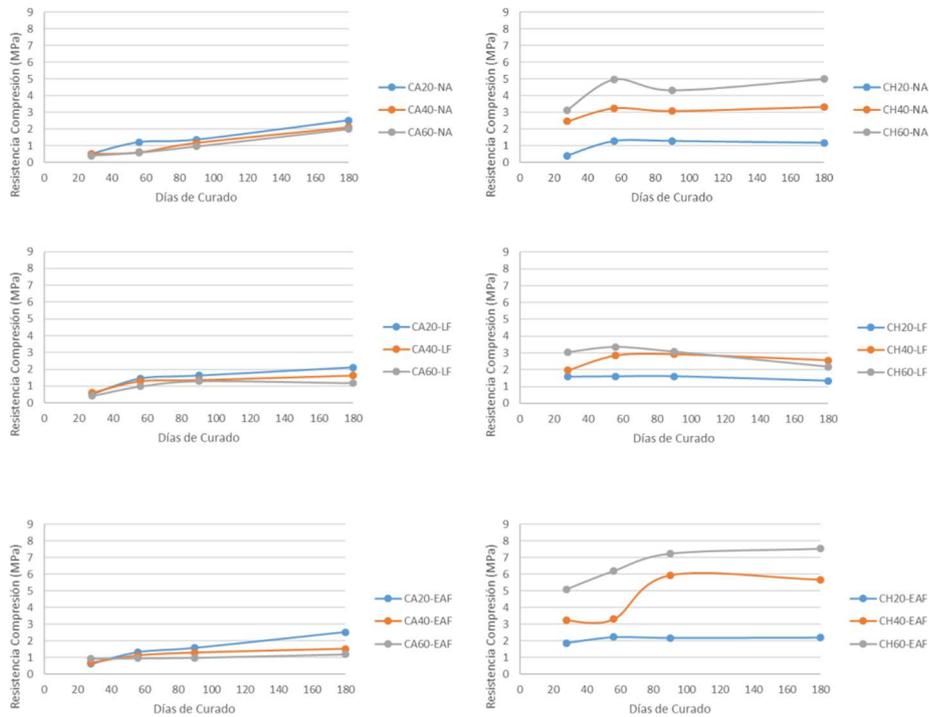


Gráfico 6.37 Evolución de la resistencia a compresión (MPa) de los morteros de cal aérea (izquierda) e hidráulica (derecha) (de arriba a abajo: Árido Natural, Escoria Blanca y Escoria Negra).

La resistencia a compresión para los morteros de cal, tanto aérea como hidráulica, es proporcional a la resistencia a flexión de los mismos. Nuevamente aporta valores superiores y con menores dispersiones, lo que no solo facilita el estudio de la resistencia a compresión, sino que permite aclarar dudas surgidas en el estudio de flexión.

En el caso de la resistencia a compresión de los morteros de cal y árido natural se observa cómo se produce un incremento de las resistencias entre los 28 y 56 días de curado. A partir de esta edad, la cal hidráulica se estabiliza y no gana resistencias. De este modo, desde las primeras edades los morteros con gran cantidad de cal hidráulica adquieren al menos los 2,5 N/mm². Con poca cantidad de cal (CH20-NA) nunca se alcanzan las resistencias requeridas.

Sin embargo, los morteros de cal aérea, por su lenta carbonatación, siguen adquiriendo resistencias a lo largo del tiempo. Se puede observar una evolución positiva, doblando sus resistencias entre los tres y los seis meses de curado, aunque no llegan a los 2,5 N/mm² requeridos.

Para los morteros fabricados con escoria blanca, en ningún caso se observa una evolución significativa una vez alcanzados los dos meses de curado, con independencia de la cantidad de cal dosificada o del tipo de ésta, registrándose resistencias mecánicas bajas.

Es en el caso de los morteros dosificados con escoria negra es donde más significativa es la evolución de la resistencia mecánica. Al igual que para la resistencia a flexión, los morteros dosificados con cal hidráulica siguen adquiriendo resistencias, produciéndose la estabilización a los 90 días y no a los 56. Por su parte, las mezclas dosificadas con cal aérea muestran un ligero incremento con la edad de curado, como en el caso del resto de mezclas fabricadas con otros tipos de áridos.

Se realiza un estudio comparativo de la resistencia a compresión de los morteros (Tabla 6.33), tomando como referencia la alcanzada a los 56 días:

Resistencia a Compresión de los morteros de cal (MPa)							
	CAL-NA	CA20-NA	CA40-NA	CA60-NA	CH20-NA	CH40-NA	CH60-NA
Variación	0,794	1,126	0,619	0,580	1,291	3,259	4,983
			-45,03%	-48,49%		152,44%	285,98%
	CAL-LF	CA20-LF	CA40-LF	CA60-LF	CH20-LF	CH40-LF	CH60-LF
Variación	1,100	1,456	1,291	0,976	1,600	2,839	3,361
			-11,33%	-32,97%		77,44%	110,06%
	CAL-EAF	CA20-EAF	CA40-EAF	CA60-EAF	CH20-EAF	CH40-EAF	CH60-EAF
Variación	0,934	1,319	1,124	0,947	2,218	3,293	6,184
			-14,78%	-28,20%		48,47%	178,81%

Tabla 6.33 Resistencia a compresión (MPa) de los morteros de cal aérea e hidráulica (56 días).

En el caso de los morteros dosificados con cal aérea, todos quedan por debajo de la referencia de los 2,5 N/mm² establecida en el estudio. Las

resistencias obtenidas en los morteros dosificados con escoria blanca o escoria negra son mayores a las obtenidas con árido natural.

Los morteros de cal hidráulica adquieren más resistencia según se incrementa la cantidad dosificada, con independencia del árido utilizado, alcanzando un 50% más con el doble de producto.

Los morteros dosificados con cal hidráulica y escoria negra obtienen las mayores resistencias mecánicas, por encima de los morteros de escoria blanca y los de referencia con árido natural.

Por el contrario, los morteros dosificados con escoria blanca o arena muestran buenos comportamientos con cantidades menores, no superando en ningún caso los 5 N/mm², pero sí la referencia de los 2,5 N/mm². Por ello, cualquier dosificación que supere el 40% de cal hidráulica podría ser considerada una buena opción para este tipo de morteros.

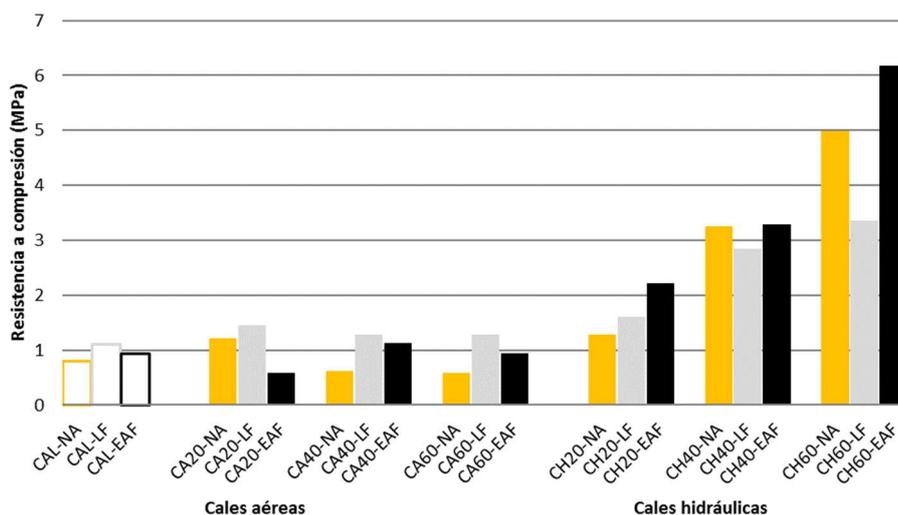


Gráfico 6.38 Resistencia a compresión (MPa) de los morteros de cal aérea e hidráulica (56 días).

En el Gráfico 6.38 viene reflejada la resistencia a compresión de los morteros de cal a los 56 días de edad.

6.3.4. Adherencia

La adherencia es una propiedad que estudia el comportamiento de los morteros cuando están sometidos a esfuerzos de tracción, por lo que es de especial importancia en el caso de los morteros de revestimiento.

En los revestimientos de las fábricas, donde los morteros deben soportar tensiones normales y tangenciales, su adherencia es de especial importancia para garantizar la estabilidad de los revocos y enfoscados.

Para el estudio de la adherencia se ha procedido a una humectación previa de los soportes cerámicos, sumergiendo éstos primeramente durante un minuto en agua. De este modo, se evita que las piezas cerámicas absorban el agua de amasado del mortero. La adherencia de los morteros sobre los materiales húmedos es superior a la de los soportes secos, como así comprueba el doctor Ángel Rodríguez en su Tesis Doctoral¹⁴¹.

En el caso de la adhesión, se ha optado por realizar ensayos a los 28 y 56 días, ya que en la mayoría de los casos se ha observado que a partir de esta edad las propiedades se pueden considerar estabilizadas.

6.3.4.1. Análisis de los morteros bastardos

La adherencia obtenida tanto a 28 como a 56 días para los diferentes morteros viene reflejada en la Tabla 6.34:

Adherencia de los morteros bastardos (MPa)					
	CAL-NA	BAS-A-NA	BAS-B-NA	BAS-C-NA	CEM-NA
28 días	0,068	0,107	0,176	0,294	0,337
56 días	0,091	0,150	0,299	0,530	0,606
Variación		64,84%	228,57%	482,42%	565,93%
	CAL-LF	BAS-A-LF	BAS-B-LF	BAS-C-LF	CEM-LF
28 días	0,030	0,060	0,070	0,094	0,110
56 días	0,049	0,081	0,115	0,122	0,187
Variación		65,31%	134,69%	148,98%	281,63%
	CAL-EAF	BAS-A-EAF	BAS-B-EAF	BAS-C-EAF	CEM-EAF
28 días	0,130	0,158	0,240	0,460	0,620
56 días	0,143	0,174	0,312	0,736	1,200
Variación		21,68%	118,18%	414,69%	739,16%

Tabla 6.34 Adherencia (MPa) de los morteros bastardos.

De nuevo en los morteros dosificados con mayor cantidad de cal la evolución entre una edad y otra no es significativa, aumentando esta diferencia según se incorpora más cantidad de cemento a las mezclas, llegando a duplicarse en las dosificaciones CEM-NA y CEM-EAF. Este comportamiento no se observa en el caso de la escoria blanca, donde el incremento de la adherencia con el paso del tiempo es mucho menor.

Si se hace un estudio de la adherencia de los morteros en función de árido utilizado (Gráfico 6.39), se comprueba que los morteros dosificados con escoria negra presentan adherencias similares a las de los morteros dosificados con árido natural. Con la incorporación de más cantidad de

141 Rodríguez, A. (2008). Fabricación de morteros de albañilería con escoria blanca de horno cuchara y su utilización en construcción, Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Burgos, España.

cemento a las mezclas, la adherencia mostrada por los morteros con escoria negra es altamente superior.

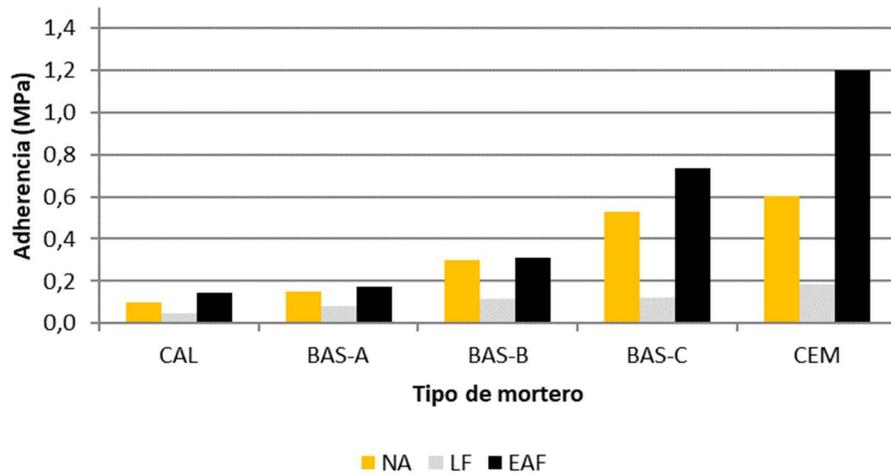


Gráfico 6.39 Adherencia (MPa) de los morteros bastardos (56 días).

En el caso de la utilización de la escoria blanca, los morteros no muestran una buena adherencia, inferior a la de los morteros tradicionales.



Figura 6.1 Muestra del ensayo de adherencia de mortero con Árido Natural (NA), Escoria Blanca (LF) y Escoria Negra (EAF).

Por último, tal y como indica la normativa, se comprueba el tipo de rotura producido en la interfase mortero soporte (Figura 6.1). Como puede comprobarse en los anteriores ejemplos, la rotura de todas las piezas ha sido Tipo Adhesiva (Tipo "a" según norma), produciéndose la rotura en la interfase entre el mortero y el soporte.

6.3.4.2. Análisis de los morteros de cal

La adherencia obtenida tanto a 28 como a 56 días para los diferentes morteros se muestra en la Tabla 6.35:

Capítulo VI

Adherencia de los morteros de cal (MPa)							
	CAL-NA	CA20-NA	CA40-NA	CA60-NA	CH20-NA	CH40-NA	CH60-NA
28 días	0,068	0,039	0,031	0,012	0,467	0,100	0,080
56 días	0,091	0,058	0,053	0,022	0,608	0,125	0,084
Variación			-8,62%	-62,07%		-79,44%	-86,18%
	CAL-LF	CA20-LF	CA40-LF	CA60-LF	CH20-LF	CH40-LF	CH60-LF
28 días	0,030	0,031	0,028	0,017	0,083	0,040	0,020
56 días	0,049	0,056	0,051	0,036	0,087	0,040	0,021
Variación			-8,93%	-35,71%		-54,02%	-75,86%
	CAL-EAF	CA20-EAF	CA40-EAF	CA60-EAF	CH20-EAF	CH40-EAF	CH60-EAF
28 días	0,130	0,117	0,013	0,028	0,292	0,114	0,053
56 días	0,143	0,134	0,015	0,030	0,336	0,148	0,056
Variación			-88,81%	-77,61%		-55,95%	-83,33%

Tabla 6.35 Adherencia (MPa) de los morteros de cal aérea e hidráulica.

En todos los casos, la adherencia de los morteros es superior conforme se incrementa la edad de curado, por lo que esto confirma que en el caso de los morteros de cal no puede considerarse un periodo de 28 días, pues los procesos de carbonatación precisan de más tiempo. Por ello el análisis comparativo entre las mezclas se realiza a los 56 días (Gráfico 6.40).

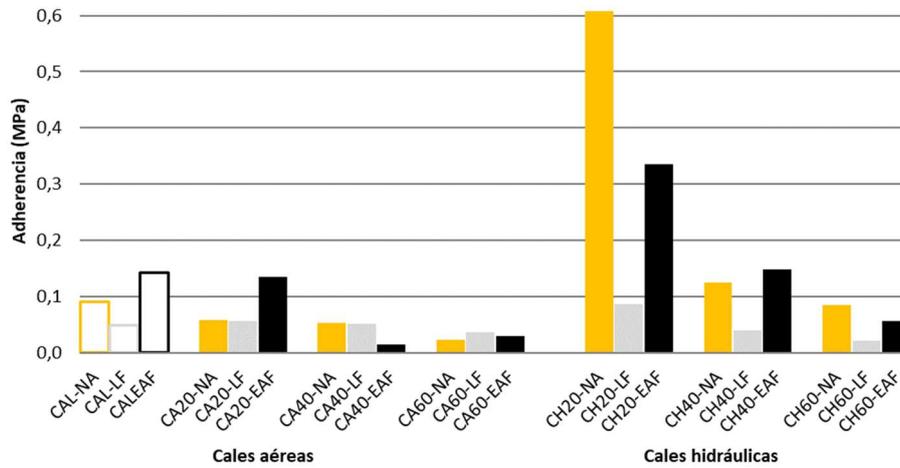


Gráfico 6.40 Adherencia (MPa) de los morteros de cal estudiados (56 días).

Los morteros fabricados con cal aérea presentan adherencias muy bajas, por lo que *a priori*, sea cual sea el árido utilizado, no son morteros apropiados para ser utilizados como morteros de revestimiento o morteros de albañilería si no se mejora esta propiedad con algún tipo de aditivo.

Los morteros dosificados con cal hidráulica muestran buenos resultados de resistencia mecánica a flexión y compresión, pero no la resistencia a

fuerzas de tracción, por lo que dependiendo de lo que se precise, habrá que buscar un equilibrio en la composición de las mezclas.

Se observan un buen comportamiento a la adhesión en los morteros dosificados con árido natural, que no superan los morteros dosificados con otros tipos de áridos. No obstante, la escoria negra aporta adherencias muy elevadas, incluso similares a las de los morteros con áridos naturales, cuando se dosifica cal en altas proporciones, mientras que en los morteros con escoria blanca no presentan buenas adherencias.

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 (Figura 6.2).

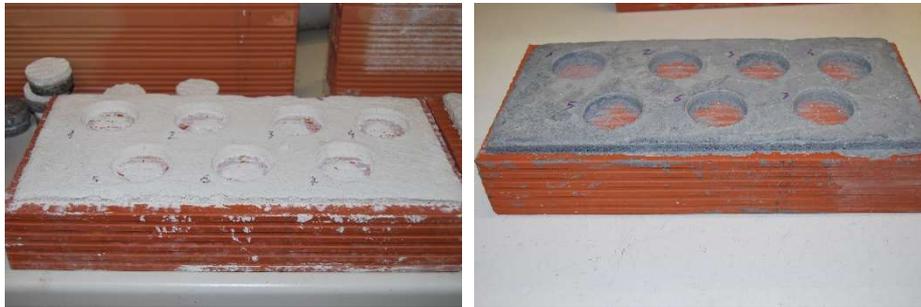


Figura 6.2 Muestra del ensayo de adherencia de mortero de cal con Escoria Blanca (LF) y Escoria Negra (EAF).

6.4. CONCLUSIONES

Respecto a las propiedades de los morteros bastardos:

Del estudio y caracterización de los morteros bastardos fabricados con áridos siderúrgicos, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

1. Se comprueba que la demanda de agua en la preparación de las mezclas, para la consistencia plástica de diseño (175 ± 10 mm), es mayor cuando se dosifica escoria blanca. Como consecuencia, la porosidad se incrementa, afectando directamente a su densidad y resistencias mecánicas. En los morteros fabricados con arena silícica o escoria negra, la demanda de agua es menor.
2. Los morteros bastardos dosificados con escoria negra y árido natural contienen una porosidad similar, para cada relación cal/cemento estudiada. Los morteros fabricados con escoria blanca son los que más agua absorben, tanto por absorción a presión atmosférica como por capilaridad. Los valores de absorción de los morteros dosificados con escoria negra o árido natural son similares.

3. De igual modo, se comprueba que los morteros fabricados con cemento y escoria negra son menos trabajables, al igual que los dosificados con escoria blanca. No obstante, la retención de agua está cercana o supera el 80%, establecida como referencia de trabajo de los fabricantes de morteros, en todos sus casos.
4. La permeabilidad de los morteros fabricados con áridos siderúrgicos es similar a los morteros fabricados con árido natural. En las mezclas preparadas con escoria blanca la dureza superficial y la adherencia son menores.
5. Se comprueba que los morteros fabricados con escoria negra presentan mejores comportamientos mecánicos, tanto a flexión como a compresión, que los fabricados con escoria blanca o con arena. El uso de escoria negra, en sustitución del árido natural en la elaboración de morteros bastardos de albañilería, es una opción técnicamente viable, ya que los resultados de laboratorio muestran comportamientos aceptables para su utilización en construcción.
6. Por el contrario, el empleo de escoria blanca en sustitución total del árido natural en la fabricación de morteros precisaría de un estudio más profundo, con la posible inclusión de aditivos idóneos para mejorar su comportamiento.
7. La afirmación de que *“Los morteros fabricados con áridos silíceos incrementan sus propiedades mecánicas proporcionalmente a la cantidad de cemento utilizada. No es el caso de los morteros con escoria blanca, que presentan mejores resistencias mecánicas que los morteros de arena, cuanto mayor es la cantidad de cal, produciéndose un incremento menor de resistencia al añadir mayores cantidades de cemento, o lo que eso mismo, presentando las mezclas con mayor cantidad de cemento menores resistencias”* se corrobora por el comportamiento mecánico obtenido para los morteros que utilizan como conglomerante únicamente cal aérea.
8. Por último, con independencia del árido utilizado en las mezclas, los morteros fabricados con cal aérea como conglomerante no presentan buenos comportamientos para ser utilizados en construcción, por lo que se requiere mayores cantidades de cal en su dosificación.

Respecto a las propiedades de lo morteros de cal:

Del estudio y caracterización de los morteros dosificados con cal aérea e hidráulica y con áridos siderúrgicos, con mayores cantidades de conglomerante en la dosificación, se concluye que:

9. Las escorias blancas de Horno de Cuchara utilizadas como árido en la fabricación de morteros de cal aérea infieren mayores cantidades de agua de amasado. Sin embargo, pese a ser un factor crítico, que debe ser controlado en la fabricación de morteros por su influencia negativa en las resistencias mecánicas de éstos, no parece que afecte del

mismo modo a este tipo de morteros, ya que las resistencias mecánicas han aumentado.

10. La densidad aparente del mortero fresco aumenta cuanto mayor es la proporción de escoria negra dosificada. Lo mismo ocurre con la densidad aparente del mortero endurecido. La cantidad de aire ocluido en los morteros no se ve afectada por la presencia de escorias blancas o negras como árido. Los resultados obtenidos muestran valores muy similares en los morteros experimentales y en los de referencia.
11. La absorción de agua del mortero a presión atmosférica se incrementa con la presencia de escoria blanca en los morteros. Los fabricados con escoria blanca presentan valores mayores de absorción que los de referencia, lo cual puede ser negativo para la durabilidad del mortero. Además, también se observa que cuanto más cantidad de cal contiene el mortero, los registros de absorción también son mayores.
12. En lo que se refiere a las resistencias mecánicas de los morteros dosificados con escorias, puede obtenerse dos conclusiones. La primera, que tanto la resistencia a flexión y compresión de los morteros se ve mejorada con la incorporación de escorias negra, mientras que la escoria blanca solo mejora utilizando cal aérea. La segunda, que cuanto mayor es la cantidad de cal hidráulica presente en el mortero mejores son las prestaciones mecánicas. No así en el caso de que se dosifique cal aérea, donde se observa un bajo comportamiento mecánico de estas mezclas.
13. Por todo lo referido, se puede considerar que el mortero experimental contemplado, elaborado con cal y escoria, ofrece unos resultados muy prometedores.
14. Sería recomendable estudiar estos morteros con mayor profundidad mediante ensayos alternativos y con otras dosificaciones diferentes, dado el potencial que muestran estos morteros. Finalmente, se recomienda estudiar el empleo de aditivos, así como otras técnicas adecuadas que permitan mejorar las dosificaciones.



CAPITULO VII

**Modificación de morteros mediante
la inclusión de aditivos**

7. MODIFICACIÓN DE MORTEROS MEDIANTE LA INCLUSIÓN DE ADITIVOS

En los capítulos anteriores se ha realizado una caracterización completa, tanto de los morteros bastardos como de los morteros de cal, con diferentes dosificaciones de relación conglomerante/árido. De esta manera se ha podido determinar con detalle sus características, propiedades y prestaciones.

Tras el estudio de las características de los morteros, se seleccionan las mejores mezclas, con el fin de diseñar y prescribir morteros fabricados con áridos siderúrgicos, con propiedades y prestaciones equivalentes a las de los morteros convencionales fabricados con árido natural y técnicamente viables.

7.1. SELECCIÓN Y MODIFICACION DE DOSIFICACIONES

La Tabla 7.1 y Tabla 7.2 muestran la selección realizada entre todas las dosificaciones estudiadas anteriormente:

Selección de los Morteros Bastardos				
100		NA	CAL-NA	X
100		LF	CAL-LF	X
100		EAF	CAL-EAF	X
75	25	NA	BAS-A-NA	X
75	25	LF	BAS-A-LF	V
75	25	EAF	BAS-A-EAF	V
50	50	NA	BAS-B-NA	X
50	50	LF	BAS-B-LF	V
50	50	EAF	BAS-B-EAF	X
25	75	NA	BAS-C-NA	X
25	75	LF	BAS-C-LF	V
25	75	EAF	BAS-C-EAF	X
100		NA	CEM-NA	X
100		LF	CEM-LF	X
100		EAF	CEM-EAF	X

Tabla 7.1 Selección de los morteros bastardos.

Selección de los Morteros de Cal					
20	80		CA20-NA	X	
40		60	CA40-NA	X	
60			40	CA60-NA	X
20	80		CH20-NA	X	
40		60	CH40-NA	X	
60			40	CH60-NA	X
20	80		CA20-LF	✓	
40		60	CA40-LF	X	
60			40	CA60-LF	X
20	80		CH20-LF	X	
40		60	CH40-LF	✓	
60			40	CH60-LF	X
20	80		CA20-EAF	X	
40		60	CA40-EAF	X	
60			40	CA60-EAF	✓
20	80		CH20-EAF	X	
40		60	CH40-EAF	✓	
60			40	CH60-EAF	X

Tabla 7.2 Selección de los morteros de cal.

Para realizar esta selección de las dosificaciones idóneas que van a ser objeto de mejora, se han aplicado los siguientes criterios:

1. En primer lugar, se descartan las dosificaciones que no son objeto del estudio, es decir:
 - Los morteros realizados con árido natural, puesto que el objeto de la Tesis es diseñar morteros alternativos a los tradicionales fabricados con escorias de acería. No obstante, estos morteros seguirán siendo referencia en las investigaciones como “morteros patrón”.
 - De igual modo, debido que el estudio pretende estudiar cómo afecta las diferentes cantidades de cal en los morteros fabricados con áridos siderúrgicos, también se excluirán del estudio los morteros dosificados con el 100% de cemento.
2. En segundo lugar, también se descartan las mezclas cuyos resultados no cumplen las prescripciones normativas, incluso aunque añadiéndoles aditivos para su mejora. Por ejemplo, las dosificaciones de morteros de cal con relación de componentes 1:6.
3. En tercer lugar, también se descartan las dosificaciones que han dado buenos resultados y no precisan ser mejoradas. Tal es el caso de las mezclas de cemento y cal con escoria negra.

Una vez aplicados los criterios de descarte, se procede a seleccionar las siguientes dosificaciones:

1. Los morteros bastardos con escoria blanca deben ser mejorados, ya que los resultados obtenidos en los ensayos preliminares de caracterización son muy bajos.
2. El resto de los morteros dosificados con cal muestran bajos resultados, por lo que se seleccionan las mezclas que pueden ser mejoradas:
 - Los morteros fabricados con escoria blanca muestran mejores resultados cuanto menor cantidad de cal se dosifique.
 - Los morteros fabricados con escoria negra mejoran las propiedades cuanto mayor sea la cantidad de cal dosificada.

Tras esta primera reflexión, el estudio para la mejora de los morteros se orienta a un total de ocho dosificaciones, cuatro mezclas provenientes del estudio de los morteros bastardos (BAS-A-LF, BAS-A-EAF, BAS-B-LF y BAS-C-LF) y cuatro mezclas provenientes de los morteros de cal (CA20-LF, CH40-LF, CA60-EAF y CH40EAF).

Para conseguir una mejora en las características de estas ocho dosificaciones, se han incorporado a las mezclas dos aditivos que mejoren su comportamiento a la adherencia y la resistencia de los morteros.

Por ello, para la mejora de la adherencia de los morteros se utilizará el aditivo MasterSeal 600, de la firma comercial BASF, en una proporción de 1 parte de aditivo respecto de 3 partes de agua de amasado. Para incrementar la resistencia mecánica se dosificará aditivo MasterRheobuild 2100, de la misma firma comercial, en una cantidad del 2% sobre el peso del conglomerante.

Un primer efecto del aditivo MasterSeal 600 es una menor demanda del agua de amasado que se precisa para alcanzar la consistencia plástica de diseño, al ser sustituida ésta por el aditivo líquido.

Respecto a las mejoras introducidas en las propiedades en estado endurecido, se observa un incremento de la adherencia del mortero, ya que es un aditivo especialmente prescrito para ello. Por otra parte, y de forma inducida, también se incrementa la resistencia mecánica de los morteros a compresión, pero no a flexión.

Los morteros fabricados con escoria blanca son menos densos, ligeros, de fácil aplicación y con buena adherencia, por lo que su uso se orienta a utilizarlos como morteros de revestimiento, en paramentos verticales de fábricas de albañilería. Los morteros fabricados con escoria negra son más rugosos y de difícil aplicación, por lo que se descarta su uso en revestimientos.

Por su parte, se observa como el aditivo MasterRheobuild 2100 es un producto líquido produce en el mortero endurecido altas resistencias iniciales y alcanza resistencias finales muy elevadas.

Capítulo VII

Por su buen comportamiento mecánico a compresión, su uso se prescribe como mortero de unión en fábricas de albañilería resistentes, optando por los morteros fabricados con escoria negra y descartando los dosificados con escoria blanca.

En la Tabla 7.3 se muestra un resumen de las propiedades de los morteros, tanto en estado fresco como endurecido.

Resumen de propiedades de los morteros mejorados con aditivos						
	a/c	Densidad M. Fresco (kg/m ³)	Cantidad aire ocluido (%)	Flexión (MPa) 56 días	Compresión (MPa) 56 días	Adherencia (MPa) 56 días
CA20LF	1,85	2.020	4,00	0,656	1,456	0,056
CA20LF+1/3MB600	1,48 ↓	1.497 ↓↓	14,50 ↑↑	0,293 ↓↓	2,532 ↑↑	0,128 ↑↑
CA20LF+2%MR2100	1,84 =	1.733 ↓	5,20 ↑	0,496 ↓	1,583 ↑	0,032 ↓
CH40LF	0,87	1.770	7,10	1,300	2,839	0,040
CH40LF+1/3MB600	0,64 ↓	1.442 ↓	21,50 ↑↑	1,188 =	2,892 =	0,166 ↑↑
CH40LF+2%MR2100	0,84 =	1.789 =	6,60 =	1,594 ↑	5,923 ↑↑	0,082 ↑
BAS-A-LF	2,54	1.608	9,30	0,700	1,362	0,081
BAS-A-LF+1/3MB600	1,82 ↓	1.300 ↓	22,50 ↑↑	2,227 ↑↑	4,334 ↑↑	0,110 ↑
BAS-A-LF+2%MR2100	2,44 =	1.707 =	8,40 =	0,621 ↓	1,594 =	0,090 =
BAS-B-LF	2,45	1.675	11,50	1,000	2,391	0,115
BAS-B-LF+1/3MB600	1,77 ↓	1.324 ↓	25,00 ↑↑	0,750 ↓	3,220 ↑	0,280 ↑↑
BAS-B-LF+2%MR2100	2,37 ↓	1.761 ↑	6,40 ↑	0,070 ↓	2,666 ↑	0,017 ↓
BAS-C-LF	2,38	1.691	11,90	1,501	3,594	0,122
BAS-C-LF+1/3MB600	1,58 ↓	1.349 ↓	27,00 ↑↑	2,300 ↑↑	5,260 ↑↑	0,220 ↑↑
BAS-C-LF+2%MR2100	2,33 ↓	1.771 ↑	7,00 ↓	1,383 ↓	7,738 ↑↑	0,110 =
CA60EAF	0,70	1.641	3,60	0,100	0,947	0,030
CA60EAF+1/3MB600	0,64 ↓	2.778 ↑↑	9,20 ↑	0,120 ↑	3,290 ↑↑	0,080 ↑
CA60EAF+2%MR2100	0,63 ↓	1.745 ↑	5,00 ↑	0,047 =	0,931 =	0,030 =
CH40EAF	0,52	2.290	4,30	1,582	3,293	0,148
CH40EAF+1/3MB600	0,36 ↓	1.873 ↓	16,00 ↑↑	2,810 ↑	6,130 ↑↑	0,260 ↑↑
CH40EAF+2%MR2100	0,46 ↓	2.341 ↑	3,50 ↓	2,834 ↑↑	7,990 ↑↑	0,120 =
BAS-A-EAF	1,15	2.463	4,20	1,995	2,471	0,174
BAS-A-EAF+1/3MB600	0,76 ↓	2.067 ↓	20,00 ↑↑	1,460 =	3,650 ↑	0,270 ↑
BAS-A-EAF+2%MR2100	1,03 ↓	2.578 ↑	5,20 ↑	0,047 ↓↓	2,730 ↑	0,170 =

Tabla 7.3 Resumen de propiedades de los morteros mejorados con aditivos.

Teniendo en cuenta lo expuesto con anterioridad, se seleccionan cuatro de los morteros estudiados, con el fin de caracterizarlos completamente y ser seleccionados como morteros finales de la Tesis Doctoral (Figura 7.1).

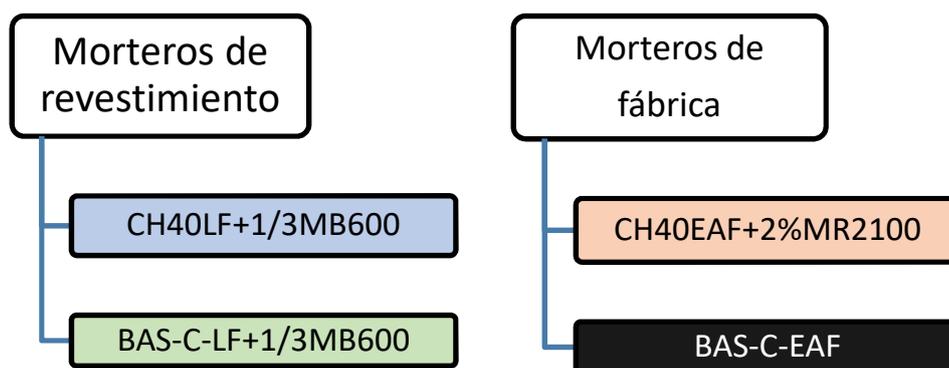


Figura 7.1 Esquema de los morteros definitivos.

De acuerdo con este criterio, se seleccionan las dosificaciones CH40LF+1/3MB600 y CH40EAF+20%MR2100, como mortero de revestimiento y mortero de fábrica, respectivamente.

Se considera que las mezclas que utilizan tan solo cal aérea como conglomerante, aun mejoradas con los aditivos, no alcanzan las propiedades exigidas a este tipo de morteros.

Por ello, la cal aérea se utilizará mezclada con cemento, seleccionando el mortero BAS-C-LF+1/3MB600 como mortero de revestimiento, al ser el que mejores prestaciones presenta, de los morteros bastardos fabricados con escoria blanca.

Además, y con el fin de poder establecer un estudio comparativo, se elige también la mezcla BAS-C-EAF, por su buen comportamiento como mortero de fábrica, sin necesidad de incorporar aditivos.

7.2. CARACTERIZACIÓN DE LOS MORTEROS CON ADITIVOS

Una vez seleccionadas las cuatro dosificaciones finales o “morteros definitivos”, se realiza su caracterización, tanto en estado fresco como endurecido, comparando la mejora de sus prestaciones por la incorporación de los aditivos respecto de los morteros patrón, fabricados tanto con árido natural como con árido siderúrgico.

7.2.1. Estado fresco

Aunque en el proceso de selección de los morteros se han hecho comentarios sobre su comportamiento en estado fresco, en la Tabla 7.4 se muestran las propiedades definitivas, una vez añadidos los aditivos utilizados en el estudio.

Propiedades en estado fresco de los morteros definitivos						
	Designación	a/c	Densidad M. Fresco (kg/m ³)	Cantidad aire ocluido (%)	Trabajabilidad (minutos)	Retención de agua (%)
Morteros Patrón	Morteros patrón con árido natural					
	CH40NA	0,60	1.935	4,00	623	90,88
	BAS-C-NA	1,13	2.060	7,40	173	79,99
	Morteros patrón con áridos siderúrgicos					
	CH40LF	0,87	1.770	7,10	273	90,11
	CH40EAF	0,52	2.290	4,30	333	91,72
BAS-C-LF	2,38	1.691	11,90	175	92,18	
Morteros definitivos	Morteros de revestimiento					
	CH40LF+1/3MB600	0,64	1.442	21,50	108	95,60
	BAS-C-LF+1/3MB600	1,58	1.349	27,00	153	96,37
	Morteros de fábrica					
	CH40EAF+2%MR2100	0,46	2.341	3,50	132	89,82
	BAS-C-EAF	1,02	2.522	6,90	135	84,90

Tabla 7.4 Propiedades en estado fresco de los morteros definitivos.

El Gráfico 7.1 muestra una comparativa de la densidad en estado fresco y de la cantidad de aire ocluido en función a la relación agua/conglomerante en los morteros:

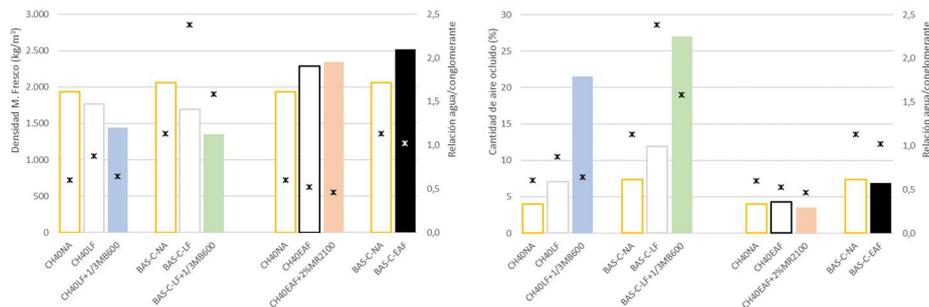


Gráfico 7.1 Comparación de la densidad en estado fresco (kg/m³) (izquierda) y cantidad de aire ocluido (%) (derecha) con la relación agua/conglomerante de los morteros definitivos.

En la mayor parte de los casos, los aditivos actúan modificando la relación agua/conglomerante, para que ésta influya sobre el resto de las propiedades. Las más afectadas son la densidad en estado fresco y la cantidad de aire ocluido, ambas igualmente relacionadas entre sí.

El aditivo MasterSeal 600 se manifiesta como un inclusor de aire, lo que produce una disminución brusca de la densidad. Esta reducción de la densidad de los morteros se puede considerar una mejora al reducir también el peso de los morteros manteniendo su resistencia mecánica, ya que este tipo de mezclas se quieren utilizar como morteros de revestimiento.

Por su parte, la incorporación de MasterRheobuild 2100 produce una reducción del agua de amasado, necesaria para alcanzar la consistencia plástica de diseño. Sin embargo, esta reducción apenas afecta a la densidad en estado fresco y en el aire ocluido.

El Gráfico 7.2 muestra la trabajabilidad o tiempo de utilización que presentan los morteros definitivos y la retención de agua de amasado:

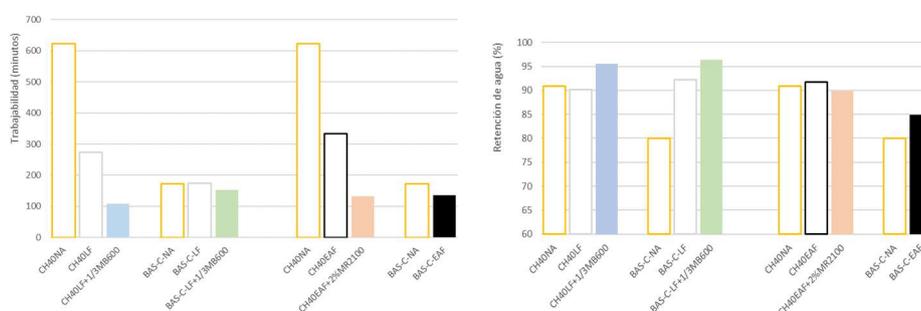


Gráfico 7.2 Trabajabilidad (minutos) (izquierda) y retención de agua (%) (derecha) de los morteros definitivos.

Respecto a la trabajabilidad de los morteros en estado fresco, se observa como ambos aditivos reducen el tiempo de utilización. Además, en el caso de los morteros de cal hidráulica esta reducción supone el 60% del tiempo correspondiente a los morteros fabricados con áridos siderúrgicos y en torno al 80% respecto a los fabricados con árido natural, con tiempos de utilización muy elevados.

De este modo, los cuatro morteros seleccionados tienen un tiempo de utilización entre 100 y 200 minutos, lo cual se considera un tiempo óptimo de puesta en obra.

Por otra parte, MasterSeal 600 incrementa la retención de agua en un 5% más que en los morteros de referencia, mientras que el aditivo MasterRheobuild 2100, aunque con ligeras reducciones, prácticamente no altera la cantidad de agua retenida.

Por todo ello, las características en estado fresco son:

- CH40LF+1/3MB600 es un mortero que precisa una menor cantidad de agua de amasado que la de su mortero patrón, pero con más aire ocluido, lo que confiere una menor densidad en estado fresco. Su tiempo de utilización está próximo a los 100 minutos y retiene en torno al 95% del agua de amasado, lo que

garantiza su correcta hidratación y su posterior fraguado y endurecimiento.

- La mezcla del mortero BAS-C-LF+1/3MB600, también contiene más volumen de aire ocluido y, por consiguiente, menor densidad. Su tiempo de trabajo, en torno a dos horas y media, es similar a la de los morteros de referencia, pero con mayor retención de agua.
- CH40EAF+2%MR2100, como mortero para sentado de fábrica de ladrillo, manifiesta una leve reducción en el agua de amasado y similar cantidad de aire ocluido que, en el mortero fabricado con escoria negra sin aditivos, y sin apenas variar su densidad en estado fresco y tiene en torno a dos horas de tiempo de utilización.
- En el mortero BAS-C-EAF, la cantidad de agua retenida en es similar a la de la mezcla BAS-C-NA, sim embargo, es un mortero mucho más denso, quizás demasiado pesado. Presenta un tiempo de puesta en obra similar a las otras tres dosificaciones definitivas, menor que el de su mortero de referencia, y el que menor porcentaje de agua retiene, tan solo el 84,90%.

7.2.2. Estado endurecido

En este subapartado se estudia la densidad en estado endurecido, la absorción de agua, la capacidad de succión y el coeficiente de permeabilidad al vapor de agua. La Tabla 7.5 recoge los datos obtenidos para los cuatro morteros definitivos seleccionados y sus homólogos de referencia, fabricados tanto con árido natural como siderúrgico.

Propiedades en estado endurecido de los morteros definitivos					
	Designación	Densidad M. Endurecido (kg/m ³)	Absorción de agua (%)	Succión de agua (kg/(m ² ·min ^{0,5}))	Coefficiente de permeabilidad (μ)
Morteros Patrón	Morteros patrón con árido natural				
	CH40NA	1.755	34,94	1,63	16,28
	BAS-C-NA	1.872	12,50	0,65	11,36
	Morteros patrón con áridos siderúrgicos				
	CH40LF	1.369	31,82	1,30	9,75
	CH40EAF	1.916	18,62	1,92	18,55
Morteros definitivos	BAS-C-LF	1.357	29,84	1,67	10,63
	Morteros de revestimiento				
	CH40LF+1/3MB600	986	32,58	0,36	15,20
	BAS-C-LF+1/3MB600	955	41,18	2,88	9,79
	Morteros de fábrica				
	CH40EAF+2%MR2100	1.338	15,74	0,07	13,08
BAS-C-EAF	2.292	11,59	0,26	13,08	

Tabla 7.5 Propiedades en estado endurecido de los morteros definitivos.

El Gráfico 7.3 muestra la densidad en estado fresco y la absorción de agua a presión atmosférica:

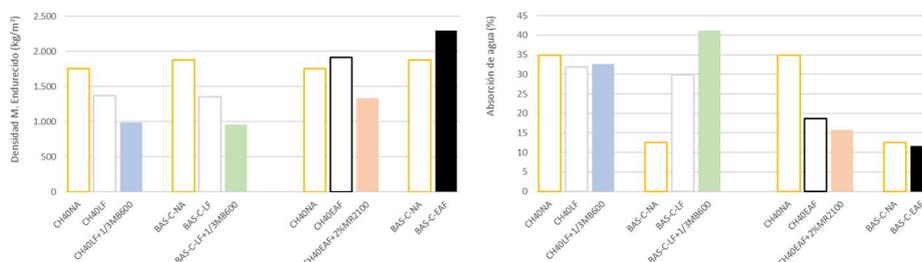


Gráfico 7.3 Densidad en estado endurecido (kg/m^3) (izquierda) y absorción de agua (%) (derecha) de los morteros definitivos.

En el caso de los morteros dosificados con cal hidráulica, esta absorción es semejante a la de los morteros de referencia, pero en los morteros bastardos se incrementa considerablemente, con valores comprendidos en torno al 20-25%.

El aditivo MasterRheobuild 2100 por su parte, confiere morteros con menor absorción de agua a presión atmosférica, con una cantidad similar de poros.

El Gráfico 7.4 muestra la succión de agua y la permeabilidad al vapor de agua que presentan los morteros:

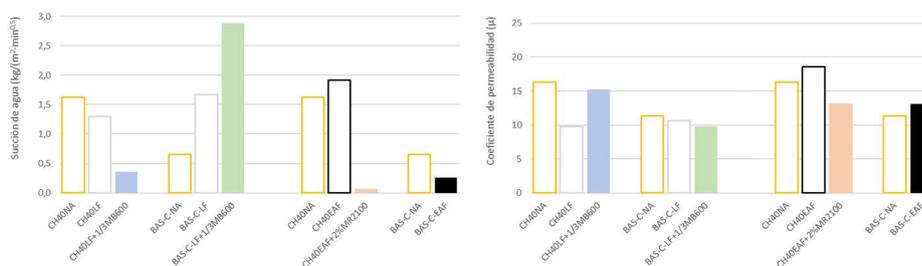


Gráfico 7.4 Succión de agua ($\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0.5})$) (izquierda) y coeficiente de permeabilidad (μ) (derecha) de los morteros definitivos.

Si se analiza la absorción por capilaridad (succión), se observa como el aditivo MasterSeal 600 se comporta diferente en función del tipo de conglomerante utilizado. En el caso de utilizar cal hidráulica confiere morteros con mucha menor capacidad de succión, no así en los morteros dosificados con una mezcla de cal-cemento, donde la succión se incrementa respecto de su mortero de referencia.

En la mayoría de los casos los morteros tienen un coeficiente de permeabilidad entre 10 y 15, valores que se encuentran por debajo de los declarados por los fabricantes, entre 15 y 35, pero aceptables de igual modo.

Por todo ello, las características en estado endurecido son:

- CH40LF+1/3MB600 es un mortero que presenta una baja densidad en estado endurecido ($\pm 1.000 \text{ kg/m}^3$), su porcentaje de absorción de agua a presión atmosférica es muy similar al de su mortero de referencia, pero con un coeficiente de absorción de agua por capilaridad menor.
- En el caso del mortero BAS-C-LF+1/3MB600, es mortero menos denso en comparación con las dosificaciones de referencia, presenta la mayor absorción de agua a presión atmosférica (41,18%) y el mayor coeficiente de absorción por capilaridad ($2,88 \text{ (kg/(m}^2 \cdot \text{min}^{0,5}))$) de todos los morteros seleccionados. Como consecuencia, no es recomendable la utilización de este mortero en ambientes exteriores por el riesgo de absorber grandes cantidades de agua.
- El mortero para fábrica de ladrillo que incorpora el aditivo MasterRheobuild 2100, CH40EAF+2%MR2100, es un material con muy baja absorción de agua, tanto a presión atmosférica como por capilaridad, con un comportamiento prácticamente impermeable al agua, en este caso apto para exteriores. Presenta, además, un coeficiente de permeabilidad al vapor de agua valor considerado como aceptable.
- Y, por último, el mortero BAS-C-EAF, con la máxima densidad de todos los morteros seleccionados ($2,292 \text{ kg/m}^3$), presenta sin embargo el menor porcentaje de absorción a presión atmosférica (11,59%) y muy bajo coeficiente de absorción por capilaridad ($0,26 \text{ (kg/(m}^2 \cdot \text{min}^{0,5}))$), con un coeficiente de permeabilidad al vapor muy similar al del mortero de referencia.

7.2.3. Comportamiento mecánico

Tanto la resistencia mecánica a flexión como a compresión y el comportamiento a la adherencia han sido estudiados anteriormente, ya que han formado parte de los criterios de selección de los morteros definitivos.

No obstante, en este apartado son analizados con más detalle. Los resultados se muestran en la Tabla 7.6:

Modificación de morteros mediante la inclusión de aditivos

Resistencias mecánicas de los morteros definitivos			
	Designación	R. Flexión (MPa)	R. Comp. (MPa)
Morteros Patrón	Morteros patrón con árido natural		
	CH40NA	1,582	4,355
	BAS-C-NA	3,148	10,641
	Morteros patrón con áridos siderúrgicos		
	CH40LF	1,300	2,839
	BAS-C-LF	1,501	3,594
Morteros definitivos	Morteros de revestimiento		
	CH40LF+1/3MB600	1,188	2,892
	BAS-C-LF+1/3MB600	2,300	5,260
	Morteros de fábrica		
	CH40EAF+2%MR2100	2,834	7,990
	BAS-C-EAF	6,855	17,107

Tabla 7.6 Resistencias mecánicas de los morteros definitivos (56 días).

El Gráfico 7.5 muestra la resistencia a compresión y la adherencia de los morteros:

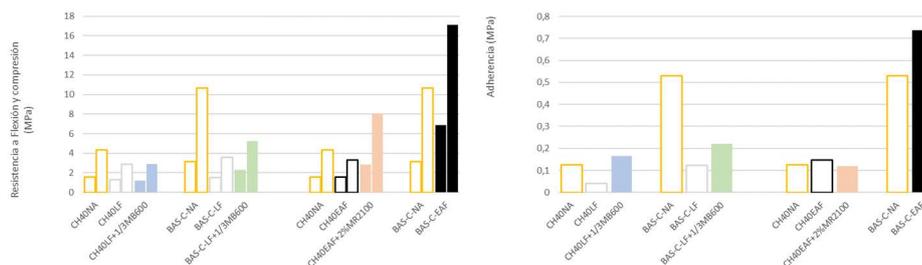


Gráfico 7.5 Resistencia mecánica a flexión y compresión (MPa) (izquierda) y Adherencia (MPa) (derecha) de los morteros definitivos.

Como se puede observar, los morteros para revestimiento CH40LF+1/3MB600 y BAS-C-LF+1/3MB600 no llegan a alcanzar las resistencias mecánicas de los morteros patrón dosificados con árido natural, pero si las de los morteros de referencia fabricados con áridos siderúrgicos. No obstante, al ser morteros diseñados para el revestimiento de paramentos, su capacidad adherente prevalece sobre el resto de las propiedades mecánicas, siempre que supere los requerimientos mínimos establecidos por la normativa.

En el caso del mortero BAS-C-LF+1/3MB600, su adherencia (0,22 MPa) es muy inferior a la de su mortero patrón fabricado con árido natural BAS-C-NA (0,530 MPa).

Por su parte, los morteros fabricados con escoria negra CH40EAF+2%MR2100 y BAS-A-EAF son adecuados para ser prescritos como morteros de albañilería, ya que ambos presentan una resistencia a

compresión muy elevada, por encima de la de sus morteros patrón, debido a la incorporación del aditivo y las propias características de la escoria negra.

Además, el mortero BAS-C-EAF presenta un buen comportamiento a la adhesión, pero su densidad es muy elevada, por lo que se dificulta su manipulación y puesta en obra.

7.2.4. Estudio de la porosidad

El estudio de la porosimetría en los morteros es fundamental para conocer la posible penetración de agentes agresivos al interior del material. Analizar la estructura de los poros en los morteros es importante para comprender el comportamiento físico-mecánico.

Para ello se han utilizado dos técnicas de análisis: la Porosimetría de Intrusión de Mercurio (PIM), para analizar la microporosidad del material, y la Tomografía Axial Computarizada (TAC), para el estudio de su macroporosidad.

El ensayo de Porosimetría de Intrusión de Mercurio (MIP) ha sido realizado por la Unidad de Apoyo a la Investigación del Instituto de Catálisis y Petroleoquímica de Madrid.

En la Tabla 7.7 viene reflejado el diámetro crítico de cada mortero (pico máximo de la curva de distribución) y el valor de la microporosimetría.

Porosimetría de intrusión de mercurio MIP		
	Diámetro crítico (nm)	Microporosimetría (MIP) (%)
CH40LF+1/3MB600	836	45,61
BAS-C-LF+1/3MB600	109.378	47,20
CH40EAF+2%MR2100	620	30,44
BAS-C-EAF	106	24,60

Tabla 7.7 Porosimetría de intrusión de mercurio PIM.

Los resultados pueden expresarse en forma de gráficas de frecuencia. El Gráfico 7.6 muestra el volumen intrusivo acumulado de los morteros ensayados, mientras que en el Gráfico 7.7 se puede observar el pico máximo de la curva de distribución, que indica el diámetro crítico de poro. Con ello se puede conocer el tamaño de poro interconectado que más veces se repite de manera continua²⁴².

²⁴² Salas García, M. Á. (2014). Morteros aligerados con propiedades mejoradas fabricados con residuos de poliamida, Tesis doctoral, Universidad de Burgos, España, ibid.

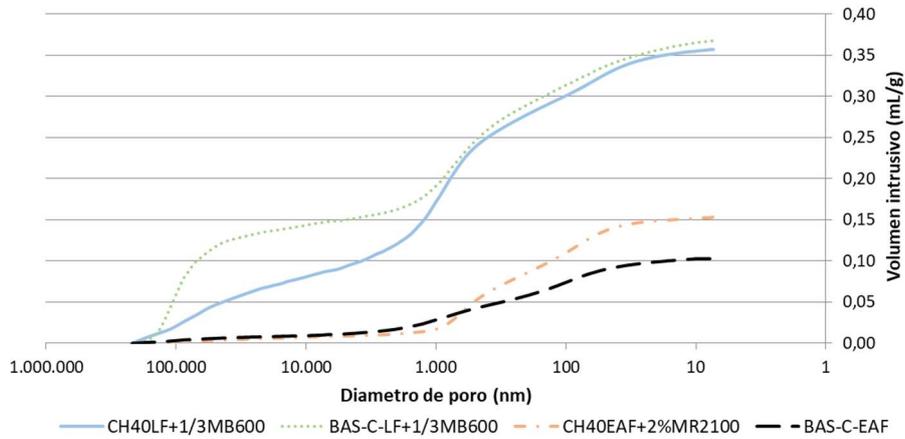


Gráfico 7.6 Volumen intrusivo acumulado.

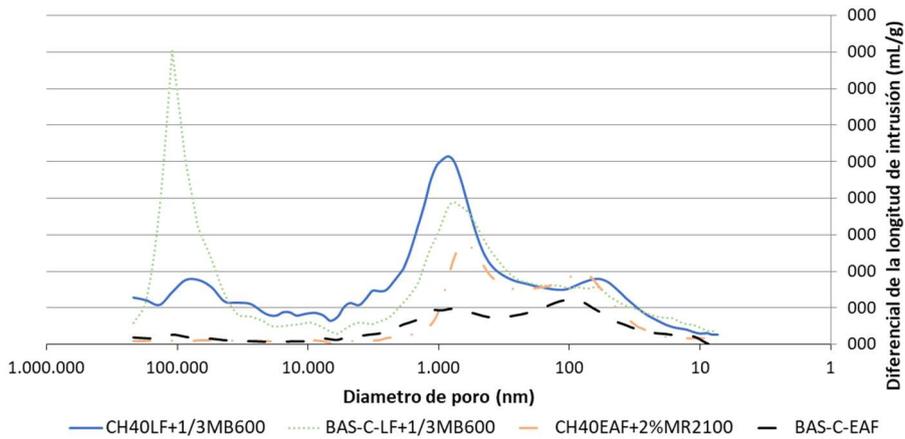


Gráfico 7.7 Curvas derivadas del volumen intrusivo.

El Gráfico 7.8 compara la distribución del volumen total intrusivo de poros, donde los rangos de porosidad son:

- $\emptyset > 10.000$ nm: aire de los poros.
- $50 < \emptyset < 10.000$ nm: capilares grandes.
- $10 < \emptyset < 50$ nm: capilares medios.
- $\emptyset < 10$ nm: capilares pequeños.

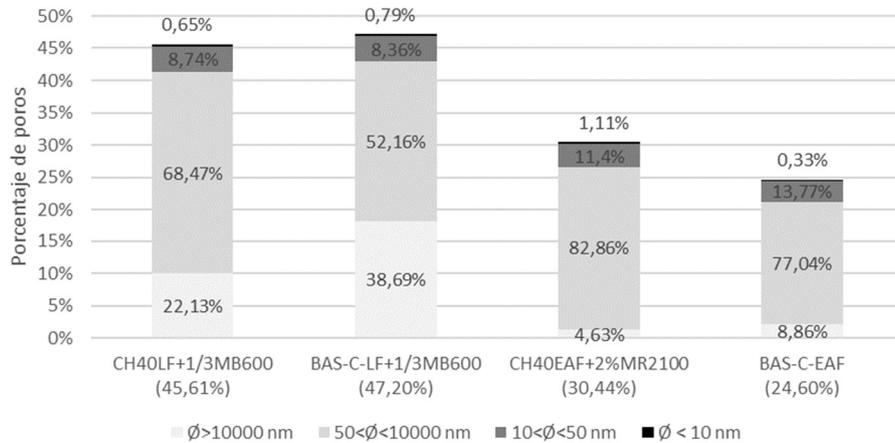


Gráfico 7.8 Distribución del volumen total de poros.

El volumen total de poros que aporta el estudio de la microscopia es análogo al estudio del aire ocluido, es decir, los morteros dosificados con escoria blanca presentan mayor cantidad de poros que las mezclas fabricadas con escoria negra.

Además, el análisis permite comprobar la tipología de poros. En el caso de las mezclas con escoria blanca los morteros presentan una mayor concentración de poros de gran tamaño ($\varnothing > 10.000\text{ nm}$) que las dosificadas con escoria negra. Por el contrario, los morteros con escoria negra presentan un mayor contenido de intersticios capilares de mayor tamaño ($50 < \varnothing < 10.000\text{ nm}$).

Para completar este análisis, se emplea la Tomografía Axial Computarizada (TAC), técnica analítica que permite representar visualmente los poros de tamaño superior a $170\text{ }\mu\text{m}$.

De la Figura 7.2 a la Figura 7.5, se puede observar la distribución de los materiales en una sección axial de las probetas.

En estas imágenes se representa en escala de grises la densidad de los materiales. De este modo en negro viene representado los materiales con menor densidad, los poros de aire, y en blanco los materiales más densos, los granos de escoria.

Para mejorar la visualización, se asignan diferentes colores dependiendo del rango de la tonalidad gris. El tratamiento de los datos se ha realizado con la ayuda del software "Mimics 10.0". De este modo:

- La escoria blanca se representa de un tono azul claro, mientras que la escoria negra se muestra de un tono azul oscuro.
- La cal hidráulica se representa de color gris y la mezcla de cal aérea y cemento de color naranja.
- Los poros se dejan en su color original, el negro.

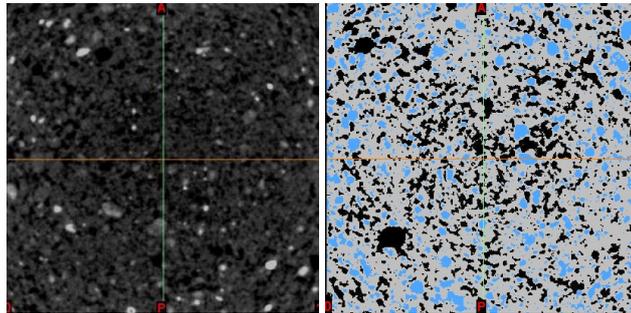


Figura 7.2 Tomografía axial del mortero CH40LF+1/3MB600.

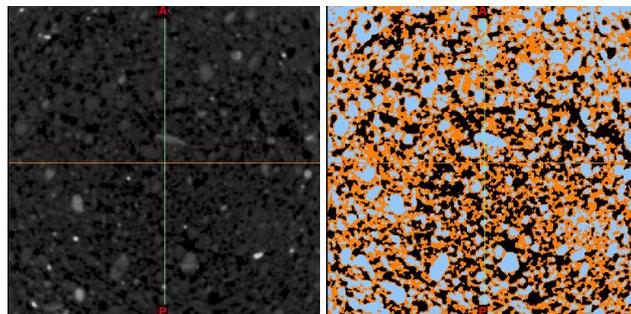


Figura 7.3 Tomografía axial del mortero BAS-C-LF+1/3MB600.

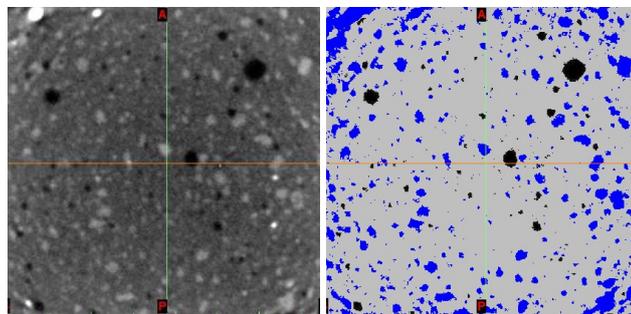


Figura 7.4 Tomografía axial del mortero CH40EAF+2%MR2100.

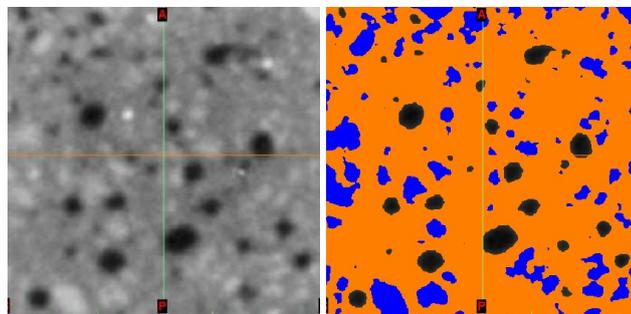


Figura 7.5 Tomografía axial del mortero BAS-C-EAF.

Se puede observar la distribución homogénea de los materiales que componen cada una de las mezclas, y cómo las partículas de escoria quedan bien rodeadas del conglomerante.

De igual modo, se puede ver perfectamente la estructura y distribución de los poros. Los morteros dosificados con escoria blanca (Figura 7.2 y Figura 7.3) presentan más porosidad, con diámetros de poro pequeños.

En el caso de las mezclas con escoria negra (Figura 7.4 y Figura 7.5), se observa como la cantidad de poros presente en el material es inferior a la contenida en los morteros dosificados con escoria blanca. Además, el diámetro medio de los poros que se aprecian en las imágenes es grande y se encuentran más aislados en su distribución.

Este análisis permite explicar comportamientos observados con anterioridad. Los morteros que mayor concentración de red capilar presentan, según el estudio MIP, son CH40EAF+2%MR2100 y BAS-C-EAF, sin embargo, en las imágenes obtenidas en el TAC, se observa que los poros no están interconectados entre sí, circunstancia que puede explicarse por los bajos coeficientes de succión de agua registrados.

En el mortero CH40LF+1/3MB600 el volumen total de poros es superior al registrado en los morteros anteriores. La distribución del tamaño de poros varía, es decir, esta mezcla presenta una concentración de poros de $\varnothing > 10.000$ nm, aproximadamente del 20%. Sin embargo, en las imágenes del TAC se observa como los poros están más interconectados que en las mezclas con escoria negra, lo que puede explicar el ligero incremento del coeficiente de succión.

Por su parte, el mortero BAS-C-LF+1/3MB600 presenta la mayor cantidad de poros $\varnothing > 10.000$ nm, aproximadamente un 40%. Esto provoca que sea el mortero más permeable al vapor de agua, con un $\mu=9$.

7.2.5. Microscopía electrónica de barrido (M.E.B.) y microanálisis por energía dispersa de rayos X

Estos estudios se consideran importantes debido a las reacciones químicas que se producen en la pasta formada por el cemento o la cal con el agua, por lo que resulta conveniente estudiarlas en profundidad para conocer sus propiedades físicas y químicas. Mediante técnicas de microscopía electrónica, se puede conocer los procesos y reacciones que se suceden en la hidratación de los componentes mineralógicos del Clinker de cemento Portland o de los componentes activos de la cal²⁴³.

Las reacciones químicas que se producen en la pasta de los conglomerantes con el agua o la interacción con los áridos han sido

²⁴³ Puertas, M., F. Blanco and S. Palomo (1989). "Microestructura del hormigón-Influencia sobre sus propiedades." Instituto de Ciencias de la construcción Eduardo Torroja. Madrid(398).

profusamente estudiadas mediante esta técnica, que analiza principalmente sus propiedades físicas y químicas^{244,245,246,247}.

A continuación, se muestran varias de las imágenes obtenidas con el microscopio electrónico para los cuatro morteros definitivos, y se realiza un análisis de la microestructura formada tras los procesos de endurecimiento y las reacciones producidas por la diferente combinación de los conglomerantes y los áridos.

De igual forma, también se puede observar que la utilización de aditivos es un factor determinante que influye directamente en el fraguado y endurecimiento de las mezclas.

Las primeras imágenes mostradas (Figura 7.6), corresponden al mortero CH40%LF+1/3MB600:

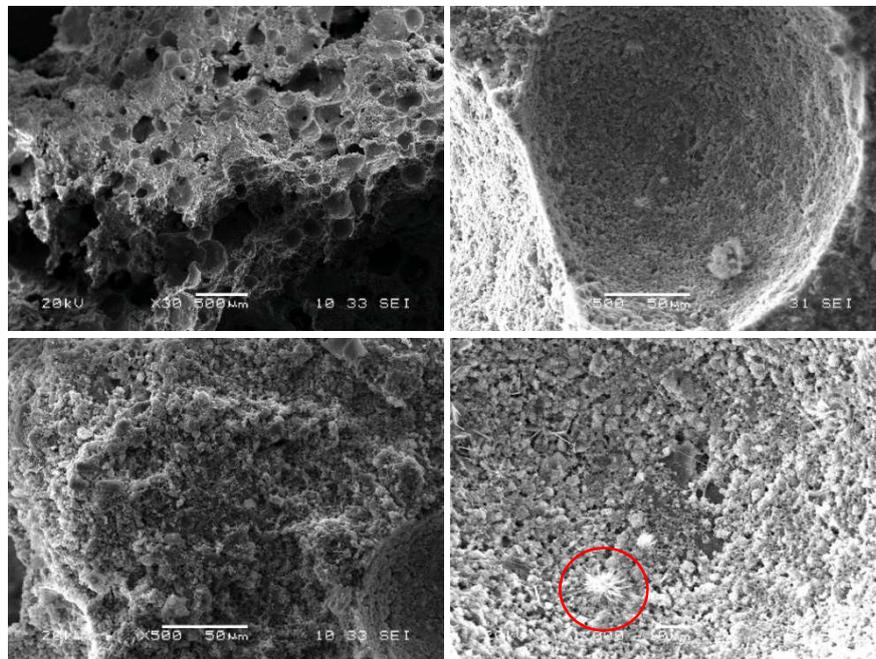


Figura 7.6 Microscopía electrónica de barrido del mortero CH40%LF+1/3MB600.
(Izquierda: Zona A; Derecha: Zona B).

²⁴⁴ Mehta, P. and P. Monteiro (1987). "Effect of aggregate, cement, and mineral admixtures on the microstructure of the transition zone." *MRS Online Proceedings Library Archive* **114**.

²⁴⁵ 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."

²⁴⁶ Pineda, P., M. Robador and J. Perez-Rodriguez (2013). "Characterization and repair measures of the medieval building materials of a Hispanic-Islamic construction." *Construction and Building Materials* **41**: 612-633.

²⁴⁷ Rodríguez, A., S. Gutiérrez-González, M. Prieto, A. Cobo and V. Calderón (2015). "Analysis of long-term corrosion behavior in mortars containing recycled ladle furnace slag using computerized tomography and SEM." *Materials and Corrosion* **66**(3): 199-205.

A pocos aumentos, en la microscopía de la Zona A se puede observar la estructura porosa del material, con presencia de poros de gran tamaño producidos principalmente por la oclusión del aire en el amasado del mortero, además de por la acción del aditivo.

Acercando la visión a la superficie de uno de esos poros (Zona B), se observa con mayor nitidez la microestructura del mortero. En ella se puede ver cómo toda la superficie contiene agujas esparcidas por la misma, formándose rosetas de mayor o menor tamaño en función de la concentración de agujas en una zona concreta. El análisis por energía dispersa de Rayos X de estas rosas muestra una gran cantidad de calcio, carbono y oxígeno. La combinación de estos tres elementos puede indicar que las estructuras se han formado por la reacción del CO_2 con el calcio durante la carbonatación de la cal.

La diferencia entre la reacción de carbonatación de la cal hidráulica y el fraguado del cemento son difíciles de distinguir ya que, como se ha comentado anteriormente, los componentes tanto químicos como mineralógicos de las cales hidráulicas son semejantes a los de los cementos, por lo que las reacciones esperadas en los cuatro morteros (cales hidráulicas y morteros bastardos) pueden ser muy similares. Este es el motivo por el que se justifica que en los morteros dosificados con cal hidráulica se aprecien formaciones de cristales más propias de los componentes del cemento.

Las imágenes mostradas en la Figura 7.7, corresponden al mortero BAS-C-LF+1/3MB600:

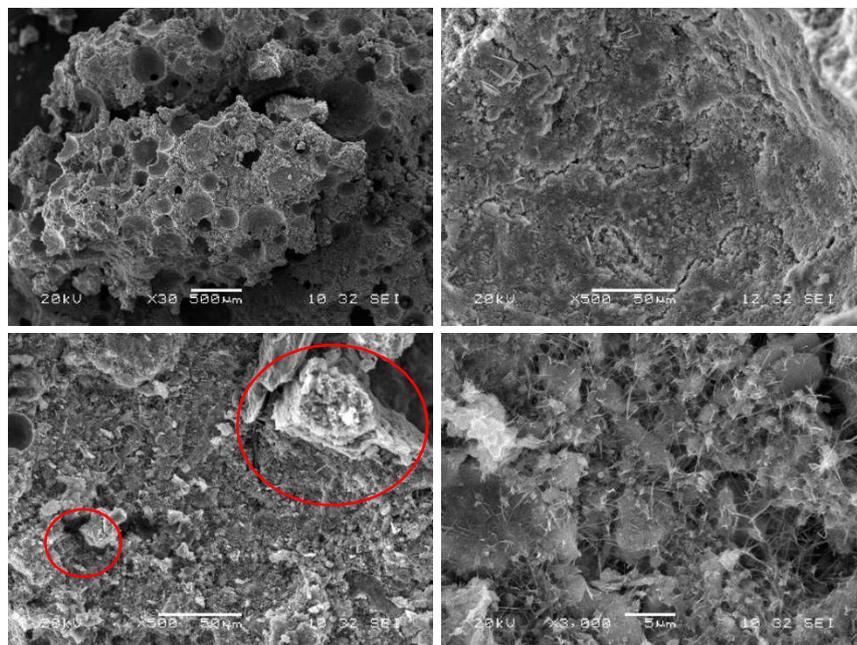


Figura 7.7 Microscopía electrónica de barrido del mortero BAS-C-LF+1/3MB600. (Izquierda: Zona A; Derecha: Zona B).

A diferencia con el mortero anterior, en la microscopia de la Zona A se observan poros de mayor tamaño. Esta diferencia en las dimensiones de los poros se puede apreciar también en el análisis de Porosimetría de Intrusión de Mercurio (página 246), donde se observa cómo el mortero BAS-C-LF+1/3MB600 presenta un mayor porcentaje de huecos ocupados por el aire.

A mayores aumentos se pueden apreciar las formaciones de los granos de escoria blanca, con abundante presencia de magnesio y calcio. Estos gránulos se presentan entrelazados con la pasta de cemento y cal, observándose una menor formación de cristales de calcita.

En la Zona B se observa una pasta de mortero compacta, donde aparecen fisuras producidas por fenómenos de retracción provocadas en el fraguado. En este caso se forman cuerpos en forma de hilos, no tanto agujas, de los que no ha sido posible establecer su composición específica, ya que no forman parte de los componentes mineralógicos de los conglomerantes utilizados, cal o cemento, ni de los áridos, por lo que es de prever que sean formaciones debidas a la combinación de los aditivos utilizados con la portlandita del cemento, ya que estos hilos no se observan en el mortero con cal hidráulica.

Las imágenes mostradas en la Figura 7.8, corresponden al mortero CH40%EAF+2%MR2100:

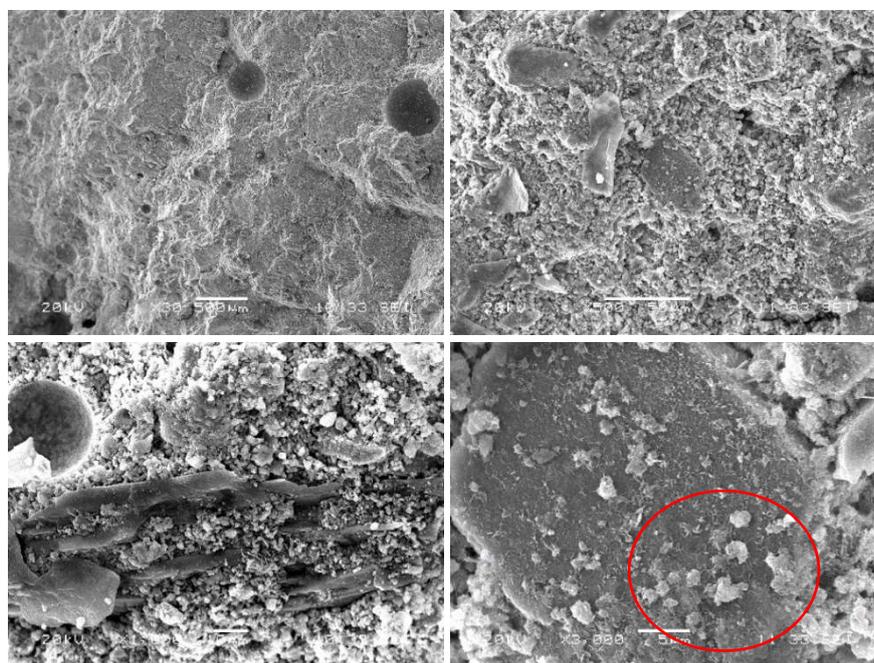


Figura 7.8 Microscopia electrónica de barrido del mortero CH40%EAF+2%MR2100.
(Izquierda: Zona A; Derecha: Zona B).

Se trata de un mortero mucho más compacto, en el que no se observan tantos poros, siendo ocasional la presencia de poros de aire. El resto de los pequeños poros observados pertenecen a la red capilar del material.

De igual modo se observan agregados cristalinos en forma de láminas de cal, lo que en un principio podrían tener su origen en los componentes mineralógicos de la escoria negra.

Se concluye que este tipo de formas cristalizadas de la cal pueden tener su origen en la naturaleza del aditivo utilizado y de su reacción con el resto de los componentes del mortero.

En este mortero existe un cambio de tamaño de los cristales y de la forma en profundidad, ya que la parte externa presenta una fina capa de cristales aciculares, proyectándose hacia el interior formas cristalinas de mayor tamaño.

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.

Por último, la Figura 7.9, muestra en sus imágenes la microscopía obtenida para el mortero BAS-C-EAF:

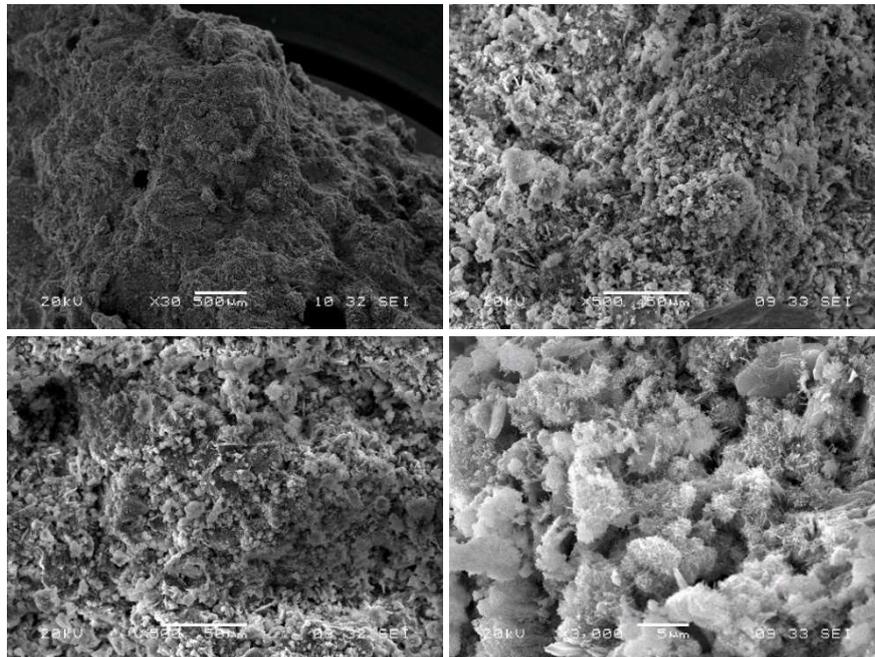


Figura 7.9 Microscopía electrónica de barrido del mortero BAS-C-EAF.
(Izquierda: Zona A; Derecha: Zona B).

La interrelación entre los materiales que componen este mortero es más evidente que en las anteriores mezclas, probablemente por no interferir las propiedades del aditivo (exento en este mortero).

En el análisis por energía dispersa de Rayos X, se observa una presencia generalizada de hierro en la muestra, lo que muestra una dispersión homogénea de la escoria negra en el conjunto del mortero.

La estructura está formada por granos de escoria negra perfectamente recubiertos por la mezcla de ambos conglomerantes. La cristalización de la cal se muestra en las formaciones más angulares con alto contenido en cal, mientras que los granos cubiertos por el cemento presentan una cristalización con mayor presencia de sílice y nódulos anidados de silicatos de calcio hidratados (C-S-H) en una fase más desarrollada, donde las matrices de gel de silicato se agrupan, lo que determina la cohesión del conjunto, siendo difícil distinguir unos agregados de otros²⁴⁸.

7.2.6. Otros ensayos

Se completa la caracterización de los morteros con otros ensayos, como son la conductividad térmica, absorción acústica y la reacción al fuego del mismo.

7.2.6.1. Conductividad térmica

El estudio de la conductividad térmica del mortero endurecido se ha realizado según las prescripciones establecidas en la *Norma UNE-EN 12667*.

Los resultados obtenidos para las diferentes muestras de los morteros definitivos seleccionados se muestran en la Tabla 7.8:

Parámetro conductividad térmica (W/mK)					
	T ₁ (°)	T ₂ (°)	Φ (V)	A (A)	λ (W/mK)
CH40LF+1/3MB600	58	30	39	0,31	0,14
BAS-C-LF+1/3MB600	64	28	40	0,32	0,12
CH40EAF+2%MR2100	65	34	45	0,36	0,18
BAS-C-EAF	65	33	55	0,26	0,26

Tabla 7.8 Conductividad Térmica (W/mK) de los morteros definitivos.

Los cuatro morteros definitivos muestran una conductividad térmica muy baja, lo que les hace idóneos en cualquiera de los casos para utilizarlos como morteros de revestimiento, preservando, por ejemplo, el calor dentro del edificio si se utilizan como morteros de interior.

²⁴⁸ Jawed, I., J. Skalny and J. Young (1983). Structure and Performance of Cements, edited by P. Barnes, Applied science publishers.

Capítulo VII

En el Gráfico 7.9 y Gráfico 7.10 se muestran las temperaturas tanto frías como calientes, obtenidas en los ensayos de las muestras de los morteros seleccionados:

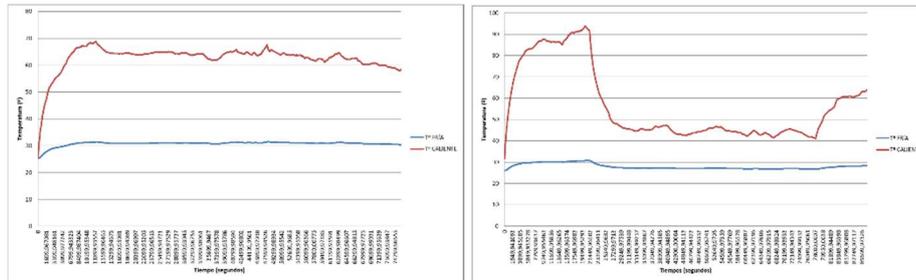


Gráfico 7.9 Gráfico de temperaturas para los morteros CH40LF+1/3MB600 (izquierda) y BAS-C-LF+1/3MB600 (derecha).

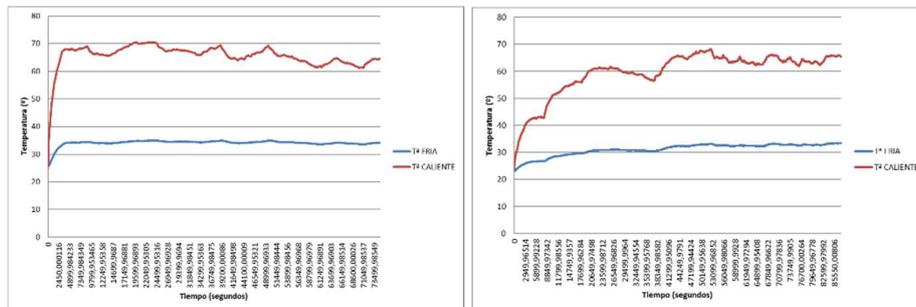


Gráfico 7.10 Gráfico de temperaturas para los morteros CH40EAF+2%MR2100 (izquierda) y BAS-C-EAF (derecha).

Por último, en la Tabla 7.9 se muestra un comparativo de los valores obtenidos para el ensayo mediante la placa caliente con los valores según el método C-Therm TC, donde se puede observar que estos valores muestran una gran dispersión.

Comparativo de la Conductividad Térmica λ (W/mK)		
	Ensayo placa caliente	C-Therm TCI.
CH40LF+1/3MB600	0,14	0,47
BAS-C-LF+1/3MB600	0,12	0,53
CH40EAF+2%MR2100	0,18	0,90
BAS-C-EAF	0,26	1,08

Tabla 7.9 Comparativo de la Conductividad Térmica por los dos métodos de ensayo.

Aun teniendo en cuenta dicha dispersión, se puede concluir que la conductividad térmica es inferior en los morteros que dosifican escoria blanca como árido, siendo en torno a un 50% menor que la de los morteros dosificados con escoria negra.

Esto determina que los morteros de escoria blanca muestran un mejor comportamiento cuando actúan como aislantes térmicos que los morteros de escoria negra.

Teniendo en cuenta que estos morteros van a ser utilizados para revestimiento de paramentos, es una buena característica que considerar en su utilización.

7.2.6.2. Absorción acústica

El ensayo de absorción acústica en tubos de impedancia ha sido realizado en el laboratorio del Departamento de Construcciones Arquitectónicas y Control de la Escuela Técnica Superior de Edificación, de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM).

Son ocho las muestras que se han sometido al ensayo, dos por cada tipo de mortero (BAS-C-LF+1/3MB600, CH40EAF+2%MB2100, CH40LF+1/3% MB600 y BAS-C-EAF). Las muestras son cilíndricas con un diámetro de 3,4925 centímetros y altura de 3 centímetros (Figura 7.10).



Figura 7.10 Muestras ensayadas

Las ocho muestras ensayadas presentan una muy baja absorción acústica. Los resultados obtenidos se expresan a continuación.

Del Gráfico 7.11 al Gráfico 7.14 se presenta el resultado de cada muestra en una tabla con dos columnas. En la primera columna se expone la frecuencia (Hz) y en la segunda columna el valor que se ha obtenido del Coeficiente de Absorción Acústica (adimensional). Por último, se incorpora a cada resultado la gráfica de absorción correspondiente.

Capítulo VII

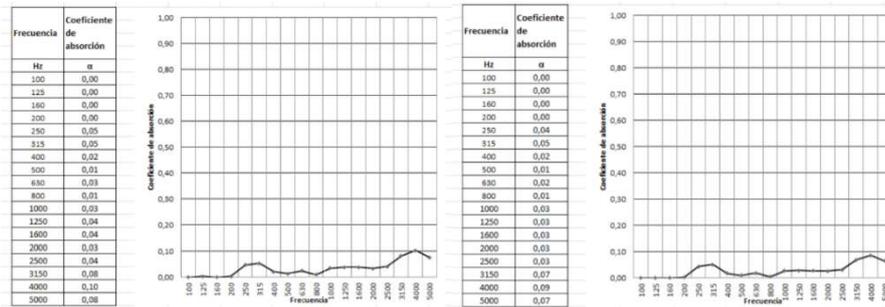


Gráfico 7.11 Coeficiente de absorción para la muestra 1 y 2 del mortero CH40LF+1/3MB600.

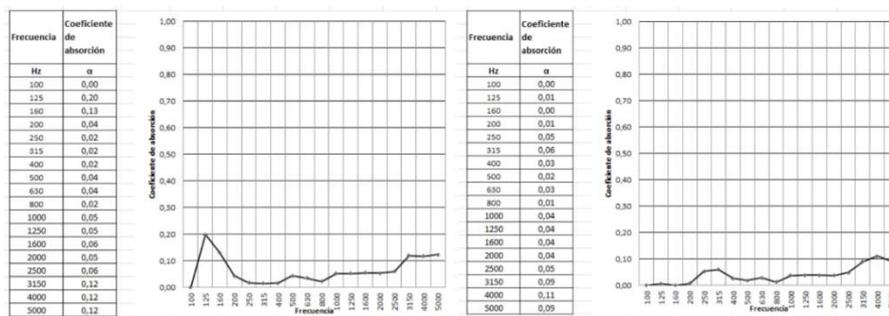


Gráfico 7.12 Coeficiente de absorción para la muestra 1 y 2 del mortero BAS-C-LF+1/3MB600.

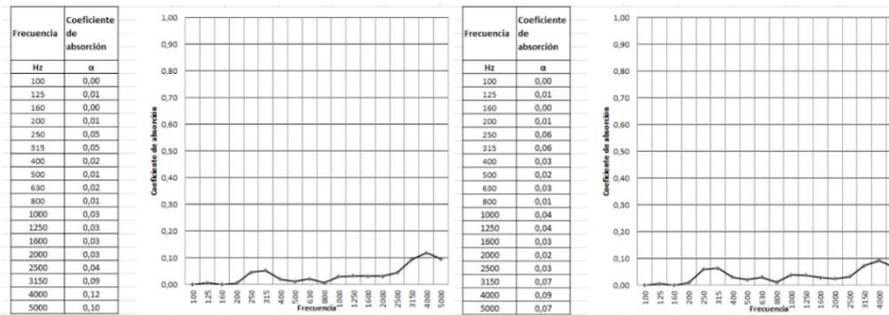


Gráfico 7.13 Coeficiente de absorción para la muestra 1 y 2 del mortero CH40EAF+2%MB2100.

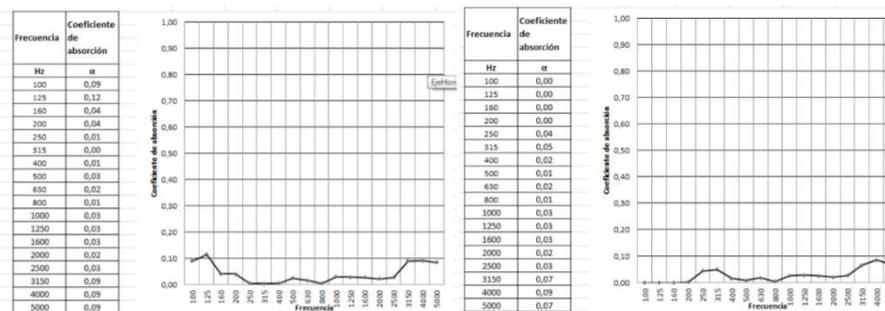


Gráfico 7.14 Coeficiente de absorción para la muestra 1 y 2 del mortero BAS-C-EAF.

Al comparar los resultados entre muestras se obtienen algunas ligeras diferencias entre bandas de frecuencia iguales, sin embargo, todas mantienen coeficientes de absorción similares, en casi todas las bandas centrales de tercio de octava inferiores a 0,2.

Los escasos valores que superan el valor de 0,1 lo hacen mayoritariamente en las altas frecuencias y lo superan por un escaso margen (0,2 como valor máximo alcanzado). Por lo tanto, todas las muestras ensayadas han de ser consideradas acústicamente muy poco absorbentes.

7.2.6.3. Reacción al fuego

Las dosificaciones objeto de estudio contienen aditivos en su dosificación, circunstancia que puede condicionar el comportamiento de las mezclas cuando son sometidas al ensayo de reacción al fuego.

Por ello, para conocer cómo afecta la escoria al comportamiento frente al fuego de los morteros, se selecciona la dosificación BAS-C-EAF, dosificada sin aditivos. De esta forma, un buen resultado de esta dosificación en el ensayo supondría también un buen comportamiento del resto de mezclas con menor o mayor proporción de escoria, dejando al margen la influencia de los aditivos, condicionada por su composición química y por la variedad de alternativas de los distintos fabricantes.

Resultados obtenidos del ensayo de reacción al fuego			
	Incremento Temperatura Horno (°C)	Persistencia de la inflamación (s)	Pérdida de masa (%)
BAS-C-EAF	4,8	-	7,53

Tabla 7.10 Resultados obtenidos del ensayo de reacción al fuego.

Los resultados obtenidos de la realización del ensayo se muestran en la Tabla 7.10. El análisis de los resultados obtenidos, de acuerdo con lo establecido en la norma *UNE-EN 13501 "Clasificación en función del comportamiento frente al fuego de los productos de construcción y elementos para la edificación. Parte 1: Clasificación a partir de datos obtenidos en ensayos de reacción al fuego"*²⁴⁹, permite clasificar este material como Euroclase A1 (No combustible. Sin contribución al fuego.)

Como consecuencia, al presentar un excelente comportamiento frente al fuego la dosificación BAS-C-EAF, cabe esperar resultados equivalentes en el resto de las muestras, ya que, por su composición, los resultados serán similares.

²⁴⁹ AENOR (2010). "UNE-EN 13501-1 Clasificación en función del comportamiento frente al fuego de los productos de construcción y elementos para la edificación. Parte 1: Clasificación a partir de datos obtenidos en ensayos de reacción al fuego". Madrid, Aenor.

Respecto a los morteros de cal, hay que tener en cuenta, que el desprendimiento de la cal viva a partir del hidróxido cálcico de hidratación de silicatos se produce a una temperatura ($400\text{ °C} < T^a < 600\text{ °C}$), mucho menor la temperatura de destrucción del cemento ($950\text{ °C} < T^a < 1.200\text{ °C}$), cuando el mortero carece de resistencia residual alguna. Por ello, cabe predecir que los morteros de cal hidráulica pueden presentar algunas variaciones, pero sin trascendencia para cumplir con los requerimientos de los materiales clasificados como Euroclase A1, puesto que siguen sin ser combustibles y no contribuyen a la propagación del fuego.

7.3. DURABILIDAD

La “*durabilidad de los elementos constructivos*” se entiende como la capacidad de mantener en servicio y con seguridad una estructura o una unidad constructiva durante su vida útil. Es un concepto que surge en los años 80 del siglo pasado y en los morteros y hormigones la durabilidad de los mismos depende de la calidad del material, de la calidad de la construcción y de las condiciones ambientales de exposición y uso²⁵⁰.

La durabilidad del mortero está condicionada por la permeabilidad del material y la agresividad del medio ambiente en el que está dispuesto. Los materiales, la dosificación, la interacción entre componentes, el lugar de emplazamiento y las técnicas de curado, determinan el periodo de vida útil de un mortero. La presencia de agua en el mortero y la forma en ésta se mueve por la red capilar es determinante para la entrada y el transporte de elementos agresivos externos. Por ello, cuanto menor sea la red capilar de poros del material, mayor dificultad ofrecerá para el transporte de los potenciales agentes nocivos, evitando las agresiones a la interfase entre los áridos y la pasta de cemento, la zona más débil del mortero^{251,252,253}.

Con el fin de valorar como afecta el paso del tiempo a los morteros fabricados con escorias cuando se exponen a ambientes agresivos externos, se someten a ensayos de envejecimiento acelerado, que simulan ambientes reales en condiciones de laboratorio.

Con el propósito de estudiar el comportamiento de los cuatro morteros definitivos seleccionados y poder comparar la evolución de sus prestaciones respecto de los morteros convencionales fabricados con

²⁵⁰ Chidiac, S. E. (2009). "Sustainability of civil engineering structures—Durability of concrete." Cement and Concrete Composites **31**(8): 513-514.

²⁵¹ Aitcin, P. (1994). "Durable concrete—current practice and future trends." Special Publication **144**: 85-104.

²⁵² Courard, L., A. Darimont, M. Schouterden, F. Ferauche, X. Willem and R. Degeimbre (2003). "Durability of mortars modified with metakaolin." Cement and Concrete Research **33**(9): 1473-1479.

²⁵³ Song, H.-W., C.-H. Lee and K. Y. Ann (2008). "Factors influencing chloride transport in concrete structures exposed to marine environments." Cement and Concrete Composites **30**(2): 113-121.

áridos naturales y escorias, se han moldeado dieciocho probetas de cada tipo de mortero seleccionado. De las dieciocho probetas, seis de ellas se han reservado como patrones de referencia, utilizando cada pareja para cada dos de los ensayos.

7.3.1. Heladicidad

Para los morteros ubicados en regiones frías y zonas de alta montaña, como por ejemplo en España, en las zonas localizadas en el tercio norte, los ciclos periódicos de hielo-deshielo son una de las principales causas de degradación de morteros, lo que puede producir la aparición de fisuras y desconchados²⁵⁴.

Autores como Powers y Penttala^{255,256,257}, han descrito las dos principales teorías sobre el comportamiento de los morteros y hormigones frente a fenómenos de hielo-deshielo. En primer lugar, la Teoría de la Presión Hidráulica, que sigue en vigor en condiciones de saturación, sugiere que el agua se mueve desde el espacio capilar donde se formó hielo hacia otras zonas de la matriz.

Sin embargo, Powers dedujo que el agua sigue la dirección contraria, desde los poros de menor tamaño a los poros cercanos donde se formó hielo. Por ello, los materiales porosos poseen un grado de saturación crítico que, tras sucesivos ciclos hielo-deshielo, da lugar a su deterioro.

Para ello, se realiza el ensayo y se comprueba las variaciones producidas en el volumen aparente de la probeta, la diferencia de resistencias mecánicas, antes y después del ensayo, respecto de las probetas de mortero de referencia.

7.3.1.1. Variación del volumen aparente

En la Tabla 7.11 se muestra el volumen aparente obtenido para las muestras de mortero antes y después de los ciclos hielo-deshielo, así como la variación unitaria y el porcentaje de la misma.

²⁵⁴ Cao, J. and D. Chung (2002). "Damage evolution during freeze–thaw cycling of cement mortar, studied by electrical resistivity measurement." *Cement and Concrete Research* **32**(10): 1657-1661.

²⁵⁵ Powers, T. C. (1945). A working hypothesis for further studies of frost resistance of concrete. Journal Proceedings.

²⁵⁶ Powers, T. C. and R. Helmuth (1953). Theory of volume changes in hardened portland-cement paste during freezing. Highway research board proceedings.

²⁵⁷ Penttala, V. (2006). "Surface and internal deterioration of concrete due to saline and non-saline freeze–thaw loads." *Cement and Concrete Research* **36**(5): 921-928.

Ensayo de Heladicidad - Variación de volumen					
	Designación	Volumen aparente (dm ³)		Variación	
		Inicial	Final	Unitaria	Porcentual (%)
Morteros Patrón	Morteros patrón con árido natural				
	CH40NA	0,259	0,158	-0,102	-39,20
	BAS-C-NA	0,260	0,254	-0,006	-2,06
	Morteros patrón con áridos siderúrgicos				
	CH40LF	0,260	0,250	-0,014	-5,24
	CH40EAF	0,265	0,154	-0,111	-41,84
	BAS-C-LF	0,260	0,240	-0,200	-7,76
Morteros definitivos	Morteros de revestimiento				
	CH40LF+1/3MB600	0,258	0,257	-0,001	-0,35
	BAS-C-LF+1/3MB600	0,259	0,192	-0,067	-25,80
	Morteros de fábrica				
	CH40EAF+2%MR2100	0,267	0,220	-0,480	-17,84
	BAS-C-EAF	0,261	0,241	-0,020	-7,70

Tabla 7.11 Variación del volumen aparente tras el ensayo de heladicidad de los morteros definitivos.

El Gráfico 7.15 muestra el comparativo del volumen aparente tras el ensayo de heladicidad de los morteros definitivos:

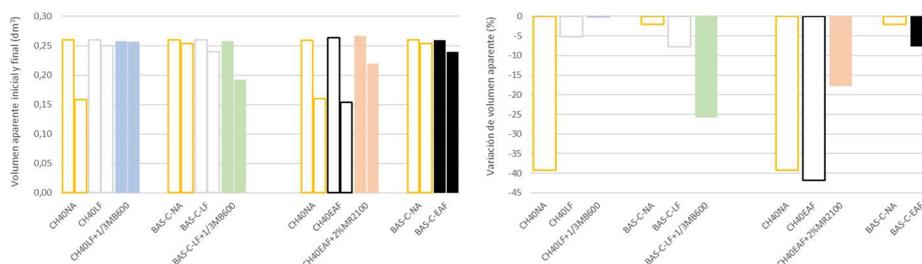


Gráfico 7.15 Comparativo del volumen aparente tras el ensayo de heladicidad de los morteros definitivos. Volumen aparente inicial y final (dm³) (izquierda) y variación de volumen aparente (%) (derecha).

Los morteros se pueden clasificar como “heladizos” si, una vez realizado el ensayo, la pérdida o variación de peso es mayor del 3%. Tan solo la dosificación CH40LF+1/3MB600, puede considerarse como no heladiza.

Se considera positivo el comportamiento de la dosificación CH40EAF+2%MR2100 que, aunque con la incorporación del aditivo no mejora su comportamiento a la heladicidad, reduce el porcentaje de volumen perdido en un 50%.

Las muestras de los morteros CH40NA, CH40EAF y BAS-C-LF+1/3MB600, presentan una pérdida del volumen muy elevada. Las tres muestras son las que presentan un mayor coeficiente de succión de todas las ensayas, circunstancia que justifica la entrada de gran cantidad de agua en su interior. Una vez dentro del mortero, el agua succionada ocupa el volumen de poros, desplazando el aire contenido en su interior y

provocando tensiones internas en la pared de los poros, con el riesgo de fisuración y rotura del material y la pérdida de cohesión.

7.3.1.2. Variación de las resistencias mecánicas

Debido a los bajos registros obtenidos en el ensayo de flexión y con el fin de simplificar el estudio, sólo se analiza la resistencia a compresión. Los datos obtenidos para la resistencia a compresión se muestran en la Tabla 7.8.

Ensayo de Heladicidad - Resistencia a Compresión				
Designación	Resistencia a compresión (MPa)		Variación (%)	
	Referencia	Ensayo		
Morteros patrón con árido natural				
Morteros Patrón	CH40NA	-	-	-
	BAS-C-NA	8,966	10,375	17,72
Morteros patrón con áridos siderúrgicos				
Morteros Patrón	CH40LF	3,434	4,338	26,30
	CH40EAF	-	-	-
	BAS-C-LF	3,422	3,884	13,52
Morteros de revestimiento				
Morteros definitivos	CH40LF+1/3MB600	3,334	3,703	10,75
	BAS-C-LF+1/3MB600	-	-	-
Morteros de fábrica				
Morteros definitivos	CH40EAF+2%MR2100	7,109	9,263	28,14
	BAS-C-EAF	18,900	21,578	14,17

Tabla 7.12 Variación de la Resistencia a Compresión tras el ensayo de heladicidad de los morteros definitivos.

El Gráfico 7.16 muestra el comparativo de la resistencia a compresión tras el ensayo:

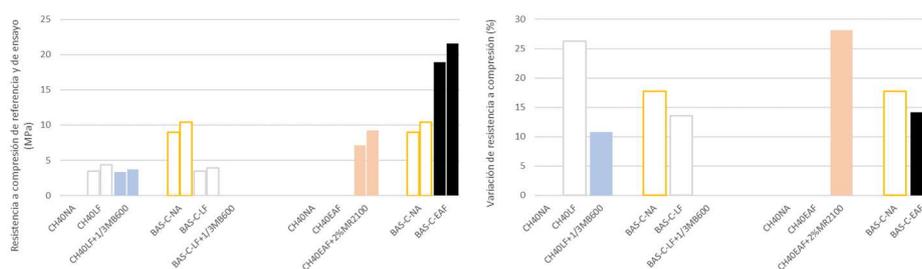


Gráfico 7.16 Comparativo de la resistencia a compresión tras el ensayo de heladicidad de los morteros definitivos. Resistencia a compresión de referencia y de ensayo (MPa) (izquierda) y variación de la resistencia a compresión (%) (derecha).

Las dosificaciones no muestran pérdidas de la resistencia a compresión, sino todo lo contrario, ya que ganan resistencia tras someterse a los ciclos de hielo-deshielo.

Es probable que el ambiente húmedo del proceso de hielo y deshielo de las probetas favorezcan la hidratación de los componentes hidráulicos de la escoria (SC₂ y SC₃). Por otra parte, el carácter puzolánico de las escorias permite fijar la cal del conglomerante y formar componentes hidráulicos. En ambos casos se contribuye al incremento de los componentes mineralógicos que aportan resistencia a las mezclas.

7.3.1.3. Inspección visual

Tras la finalización de los ciclos de hielo-deshielo, se realiza la inspección visual de las probetas y se comparan con las probetas de referencia que no han sido sometidas al ensayo (Figura 7.11 - Figura 7.14).



Figura 7.11 Inspección visual en el ensayo de heladicidad de los morteros patrón con árido natural (NA). (Parte superior: antes de ensayo; Parte inferior: después del ensayo).



Figura 7.12 Inspección visual en el ensayo de heladicidad de los morteros patrón con áridos siderúrgicos (LF y EAF). (Parte superior: antes de ensayo; Parte inferior: después del ensayo).



Figura 7.13 Inspección visual en el ensayo de heladicidad de los morteros definitivos de revestimiento. (Parte superior: antes de ensayo; Parte inferior: después del ensayo).



Figura 7.14 Inspección visual en el ensayo de heladicidad de los morteros definitivos de fábrica. (Parte superior: antes de ensayo; Parte inferior: después del ensayo).

De acuerdo con los criterios normativos se procede a la catalogación de los morteros:

Los morteros CH40NA, CH40EAF y BAS-C-LF+1/3MB600 presentan un Grado 4, debido a la desintegración casi total de la probeta. Por el contrario, las probetas correspondientes a la mezcla BAS-C-NA, CH40LF+1/3MB600 y BAS-C-EAF no han presentado signos de deterioro, clasificándola como de Grado 0.

Los morteros fabricados con cal hidráulica y escoria blanca (CH40%LF y BAS-C-LF) presentan menores signos de desintegración que sus equivalentes dosificados con árido natural, observando pérdida de material en sus vértices y la aparición de grietas superficiales, por lo que se considera de Grado 3.

En el caso del mortero de cal hidráulica y escoria negra con aditivo (CH40EAF+2%MR2100), se observa como el deterioro también menor, que

es sus morteros de referencia, pero aun así muestra grandes desprendimientos, catalogándolo como Grado 3.

En conclusión, los morteros estudiados en esta Tesis no presentan buen comportamiento frente a los ciclos de hielo-deshielo, considerándose todos ellos como morteros heladizos.

7.3.2. Choque térmico

La alternancia de contracciones y dilataciones del mortero con los ciclos de humedad-sequedad, puede asemejarse a la alternancia sufrida por la piedra en su estructura, afectando en todo caso a su durabilidad y en el peor de los casos a su integridad estructural²⁵⁸.

Son abundantes los estudios precedentes que advierten sobre los daños sufridos por dicho mecanismo en los materiales pétreos, ya que la problemática de la durabilidad de estos materiales ha sido objeto de estudio en numerosas ocasiones. Desde los primeros estudios de Lavalley y Taber^{259,260}, pasando por estudios tan singulares como los de Rodríguez Navarro, donde estudia como el material pétreo se descompone al ser sumergido en agua por la expansión sufrida por los componentes arcillosos^{261,262}, o estudios más contemporáneos, pero si destacables por la similitud con esta investigación, como los aportados por Wendler que estudia el número de ciclos que son necesarios para la degradación del material^{263,264}.

Centrándose en particular en el caso del mortero endurecido, hay que tener en cuenta dos circunstancias que pueden producir un deterioro diferente:

La primera de ellas son las contracciones y dilataciones que puede sufrir el mortero por las variaciones de humedad que influyen directamente en la

²⁵⁸ González, I. J. (2008). Efecto de los ciclos de humedad-sequedad en el deterioro de rocas ornamentales que contienen minerales de la arcilla, Editorial de la Universidad de Granada.

²⁵⁹ Lavalley, J. (1853). "Recherches sur la formation lente des cristaux à la température ordinaire." Compte Rend. Acad. Sci.(Paris) **36**: 493-495.

²⁶⁰ Taber, S. (1916). "The growth of crystals under external pressure." American Journal of Science(246): 532-556.

²⁶¹ Rodríguez-Navarro, C., E. Sebastian, E. Doehne and W. S. Ginell (1998). "The role of sepiolite-palygorskite in the decay of ancient Egyptian limestone sculptures." Clays and clay minerals **46**(4): 414-422.

²⁶² Landforms, E. S. P. (1999). "Salt weathering: influence of evaporation rate, supersaturation and crystallization pattern." Earth Surf. Process. Landforms **24**: 191-209.

²⁶³ Wendler, E., A. Charola and B. Fitzner (1996). Easter Island tuff: Laboratory studies for its consolidation. 8th international congress on deterioration and conservation of stone. Moller Druck und Verlag, Berlin.

²⁶⁴ Wendler, E. (1997). "New materials and approaches for the conservation of stone." Environmental Sciences Research Reportes **20**: 181-198.

retracción. La segunda, la retracción de carbonatación de la portlandita, que puede producir expansividad, produciendo deterioro del material.

Además, en el caso específico que atañe al estudio de esta Tesis, al ser morteros fabricados con áridos siderúrgicos, este ensayo resulta de mayor interés, puesto que este tipo de áridos podrían presentar un potencial expansivo asociado a su contenido de óxido de magnesio (periclusa) y cal libre.

7.3.2.1. Variación del peso seco

En la Tabla 7.13 se muestra el peso seco de las probetas antes y después del ensayo, y su variación después de los 20 ciclos de humedad-sequedad.

Ensayo de choque térmico - Variación de peso					
Designación	Peso seco (gr.)		Variación		Porcentual (%)
	Inicial	Final	Unitaria		
Morteros patrón con árido natural					
Morteros Patrón	CH40NA	432,10	431,40	-0,70	-0,16
	BAS-C-NA	488,90	486,50	-2,40	-0,49
Morteros patrón con áridos siderúrgicos					
Morteros Patrón	CH40LF	364,40	360,65	-3,45	-0,95
	CH40EAF	516,55	516,20	-0,35	-0,07
	BAS-C-LF	363,50	357,25	-6,25	-1,72
Morteros de revestimiento					
Morteros definitivos	CH40LF+1/3MB600	290,25	286,90	-3,55	-1,22
	BAS-C-LF+1/3MB600	274,55	268,25	-6,30	-2,29
Morteros de fábrica					
Morteros definitivos	CH40EAF+2%MR2100	552,05	551,60	-0,45	-0,08
	BAS-C-EAF	637,45	631,65	-6,10	-0,96

Tabla 7.13 Variación del peso seco tras el ensayo de choque térmico de los morteros definitivos.

El Gráfico 7.17 muestra el comparativo del peso seco antes y después del ensayo de choque térmico:

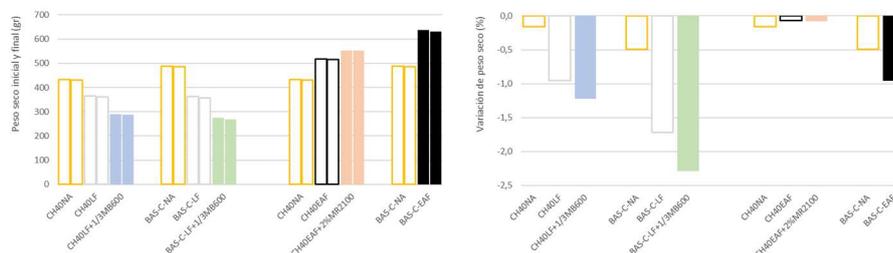


Gráfico 7.17 Comparativo del peso seco tras el ensayo de choque térmico de los morteros definitivos. Peso seco inicial y final (gr.) (izquierda) y variación de peso seco (%) (derecha).

Como se puede observar, las muestras manifiestan un buen comportamiento, sin apenas variaciones en su peso, siendo el mortero BAS-C-LF+1/3MB600 el que muestra mayor pérdida, superando el 2%, seguida de su mortero sin aditivo (BAS-C-LF), con una pérdida superior al 1,5%. En el resto de los morteros las pérdidas no llegan al 1% o son inapreciables.

Sin embargo, hay que destacar el buen comportamiento que presentan los morteros confeccionados con cal hidráulica y escoria negra, los cuales presentan una variación mínima (tan solo en torno al 0,1%).

7.3.2.2. Variación de las resistencias mecánicas

En la Tabla 7.14 se muestra la variación de resistencia a compresión producida en las probetas sometidas a los 20 ciclos de humedad-sequedad respecto de las probetas de referencia.

Ensayo de choque térmico - Resistencia a compresión				
	Designación	Resistencia a compresión (MPa)		Variación (%)
		Referencia	Ensayo	
Morteros Patrón	Morteros patrón con árido natural			
	CH40NA	5,078	14,003	175,75
	BAS-C-NA	8,966	11,444	27,64
	Morteros patrón con áridos siderúrgicos			
	CH40LF	3,913	3,434	-12,24
	CH40EAF	7,038	13,106	86,21
Morteros definitivos	BAS-C-LF	3,422	2,891	-15,53
	Morteros de revestimiento			
	CH40LF+1/3MB600	3,334	2,878	-13,93
	BAS-C-LF+1/3MB600	2,941	2,175	-26,04
	Morteros de fábrica			
	CH40EAF+2%MR2100	9,263	29,722	120,80
BAS-C-EAF	18,900	19,072	0,91	

Tabla 7.14 Variación de la Resistencia a Compresión tras el ensayo de choque térmico de los morteros definitivos.

Los valores obtenidos muestran una clara diferencia en el comportamiento de los morteros dosificados con escorias:

- Los morteros fabricados con escoria blanca soportan peor los ciclos de humedad-sequedad, lo que afecta a su capacidad resistente.
- Por el contrario, los morteros dosificados con escoria negra mejoran sus prestaciones mecánicas a compresión.

El Gráfico 7.18 muestra el comparativo de la resistencia a compresión tras el ensayo:

Modificación de morteros mediante la inclusión de aditivos

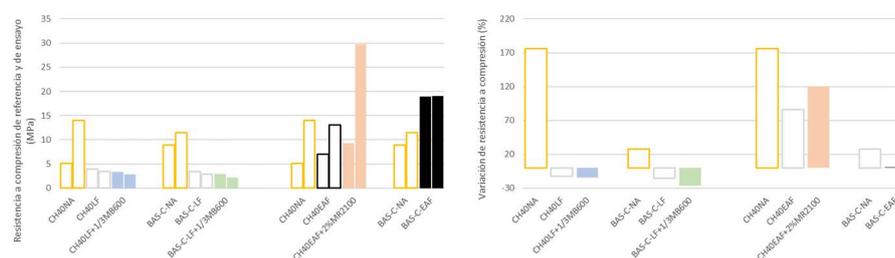


Gráfico 7.18 Comparativo de la resistencia a compresión tras el ensayo de choque térmico de los morteros definitivos. Resistencia a compresión de referencia y de ensayo (MPa) (izquierda) y variación de la resistencia a compresión (%) (derecha).

Cabe destacar el buen comportamiento de los morteros que incorporan en su composición escoria negra y cal hidráulica, ya que son lo que más incrementan su resistencia mecánica a compresión tras el ensayo, circunstancia que se evidencia también por ser las que menos masa pierden.

7.3.2.3. Inspección visual

La norma que fundamenta este ensayo indica que se debe realizar una inspección visual de las probetas ensayadas, comparando su aspecto con las probetas patrón de referencia.

Para ello, se comprueba la presencia de posibles oxidaciones, cambio de tonalidad de color, aparición de manchas, agrietamientos, fisuras o exfoliaciones.

De la Figura 7.15 a la Figura 7.18 se puede observar el aspecto que presentan las probetas después del ensayo, respecto de sus correspondientes de referencia.

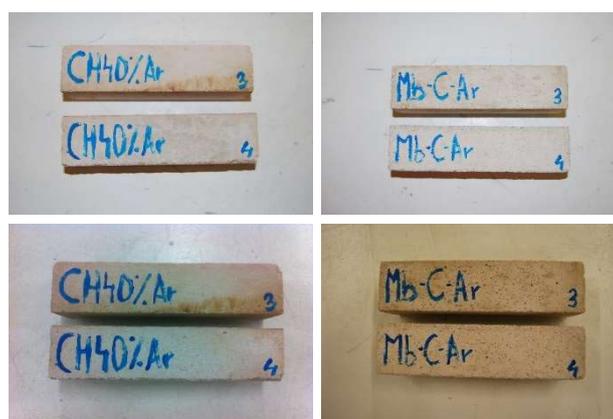


Figura 7.15 Inspección visual en el ensayo de choque térmico de los morteros patrón con árido natural (NA). (Parte superior: antes de ensayo; Parte inferior: después del ensayo).



Figura 7.16 Inspección visual en el ensayo de choque térmico de los morteros patrón con áridos siderúrgicos (Parte superior: antes de ensayo; Parte inferior: después del ensayo).



Figura 7.17 Inspección visual en el ensayo de choque térmico de los morteros definitivos de revestimiento. (Parte superior: antes de ensayo; Parte inferior: después del ensayo).



Figura 7.18 Inspección visual en el ensayo de choque térmico de los morteros definitivos de fábrica. (Parte superior: antes de ensayo; Parte inferior: después del ensayo).

No se observan alteraciones significativas en las de las probetas de árido natural y escoria negra que muestren deterioros o degradación. Sin embargo, aparecen grietas en el caso de los morteros dosificados con escoria blanca sin aditivos (CH40LF y BAS-C-LF).

Tras la inspección visual puede dar la sensación de que los morteros de escoria blanca que incorporan el aditivo MasterSeal 600 no se han alterado. No obstante, se comprueba que estas muestras perdieron peso y capacidad resistente tras el ensayo, por lo que su comportamiento tampoco es satisfactorio.

Sería conveniente estudiar en investigaciones futuras cuál es la causa que motiva la aparición de estas grietas, ya que no parece ser un hecho aislado. Hay que recordar que los morteros dosificados con escoria blanca son los que peores registros de resistencia mecánica muestran conforme pasan los días de curado y, además, estas grietas han podido ser apreciadas en el microscopio en la muestra BAS-C-LF+1/3MB600 (Figura 7.7).

7.3.3. Carbonatación acelerada

La carbonatación es un fenómeno natural que afecta a las estructuras fabricadas con hormigón o mortero. Se produce por la disminución del pH, como consecuencia de la reacción del dióxido de carbono atmosférico con la humedad, transformando el hidróxido de carbono con pH alto en carbonato de calcio, que presenta un pH neutro.

Entre los factores que afectan a la carbonatación se encuentra la humedad del mortero, su permeabilidad o su recubrimiento, por lo que es preciso realizar un buen acabado superficial, ya que los pequeños hoyos o los bordes romos son susceptibles de corrosión por carbonación. Es un proceso muy estudiado e investigado por la comunidad científica^{265,266}.

Solo se requiere una pequeña concentración de CO₂, que normalmente se encuentra en la atmósfera (0,03%), para que se produzca la reacción de carbonatación del mortero u hormigón²⁶⁷.

Por todo ello, y debido a que los morteros de cal precisan de esta carbonatación para endurecer y son más propensos a ser afectados por este fenómeno, se ha considerado adecuado comprobar el comportamiento de los morteros seleccionados a este proceso químico-ambiental, mediante el ensayo de carbonatación acelerada.

²⁶⁵ Parrott, L. (1987). A review of carbonation in reinforced concrete.

²⁶⁶ Montani, R. (2000). "La carbonatación, enemigo olvidado del concreto." Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, AC-Revista Construcción y Tecnología.-México.-Diciembre.

²⁶⁷ Roberts, M. (1981). Carbonation of concrete made with dense natural aggregates, Building Research Establishment.

7.3.3.1. Variación del peso seco

En la Tabla 7.15 se muestran los pesos secos de las probetas ensayadas, antes y después de su estancia en la cámara de carbonatación durante 90 días.

Ensayo de carbonatación acelerada - Variación de peso					
Designación	Peso seco (gr.)		Variación		
	Inicial	Final	Unitaria	Porcentual (%)	
Morteros patrón con árido natural					
Morteros Patrón	CH40NA	432,95	442,80	9,85	2,28
	BAS-C-NA	487,40	493,30	5,90	1,21
Morteros patrón con áridos siderúrgicos					
Morteros Patrón	CH40LF	365,65	380,40	14,75	4,03
	CH40EAF	520,00	532,65	12,54	2,47
	BAS-C-LF	365,60	375,70	10,10	2,76
Morteros de revestimiento					
Morteros definitivos	CH40LF+1/3MB600	290,45	297,60	7,15	2,46
	BAS-C-LF+1/3MB600	277,25	283,55	5,60	2,01
Morteros de fábrica					
Morteros definitivos	CH40EAF+2%MR2100	542,70	555,55	12,85	2,37
	BAS-C-EAF	634,95	641,00	6,75	1,06

Tabla 7.15 Variación del peso seco tras el ensayo de carbonatación acelerada de los morteros definitivos.

El Gráfico 7.19 muestra el comparativo del peso seco antes y después del ensayo:

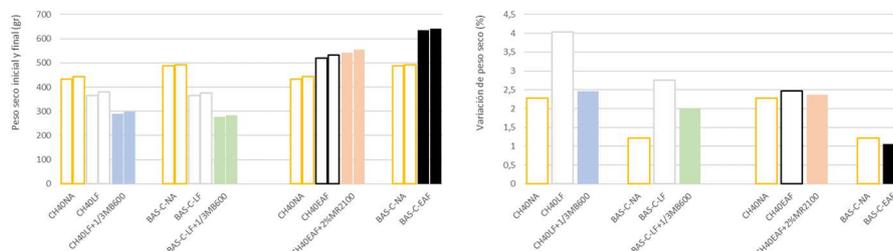


Gráfico 7.19 Comparativo del peso seco tras el ensayo de carbonatación acelerada de los morteros definitivos. Peso seco inicial y final (gr.) (izquierda) y variación de peso seco (%) (derecha).

Se muestra como en todos los casos la carbonatación acelerada del mortero produce en ellos un incremento del peso, probablemente como consecuencia de los fenómenos de carbonatación y la consiguiente aparición de los carbonatos cálcicos, con mayor peso molecular que los productos de los que proceden.

Los incrementos mayores los muestran los morteros de escoria blanca, sea cual sea el conglomerante utilizado, probablemente por la mayor presencia de CaO que tiene en su composición. No obstante, para estos morteros la incorporación de aditivos hace que este incremento sea menor.

En todos los casos, el incremento de peso producido es mayor que en los morteros de referencia fabricados con árido natural.

Para los morteros fabricados con escoria negra, los incrementos de peso mostrados son similares a los producidos en los de referencia fabricados con árido natural como con escoria negra, con o sin aditivo.

7.3.3.2. Variación de las resistencias mecánicas

En la Tabla 7.16 se muestran las variaciones de resistencia a compresión entre las probetas carbonatadas y las probetas de referencia no sometidas al ensayo.

Ensayo de carbonatación acelerada - Resistencia a Compresión				
Designación	Resistencia a compresión (MPa)		Variación (%)	
	Referencia	Ensayo		
Morteros patrón con árido natural				
Morteros Patrón	CH40NA	4,300	5,113	18,90
	BAS-C-NA	10,350	10,570	2,14
Morteros patrón con áridos siderúrgicos				
Morteros Patrón	CH40LF	3,459	3,644	5,33
	CH40EAF	7,238	7,716	6,61
	BAS-C-LF	3,866	3,806	-1,54
Morteros de revestimiento				
Morteros definitivos	CH40LF+1/3MB600	4,006	3,575	-10,76
	BAS-C-LF+1/3MB600	3,113	2,984	-4,12
Morteros de fabrica				
Morteros definitivos	CH40EAF+2%MR2100	10,181	10,031	-1,47
	BAS-C-EAF	17,731	19,479	9,82

Tabla 7.16 Variación de la Resistencia a Compresión tras el ensayo de carbonatación acelerada de los morteros definitivos.

El Gráfico 7.20 muestra el comparativo de la resistencia a compresión tras el ensayo:

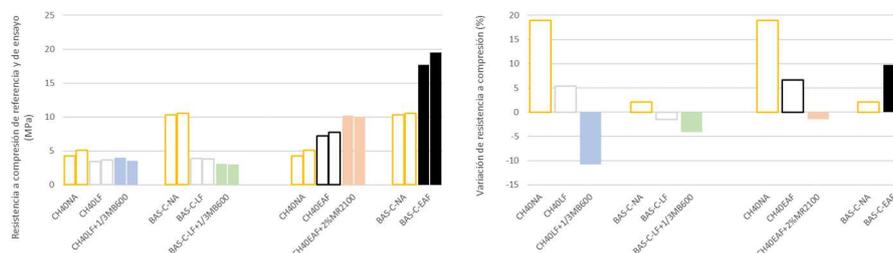


Gráfico 7.20 Comparativo de la resistencia a compresión tras el ensayo de carbonatación acelerada de los morteros definitivos. Resistencia a compresión de referencia y de ensayo (MPa) (izquierda) y variación de la resistencia a compresión (%) (derecha).

Salvo en el mortero de cal hidráulica con escoria CH40LF+1/3MB600 y en el mortero bastardo BAS-C-LF+1/3MB600, la variación en la resistencia mecánica es positiva o con reducciones poco significativas.

Los morteros fabricados con árido natural CH40NA y BAS-C-NA muestran un incremento de la resistencia a compresión, especialmente cuando el conglomerante es cal hidráulica.

Los morteros dosificados con escoria negra muestran incrementos generalizados, salvo en el caso del mortero de cal hidráulica CH40EAF+2%MR2100, donde se produce una reducción del (1,47%), poco significativa.

Salvo en el caso del mortero de cal hidráulica CH40LF, que incrementa su resistencia a compresión en un (5,33%), la utilización de la escoria blanca determina caídas importantes en la resistencia, especialmente significativas en el mortero CH40LF+1/3MB600, donde la pérdida es del (10,76%).

Además, cabe señalar que con la salvedad del mortero BAS-C-LF, los morteros con reducción de resistencia son los que incorporan aditivos en su dosificación (CH40%LF+1/3MB600, BAS-C-LF+1/3MB600 y CH40EAF-2%MR2100), más evidentes en el caso de la utilización del aditivo MasterSeal 600.

7.3.3.3. Inspección visual

Se realiza una inspección visual de las probetas para comprobar si presentan alteraciones en su superficie. En la Figura 7.19, Figura 7.20, Figura 7.21 y Figura 7.22 se puede observar el aspecto superficial de las probetas, antes y después de ser sometidas al ensayo.

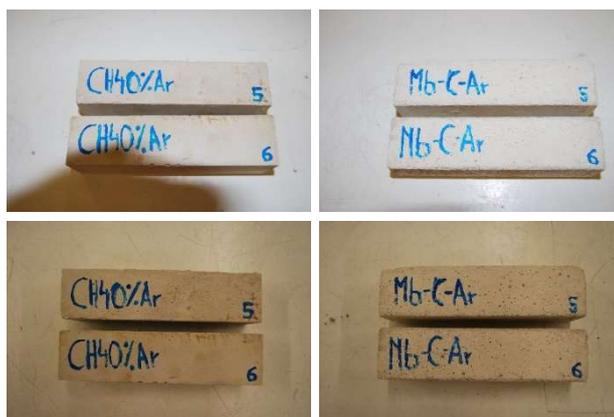


Figura 7.19 Inspección visual en el ensayo de carbonatación acelerada de los morteros patrón con árido natural (NA). (Parte superior: antes de ensayo; Parte inferior: después del ensayo).

Modificación de morteros mediante la inclusión de aditivos



Figura 7.20 Inspección visual en el ensayo de carbonatación acelerada de los morteros patrón con áridos siderúrgicos (LF y EAF). (Parte superior: antes de ensayo; Parte inferior: después del ensayo).



Figura 7.21 Inspección visual en el ensayo de carbonatación acelerada de los morteros definitivos de revestimiento. (Parte superior: antes de ensayo; Parte inferior: después del ensayo).



Figura 7.22 Inspección visual en el ensayo de carbonatación acelerada de los morteros definitivos de fábrica. (Parte superior: antes de ensayo; Parte inferior: después del ensayo).

En ninguno de los casos se aprecian alteraciones en las mismas, ni cambios significativos que indiquen deterioro o degradación en la estructura del mortero.

7.3.3.4. Profundidad del frente de carbonatación

Además del estudio de la variación de peso, de la resistencia mecánica a compresión y de la inspección visual superficial de las probetas, se mide la profundidad de carbonatación producida en las mismas, con el objetivo de comprobar el comportamiento de los morteros seleccionados.

Se seccionan las probetas sometiéndolas al ensayo de rotura a flexión y se impregnan ambas mitades con fenolftaleína para medir la profundidad de carbonatación. Se realiza una foto ortogonal con la cámara digital y se modela, con un programa de dibujo asistido por ordenador, donde se retoca la escala a las dimensiones reales de 40 x 40 mm. A continuación, se introduce una polilínea que delimite el perímetro de la zona afectada por la carbonatación y otra que contenga el perímetro semicarbonatado. Por último, se calcula el área contenida por esta polilínea.

Como el área de la zona semicarbonatada de alguna de las probetas es elevada, para los cálculos se considera sumar la mitad de esta área a la superficie carbonatada. De este modo, la profundidad media estimada, según la Ecuación 7.1, será:

Ecuación 7.1

$$\text{Profundidad media} = \sqrt{\text{Área total} - (\text{Área sin carbonatar} + \frac{1}{2}\text{Área semcarbonatada})}$$

Los datos obtenidos se resumen en la Tabla 7.17 donde se muestra también la profundidad de carbonatación:

Ensayo de carbonatación acelerada - Profundidad de carbonatación				
	Designación	Área		Profundidad de Carbonatación media (cm)
		Sin Carbonatar (cm ²)	Semi Carbonatada (cm ²)	
Morteros Patrón	Morteros patrón con árido natural			
	CH40NA	0,099	0,038	0,116
	BAS-C-NA	0,078	0,053	0,263
	Morteros patrón con áridos siderúrgicos			
	CH40LF	0,087	0,025	0,246
	CH40EAF	0,107	0,028	0,196
	BAS-C-LF	0,029	0,080	0,302
Morteros definitivos	Morteros de revestimiento			
	CH40LF+1/3MB600	0,058	0,057	0,271
	BAS-C-LF+1/3MB600	0,070	0,044	0,260
	Morteros de fábrica			
	CH40EAF+2%MR2100	0,112	0,039	0,169
	BAS-C-EAF	0,106	0,028	0,199

Tabla 7.17 Profundidad de carbonatación tras el ensayo de carbonatación acelerada de los morteros definitivos.

Modificación de morteros mediante la inclusión de aditivos

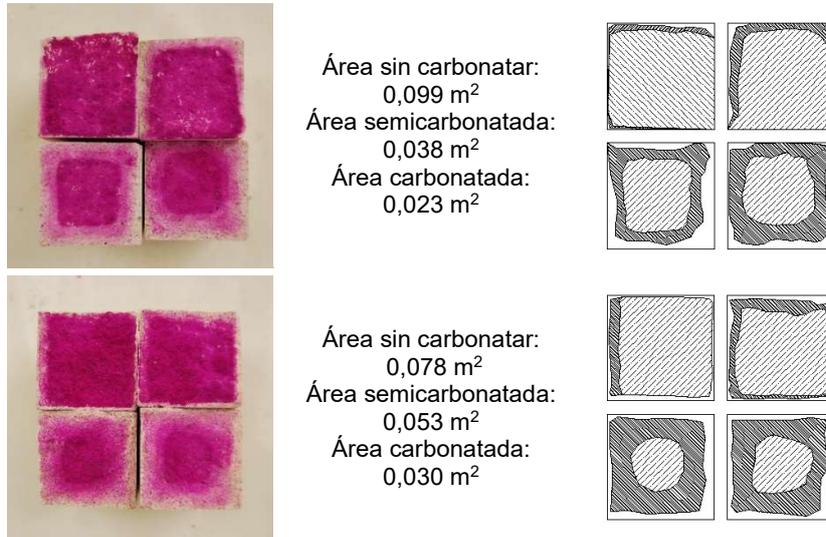


Figura 7.23 Medición del área carbonatada en el ensayo de carbonatación acelerada de los morteros patrón con árido natural (NA) (de arriba a abajo: CH40%NA, BAS-C-NA).

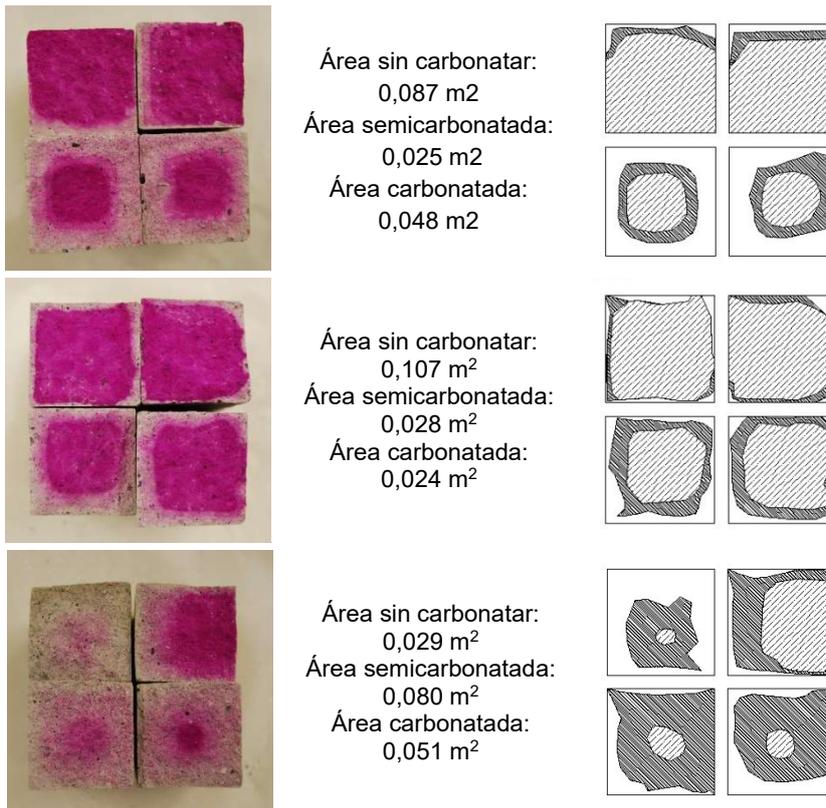


Figura 7.24 Medición del área carbonatada en el ensayo de carbonatación acelerada de los morteros patrón con áridos siderúrgicos (LF y EAF) (de arriba a abajo: CH40%LF, CH40%EAF, BAS-C-LF).

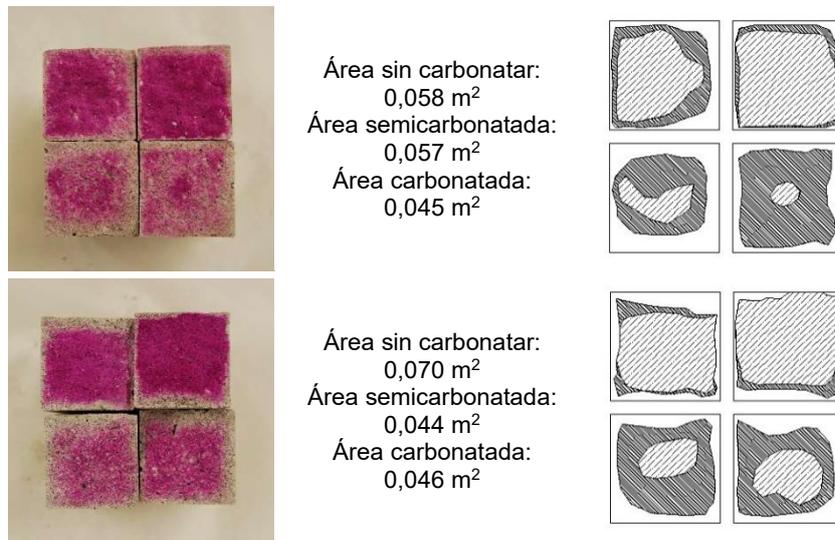


Figura 7.25 Medición del área carbonatada en el ensayo de carbonatación acelerada de los morteros definitivos de revestimiento (de arriba a abajo: CH40%LF+1/3MB600, BAS-C-LF+1/3MB600).

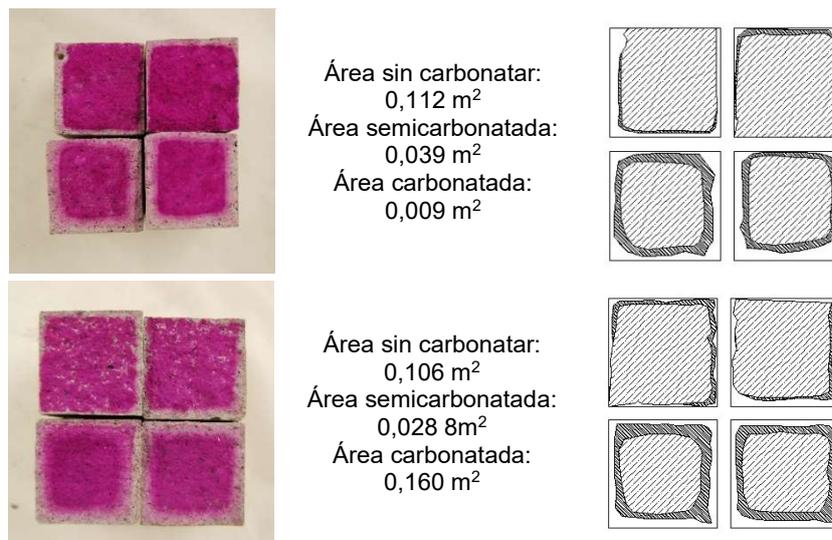


Figura 7.26 Medición del área carbonatada en el ensayo de carbonatación acelerada de los morteros definitivos de fábrica. (de arriba a abajo: CH40%EAF+2%MR2100, BAS-C-EAF).

Desde la Figura 7.23 a la Figura 7.26 se muestran las imágenes de las áreas carbonatadas de las probetas, junto a los croquis obtenidos en el programa de dibujo, para cada una de ellas.

Se comprueba cómo la matriz de Hidróxido Cálcico ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) endurece en contacto con el CO_2 , produciendo Carbonato Cálcico CaCO_3 . Los áridos, junto a la evaporación del agua de amasado, inducen al desarrollo de un sistema poroso que favorece la difusión del CO_2 , reducen la retracción y

fisuración durante su secado y puede dar lugar a posteriores reacciones puzolánicas²⁶⁸.

El Gráfico 7.21 muestra la profundidad de carbonatación que presentan las probetas después de permanecer en la cámara de carbonatación durante 90 días:

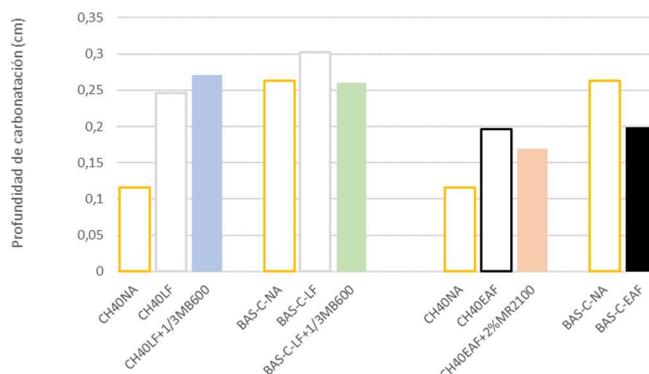


Gráfico 7.21 Profundidad del área carbonatada (cm) tras el ensayo de carbonatación acelerada de los morteros definitivos.

El proceso de carbonatación en morteros de cal depende de la difusión de CO_2 por el sistema de poros del material. Por ello, se observa una mayor profundidad de carbonatación en los morteros dosificados con escoria blanca como árido, independientemente del tipo de conglomerante utilizado. Es preciso recordar que estos morteros tienen muy baja densidad y una gran cantidad de poros.

Además, de acuerdo con el análisis que hacen Reardon y Fagan²⁶⁹ sobre el límite de fase entre la portlandita y la calcita, la presencia de calcita (CaO) en la escoria blanca determina una mayor transformación de este óxido en portlandita de la calcita, superior a la producida en los morteros dosificados con escoria negra.

Los cuatro morteros presentan una elevada retención de agua, siendo la pérdida de absorción un parámetro que caracteriza esta capacidad, influyendo en la cinética de la reacción²⁷⁰. Existen estudios que aportan

²⁶⁸ Sánchez-Moral, S., J. García-Guinea, L. Luque, R. González-Martín and P. López-Arce (2004). "Cinética de carbonatación de morteros experimentales de cal de tipo romano." *Mater. Construcc* **54**(275): 23-37.

²⁶⁹ Reardon, E. and R. Fagan (2000). "The calcite/portlandite phase boundary: enhanced calcite solubility at high pH." *Applied Geochemistry* **15**(3): 327-335.

²⁷⁰ Green, K., M. A. Carter, W. Hoff and M. Wilson (1999). "The effects of lime and admixtures on the water-retaining properties of cement mortars." *Cement and concrete research* **29**(11): 1743-1747.

interesantes modelos físicos y de desarrollo matemático donde explican el papel de los factores que condicionan la carbonatación en los morteros de cal²⁷¹.

7.3.4. Agua salina

El mortero expuesto al ambiente marino durante años sufre diversas alteraciones, debido al ataque por sulfatos y al ataque por cloruros¹⁴³.

Mediante este ensayo se puede determinar la expansión o hinchamiento potencial de los conglomerantes, tales como la cal libre y los óxidos de magnesio, componentes sensibles a la hidratación y aumento de volumen, y comprobar cómo afectan las condiciones ambientales de los ambientes marinos a las propiedades de los morteros.

7.3.4.1. Variación del peso seco

En la Tabla 7.18 se muestra el peso seco de las probetas antes y después del ensayo, y su variación después del mismo, tanto unitaria como porcentual.

Ensayo de agua salina - Variación de peso						
Designación	Peso seco (gr.)		Variación		Porcentual (%)	
	Inicial	Final	Unitaria			
Morteros patrón con árido natural						
Morteros Patrón	CH40NA	430,00	470,90	40,90	9,51	
	BAS-C-NA	485,95	494,10	8,85	1,82	
	Morteros patrón con áridos siderúrgicos					
	CH40LF	360,15	384,85	24,70	6,86	
	CH40EAF	514,90	574,60	59,70	11,59	
	BAS-C-LF	353,70	365,25	11,55	3,27	
Morteros de revestimiento						
Morteros definitivos	CH40LF+1/3MB600	292,10	303,90	11,80	4,04	
	BAS-C-LF+1/3MB600	271,00	280,35	9,35	3,45	
	Morteros de fábrica					
	CH40EAF+2%MR2100	541,50	561,70	20,20	3,73	
	BAS-C-EAF	628,55	650,20	21,65	3,44	

Tabla 7.18 Variación del peso seco tras el ensayo de agua salina de los morteros definitivos.

El Gráfico 7.22 muestra el comparativo del peso seco antes y después del ensayo:

²⁷¹ Van Balen, K. and D. Van Gemert (1994). "Modelling lime mortar carbonation." *Materials and structures* **27**(7): 393-398.

¹⁴³ Arribas García, I. (2011). *Estudio y diseño de hormigones estructurales basados en la incorporación de subproductos siderúrgicos: viabilidad tecnológica*, Tesis Doctoral, Universidad del País Vasco, España.

Modificación de morteros mediante la inclusión de aditivos

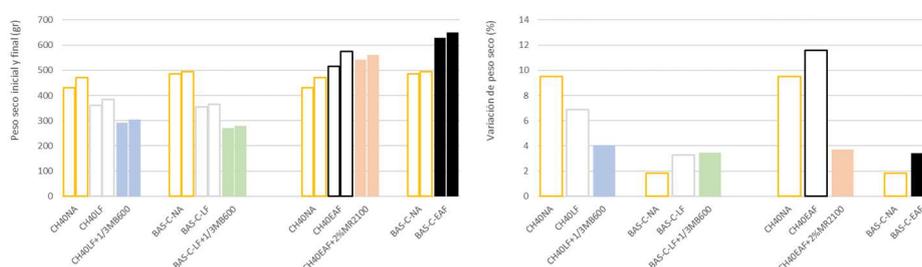


Gráfico 7.22 Comparativo del peso seco tras el ensayo de agua salina de los morteros definitivos. Peso seco inicial y final (gr.) (izquierda) y variación de peso seco (%) (derecha).

Todas las muestras de mortero ensayadas muestran un pequeño incremento de peso que oscila entre el 3% y el 8%. En el caso del mortero CH40EAF, es del 12%, el más elevado de todos.

Se observa que todos los morteros presentan buen comportamiento a la acción de los ambientes marinos, ya que en ninguno de los casos presenta una pérdida de peso por degradación. No obstante, los incrementos de peso en este ensayo pueden ser debidos a la acumulación de sales, adheridas en su superficie o depositadas en el interior de la red intersticial de poros abiertos del material.

7.3.4.2. Variación de las resistencias mecánicas

En la Tabla 7.19 se muestra el estudio comparativo entre los registros de resistencia a compresión de las probetas de mortero sumergidas 32 días en agua salina, y las de referencia sin sumergir.

Ensayo de agua salina - Resistencia a Compresión				
Designación	Resistencia a compresión (MPa)		Variación (%)	
	Referencia	Ensayo		
Morteros patrón con árido natural				
Morteros Patrón	CH40NA	4,300	10,578	146,00
	BAS-C-NA	10,350	13,552	30,65
Morteros patrón con áridos siderúrgicos				
Morteros Patrón	CH40LF	3,459	6,522	88,53
	CH40EAF	7,238	15,109	108,77
	BAS-C-LF	3,866	3,722	-3,72
Morteros de revestimiento				
Morteros definitivos	CH40LF+1/3MB600	4,006	4,975	24,18
	BAS-C-LF+1/3MB600	3,113	3,456	11,04
Morteros de fábrica				
Morteros definitivos	CH40EAF+2%MR2100	10,181	23,634	132,14
	BAS-C-EAF	17,731	27,122	52,96

Tabla 7.19 Variación de la Resistencia a Compresión tras el ensayo de agua salina de los morteros definitivos.

Capítulo VII

El Gráfico 7.23 muestra el comparativo de la resistencia a compresión tras el ensayo de agua salina de los morteros definitivos:

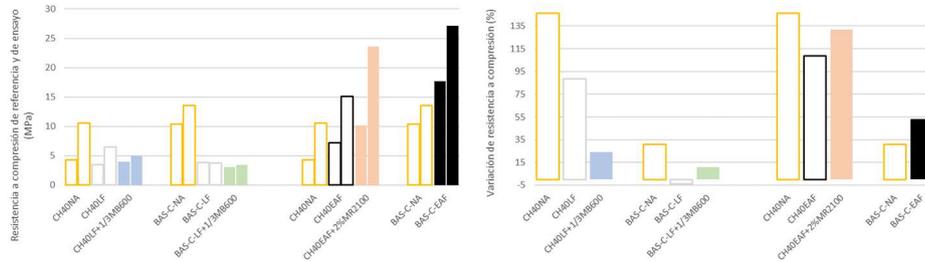


Gráfico 7.23 Comparativo de la resistencia a compresión tras el ensayo de agua salina de los morteros definitivos. Resistencia a compresión de referencia y de ensayo (MPa) (izquierda) y variación de la resistencia a compresión (%) (derecha).

Prácticamente todos los morteros ensayados desarrollan resistencias a compresión mayores finalizado el ensayo. Tan solo se produce una reducción en la resistencia mecánica a compresión del mortero BAS-C-LF. No obstante, con la incorporación del aditivo, alcanza de nuevo una resistencia positiva.

7.3.4.3. Inspección visual

Como en los anteriores ensayos de durabilidad se realiza la inspección visual de las probetas tras estar sumergidas en agua salina durante los 32 días, y se compara con las probetas de referencia no sumergidas.

Se busca la aparición de manchas, oxidaciones, hinchamientos del material, grietas, fisuras o exfoliaciones.



Figura 7.27 Inspección visual en el ensayo de agua salina de los morteros patrón con árido natural (NA). (Parte superior: antes de ensayo; Parte inferior: después del ensayo).

Modificación de morteros mediante la inclusión de aditivos



Figura 7.28 Inspección visual en el ensayo de agua salina de los morteros patrón con áridos siderúrgicos (LF y EAF). (Parte superior: antes de ensayo; Parte inferior: después del ensayo).



Figura 7.29 Inspección visual en el ensayo de agua salina de los morteros definitivos de revestimiento. (Parte superior: antes de ensayo; Parte inferior: después del ensayo).



Figura 7.30 Inspección visual en el ensayo de agua salina de los morteros definitivos de fábrica. (Parte superior: antes de ensayo; Parte inferior: después del ensayo).

De la Figura 7.27 a la Figura 7.30 puede observarse el aspecto visual externo de las probetas, antes y después de ser sometidas al ensayo.

Muestran cambios de tonalidad variables en toda la superficie, producto de la adhesión de las sales, mostrando incluso zonas blancas en las que se aprecian esta acumulación. Tan solo en el caso de la probeta correspondiente al mortero BAS-C-LF se han observado grietas en su superficie, motivada probablemente por los efectos expansivos de las sales. Además, coincide que este mortero también ha experimentado una reducción de su resistencia mecánica a compresión.

Este comportamiento concuerda con el observado en esta muestra en ensayo de choque térmico, en el que los morteros de escoria blanca resultaron agrietados y con pérdidas de resistencia mecánica. Sería conveniente estudiar en profundidad el comportamiento de los morteros dosificados con escoria blanca cuando están en contacto con el agua y/o altas temperaturas.

En los morteros dosificados con árido natural y escoria negra no se aprecia ningún otro tipo de alteración, por lo que puede concluirse que, en general, los morteros muestran un buen comportamiento a la acción de las sales presentes en los ambientes marinos.

7.3.5. Atmósferas industriales. Ensayo Kesternich

Las normas que contemplan las especificaciones sobre el ensayo Kesternich (Atmósferas industriales), 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 si están colocados a la intemperie, ya que estos materiales pueden verse afectados por la acción del dióxido de azufre, subproducto de la quema de combustibles fósiles, como el petróleo o el carbón.

Es frecuente encontrar entre los productos de corrosión atmosférica del acero la presencia de sales solubles, generalmente cloruros y sulfatos, sobre todo cuando el mortero ha estado expuesto durante un cierto tiempo en una atmósfera contaminada.

Este ensayo permite también comprobar la reacción de los componentes del cemento y cal frente a la acción del SO_2 , y especialmente sobre las finas partículas de hierro contenidas en la escoria.

7.3.5.1. Variación del peso seco

En la Tabla 7.20 se muestran los resultados obtenidos, en los que se recogen los pesos secos de las probetas, antes y después del ensayo, y su variación después de los 15 ciclos de exposición.

Modificación de morteros mediante la inclusión de aditivos

Ensayo Kesternich - Variación de peso					
Designación	Peso seco (gr.)		Variación		
	Inicial	Final	Unitaria	Porcentual (%)	
Morteros patrón con árido natural					
Morteros Patrón	CH40NA	442,45	456,15	13,70	3,10
	BAS-C-NA	491,10	496,50	4,50	1,10
Morteros patrón con áridos siderúrgicos					
Morteros Patrón	CH40LF	368,90	381,65	12,75	3,46
	CH40EAF	521,05	539,55	18,50	3,55
	BAS-C-LF	368,45	381,95	13,50	3,66
Morteros de revestimiento					
Morteros definitivos	CH40LF+1/3MB600	293,25	303,20	9,95	3,39
	BAS-C-LF+1/3MB600	266,55	271,65	5,10	1,91
Morteros de fábrica					
Morteros definitivos	CH40EAF+2%MR2100	547,45	568,95	21,50	3,93
	BAS-C-EAF	633,60	645,25	11,65	1,84

Tabla 7.20 Variación del peso seco tras el ensayo Kesternich de los morteros definitivos.

El Gráfico 7.24 muestra el comparativo del peso seco antes y después del ensayo:

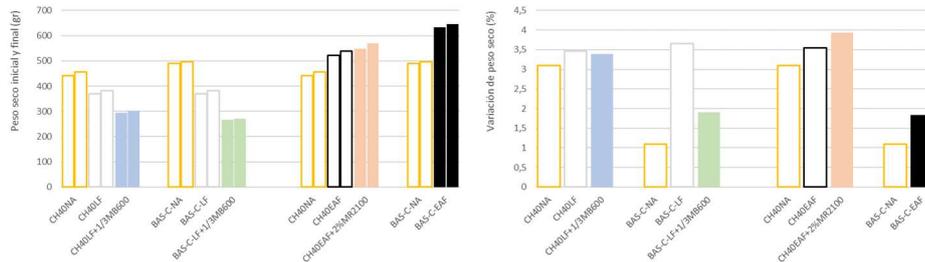


Gráfico 7.24 Comparativo del peso seco tras el ensayo de Kesternich de los morteros definitivos. Peso seco inicial y final (gr.) (izquierda) y variación de peso seco (%) (derecha).

El incremento del peso producido en las mezclas está en entorno al 3%, salvo en el caso de los morteros bastardos, tanto fabricados con arena natural como con escoria blanca, en los que el incremento es menor. En ambos casos, puede considerarse poco significativo.

Por ello, estas variaciones de peso (más siendo positivas, sin pérdida de masa), pueden justificarse por las condiciones ambientales en las que se produce el ensayo o por el depósito de sulfatos sobre el mortero.

7.3.5.2. Variación de las resistencias mecánicas

En la Tabla 7.21 se muestra la resistencia a compresión de las probetas, antes y después del ensayo, y su variación después de los 15 ciclos.

Ensayo Kesternich - Resistencia a Compresión				
	Designación	Resistencia a compresión (MPa)		Variación (%)
		Referencia	Ensayo	
Morteros Patrón	Morteros patrón con árido natural			
	CH40NA	4,766	6,113	28,26
	BAS-C-NA	10,769	10,156	-5,69
	Morteros patrón con áridos siderúrgicos			
	CH40LF	4,022	5,034	25,17
	CH40EAF	7,366	12,991	76,37
	BAS-C-LF	3,650	3,588	-1,71
Morteros definitivos	Morteros de revestimiento			
	CH40LF+1/3MB600	3,356	3,113	-7,26
	BAS-C-LF+1/3MB600	2,497	2,800	12,14
	Morteros de fábrica			
	CH40EAF+2%MR2100	7,941	9,741	22,67
BAS-C-EAF	18,119	19,306	6,55	

Tabla 7.21 Variación de la Resistencia a Compresión tras el ensayo Kesternich de los morteros definitivos.

El Gráfico 7.23 muestra el comparativo de la resistencia a compresión tras el ensayo de los morteros definitivos:

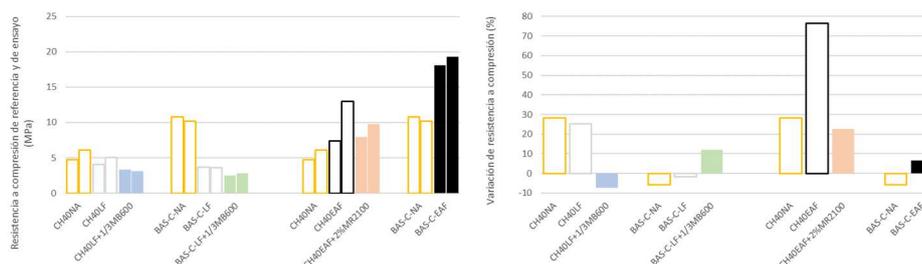


Gráfico 7.25 Comparativo de la resistencia a compresión tras el ensayo Kesternich de los morteros definitivos. Resistencia a compresión de referencia y de ensayo (MPa) (izquierda) y variación de la resistencia a compresión (%) (derecha).

Los resultados obtenidos por los distintos morteros ensayados son dispares, por lo que es difícil sacar conclusiones que expliquen este comportamiento. Por lo que se puede observar, la ganancia o la pérdida de resistencias después del ensayo es independiente de los conglomerantes, áridos o aditivos utilizados.

El ensayo Kesternich afecta muy positivamente a los morteros de cal hidráulica, siempre y cuando no lleven aditivo, ya que en este caso el incremento de la resistencia mecánica es menor, resultado incluso negativa en el caso del mortero CH40LF+1/3MB600. Por el contrario, las muestras de morteros bastardos presentan los menores incrementos de resistencia, siendo negativa también en muchos de los casos.

Esta pérdida de resistencia no es significativa, puesto que en ninguno de los casos supera el 10%. Además, al corresponderse con los morteros de

menor resistencia mecánica, pequeñas variaciones magnifican el resultado final.

7.3.5.3. Inspección visual

Una vez concluidos los 15 ciclos de ensayo, se realiza un reconocimiento visual de las probetas para comprobar el efecto de la atmósfera saturada de SO₂ sobre el material. La Figura 7.31, Figura 7.32, Figura 7.33 y Figura 7.34 permite comparar el aspecto de las probetas, antes y después del ensayo.



Figura 7.31 Inspección visual en el ensayo Kesternich de los morteros patrón con árido natural (NA). (Parte superior: antes de ensayo; Parte inferior: después del ensayo).



Figura 7.32 Inspección visual en el ensayo Kesternich de los morteros patrón con áridos siderúrgicos (LF y EAF). (Parte superior: antes de ensayo; Parte inferior: después del ensayo).



Figura 7.33 Inspección visual en el ensayo Kesternich de los morteros definitivos de revestimiento. (Parte superior: antes de ensayo; Parte inferior: después del ensayo).



Figura 7.34 Inspección visual en el ensayo Kesternich de los morteros definitivos de fábrica. (Parte superior: antes de ensayo; Parte inferior: después del ensayo).

En ninguno de los casos se observan desconchados, fisuras, laminaciones o grietas en las probetas. No obstante, aunque no se aprecia bien en las imágenes, aparecen en la superficie pequeñas manchas oscuras de tonalidad marrón cobre, debido probablemente a la oxidación de las finas partículas metálicas contenidas en la escoria.

7.3.6. Cristalización de sales

Por último, se analiza los efectos producidos por las sales solubles presentes en otros materiales con los que el mortero puede entrar en contacto, como los suelos, ladrillos, agua, cementos alcalinos, yesos, etc. y que pueden perjudicar la estabilidad de los materiales que lo forman.

La cristalización de sales en los diferentes pavimentos y materiales de construcción es una de las causas más comunes de deterioro del Patrimonio Arquitectónico. Si esto ocurre, la cristalización de las sales solubles en el interior del mortero puede producir tensiones dimensionales que afecten a la estabilidad de su estructura interna^{272,273}.

Las sales solubles pueden estar presentes en atmosferas industriales o en el propio terreno. Incluso la presencia de sales puede tener su origen en los propios materiales utilizados para la fabricación del mortero, especialmente en el agua de amasado y en los áridos.

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.

Este fenómeno se explica por la posibilidad de que las sales pueden penetrar al interior del material en presencia de la humedad ambiental, bien por absorción o por capilaridad. Este transporte puede producirse tanto en la superficie como en el interior de un material, dando lugar a eflorescencias superficiales^{274,275}.

Hay que tener en cuenta que este ensayo es quizá uno de los ensayos de durabilidad más agresivos, y por ello no se prevén buenos resultados.

7.3.6.1. Variación del peso seco

En la Tabla 7.22 se muestran los resultados obtenidos, en los que se recogen el peso seco de las probetas, antes y después del ensayo, y su variación después de los 15 ciclos.

²⁷² Charola, A. E. (2004). Stone deterioration in historic buildings and monuments. Proceedings of the 10th International congress on Deterioration and Conservation of Stone; Vol. 1, ICOMOS Sweden.

²⁷³ Cultrone, G. and E. S. Pardo "Deterioro en Muros de Edificios Ocasionado por Eflorescencias Salinas."

²⁷⁴ Benavente, D., M. G. a. del Cura and S. Ordóñez (2003). "Salt influence on evaporation from porous building rocks." Construction and building materials **17**(2): 113-122.

²⁷⁵ Benavente, D., J. Martínez-Martínez, N. Cueto and M. García-del-Cura (2007). "Salt weathering in dual-porosity building dolostones." Engineering geology **94**(3): 215-226.

Ensayo de cristalización de sales - Variación de peso					
	Designación	Peso seco (gr.)		Variación	
		Inicial	Final	Unitaria	Porcentual (%)
Morteros Patrón	Morteros patrón con árido natural				
	CH40NA	436,50	440,25	3,75	0,86
	BAS-C-NA	486,55	492,30	5,75	1,18
	Morteros patrón con áridos siderúrgicos				
	CH40LF	362,65	-	-	-
	CH40EAF	515,85	559,90	44,05	8,54
	BAS-C-LF	363,40	-	-	-
Morteros definitivos	Morteros de revestimiento				
	CH40LF+1/3MB600	286,60	-	-	-
	BAS-C-LF+1/3MB600	261,70	-	-	-
	Morteros de fábrica				
	CH40EAF+2%MR2100	541,65	580,85	39,20	7,24
	BAS-C-EAF	627,65	648,80	21,15	3,37

Tabla 7.22 Variación del peso seco tras el ensayo de cristalización de sales de los morteros definitivos.

Como se puede observar no todas las probetas han podido someterse a los 15 ciclos, ya que varias de ellas se han desintegrado completamente antes de completar el ensayo. Es el caso de las probetas correspondientes a los morteros CH40LF, BAS-C-LF, CH40LF+1/3MB600 y BAS-C-LF+1/3MB600.

Todas ellas contienen en su composición escoria blanca como árido, por lo que se puede concluir que los morteros dosificados con este material no soportan el ataque de las sales.

El Gráfico 7.26 muestra el comparativo del peso seco antes y después del ensayo:

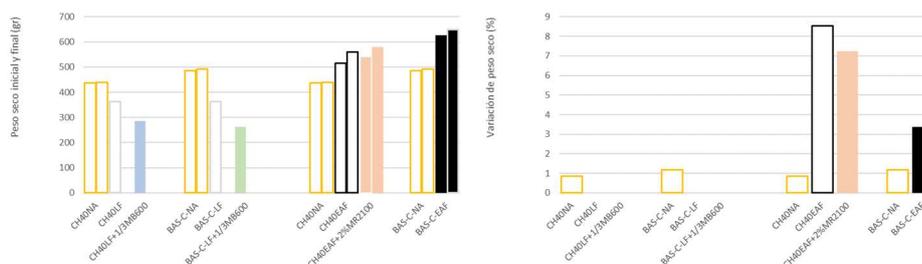


Gráfico 7.26 Comparativo del peso seco tras el ensayo de cristalización de sales de los morteros definitivos. Peso seco inicial y final (gr.) (izquierda) y variación de peso seco (%) (derecha).

Sin embargo, si se ha completado el ensayo en el caso de las probetas correspondientes a los morteros dosificados con árido natural y escoria negra, experimentando éstas últimas un gran incremento de peso en todos los casos. Por su parte, en los morteros dosificados con árido natural las variaciones son poco significativas (1%).

7.3.6.2. Variación de las resistencias mecánicas

En la Tabla 7.23 se muestra la resistencia a compresión de las probetas, antes y después del ensayo, y su variación después de los 15 ciclos.

Ensayo de cristalización de sales - Resistencia a Compresión				
Designación	Resistencia a compresión (MPa)		Variación (%)	
	Referencia	Ensayo		
Morteros patrón con árido natural				
Morteros Patrón	CH40NA	4,766	32,919	590,75
	BAS-C-NA	10,769	24,059	123,42
Morteros patrón con áridos siderúrgicos				
Morteros Patrón	CH40LF	4,022	-	-
	CH40EAF	7,366	17,994	144,29
	BAS-C-LF	3,650	-	-
Morteros de revestimiento				
Morteros definitivos	CH40LF+1/3MB600	3,356	-	-
	BAS-C-LF+1/3MB600	2,497	-	-
Morteros de fábrica				
Morteros definitivos	CH40EAF+2%MR2100	7,941	23,131	191,30
	BAS-C-EAF	18,119	23,006	26,97

Tabla 7.23 Variación de la Resistencia a Compresión tras el ensayo cristalización de sales de los morteros definitivos.

El Gráfico 7.27 muestra el comparativo de la resistencia a compresión tras el ensayo de los morteros definitivos:

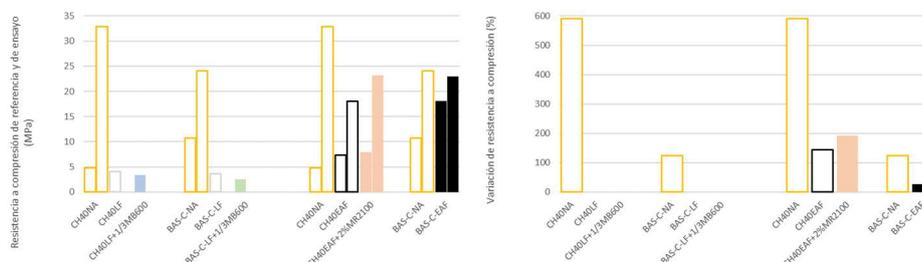


Gráfico 7.27 Comparativo de la resistencia a compresión tras el ensayo de cristalización de sales de los morteros definitivos. Resistencia a compresión de referencia y de ensayo (MPa) (izquierda) y variación de la resistencia a compresión (%) (derecha).

Las probetas que han completado los 15 ciclos del ensayo, correspondientes a los morteros dosificados con árido natural y escoria negra, muestran mayores resistencias mecánicas tras finalizar el ensayo.

A diferencia de lo ocurrido en el estudio de la variación del peso, las probetas que más variación de resistencia muestran son las correspondientes a los morteros dosificados con árido natural. En el caso de los morteros bastardos es el doble de la de sus correspondientes no

sometido al ensayo, o siete veces en el caso de los morteros dosificados con cal hidráulica.

Las probetas de escoria negra muestran unos incrementos de resistencia menos evidentes como en el caso del mortero bastardo BAS-C-EAF. No obstante, en los morteros con cal hidráulica este incremento es del 100% o el 200%.

7.3.6.3. Inspección visual

En la inspección visual (Figura 7.35 - Figura 7.38) puede observarse el aspecto externo que presentan las probetas antes y después de ser sometidas al ensayo. Las imágenes muestran la agresividad de este ensayo sobre el material, produciéndose en la mayoría de los casos desfragmentación, descamaciones y desconchados.



Figura 7.35 Inspección visual en el ensayo de cristalización de sales de los morteros patrón con árido natural (NA). (Parte superior: antes de ensayo; Parte inferior: después del ensayo).



Figura 7.36 Inspección visual en el ensayo de cristalización de sales de los morteros patrón con áridos siderúrgicos (LF y EAF). (Parte superior: antes de ensayo; Parte inferior: después del ensayo).



Figura 7.37 Inspección visual en el ensayo de cristalización de sales de los morteros definitivos de revestimiento. (Parte superior: antes de ensayo; Parte inferior: después del ensayo).



Figura 7.38 Inspección visual en el ensayo de cristalización de sales de los morteros definitivos de fábrica. (Parte superior: antes de ensayo; Parte inferior: después del ensayo).

En el caso de las probetas patrón, el mortero bastardo BAS-C-NA presenta solo deterioro superficial, mientras que en el mortero de cal hidráulica CH40NA es evidente la pérdida de material

El deterioro por parte de los morteros de escoria negra sin aditivo es casi mínimo, observándose daños tan solo en la superficie.

Por el contrario, los morteros de escoria blanca muestran una descomposición total, por lo que se decide concluir el ensayo sin completar la serie de ciclos para estas muestras. El agua tiene más facilidad para introducirse en estas probetas debido a su mayor porosidad y a la interconexión que existe entre los poros, mayor que en el caso de los morteros dosificados con escoria negra. Además, el daño producido por las sales depositadas en el interior del material al cristalizar es mayor debido a que los morteros con escoria blanca presentan menores resistencias

mecánicas, lo que merma su capacidad de resistir las tensiones producidas por las sales al cristalizar e incrementar su volumen.

Su aspecto visual muestra un material totalmente desintegrado, con numerosos cristales de sal tanto en su superficie como en las grietas o zonas fisuradas. El aspecto de las probetas de escoria blanca con aditivo es el mismo que en el caso de sus análogas sin aditivo. Aunque la desintegración parece ser menor, ésta ha sido casi total.

Por el contrario, los morteros definitivos con escoria negra en su dosificación solo presentan ligeras alteraciones. En el caso de los morteros dosificados con cal hidráulica se observa un pequeño desconchado superficial y en los morteros bastardos una ligera erosión, también superficial.

7.4. CONCLUSIONES

Respecto a la utilización de aditivos:

1. Se concluye que los aditivos utilizados en los morteros de acería ensayados cumplen con las especificaciones determinadas por el fabricante.
2. El aditivo MasterSeal 600, en una proporción de 1/3 respecto del agua de amasado, mejora en la mayoría de los casos considerablemente la adherencia de los morteros.
3. El aditivo MasterRheobuild 2100, añadido en una cantidad del 2% sobre el peso del conglomerante, mejora la resistencia de los morteros endurecidos.

Respecto a la caracterización de los morteros:

4. Los morteros con escoria negra, CH40EAF+2%MR2100 y BAS-C-EAF son adecuados para ser prescritos como morteros de albañilería, ya que ambos presentan una resistencia a compresión muy elevada, superior a las de los correspondientes morteros patrón, debido a la acción del aditivo dosificado y a las propiedades de la escoria negra.
5. En el caso del mortero BAS-C-EAF se observa también un buen comportamiento a la adhesión, siendo el mayor registro obtenido tanto de los morteros con escorias, como de sus correspondientes morteros patrón.
6. Los morteros con escoria blanca y aireante, CH40LF+1/3MB600 y BAS-C-LF+1/3MB600, son morteros menos densos y con más cantidad de poros, lo que les hace idóneos para ser utilizados como revestimiento por su ligereza. De igual modo, son morteros con una resistencia a la adherencia superior a sus morteros de referencia

patrón. Sin embargo, no resultan aptos para exteriores debido a su gran coeficiente de succión.

7. En el caso del mortero BAS-C-LF+1/3MB600 además de ser un mortero con mejor comportamiento a la adherencia, también lo es respecto a su comportamiento mecánico a flexión y compresión.
8. Los morteros para revestimiento CH40LF+1/3MB600 y BAS-C-LF+1/3MB600, muestran mejores propiedades aislantes de carácter térmico que los morteros de fábrica de ladrillos, CH40EAF+2%MR2100 y BAS-C-EAF.
9. Todas las muestras ensayadas han de ser consideradas acústicamente muy poco absorbentes.
10. Los morteros de escoria negra pueden ser clasificados como Euroclase A1 (no combustible, sin contribución). Debido al comportamiento mostrado por los morteros de escoria blanca a los ensayos de durabilidad que incorporan altas temperaturas, sería preciso evaluar en investigaciones futuras el comportamiento de estos morteros a la acción del fuego.

Respecto a la durabilidad de los morteros:

11. Los morteros definitivos ensayados no muestran un buen comportamiento frente a los ciclos de hielo-deshielo, por lo que se les puede considerar como "morteros heladizos". No obstante, pueden ser prescritos como morteros para uso en interiores.
12. Los morteros que incorporan en su composición escoria negra presentan buen comportamiento frente a los ciclos de humedad-sequedad, no es así en el caso de los morteros de escoria blanca, los cuales presentan grietas y pérdida de resistencias mecánicas.
13. La matriz ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) endurece en contacto con el CO_2 , produciendo CaCO_3 en todos los morteros analizados, como así determina la profundidad de carbonatación. Sin embargo, para los morteros con aditivos el proceso de carbonatación no trasfiere una ganancia de resistencias mecánica a los morteros carbonatados.
14. La escoria negra aporta a los morteros un buen comportamiento frente al ensayo de agua salina, pudiendo ser utilizados en ambientes marinos o zonas costeras sin presentar riesgo de deterioro. Sin embargo, en las mezclas que incorporan escoria blanca se observan signos de degradación.
15. Ninguno de los morteros estudiados muestra alteraciones significativas frente a la acción del SO_2 , de acuerdo con las especificaciones del ensayo Kesternich. Por lo que se puede recomendar su uso en ambientes industriales y de contaminación elevada.
16. Los morteros fabricados con escoria negra presentan muy buen comportamiento frente a la cristalización de sales solubles. Por su

parte, los morteros fabricados con escoria blanca no muestran un buen comportamiento a la durabilidad frente a este agente erosivo, por lo que no se aconseja su utilización en ambientes con presencia de agua con sales solubles.



CAPITULO VIII

Puesta en obra

8. PUESTA EN OBRA

Por último, para concluir con la parte experimental, se realiza la puesta en obra de los cuatro morteros seleccionados y estudiados anteriormente.

Para los morteros de revestimiento se han aplicado unas muestras sobre un paramento vertical de fábrica de ladrillo colocado en ambiente exterior. Por su parte, para los morteros de fábrica, se han preparado probetas para el ensayo de resistencia a cortante.

Las muestras han permanecido durante un año en el recinto exterior de la Escuela Politécnica Superior de Burgos. Pasado este tiempo se han realizado ensayos de comprobación para conocer su comportamiento después de haber estado expuestas a los rigores climáticos.

8.1. REVESTIMIENTO EN PAREMTO VERTICAL

La puesta en obra de los morteros CH40LF+1/3MB600 y BAS-C-LF+1/3MB600, morteros diseñados para revestimiento, ha consistido en su aplicación en paramentos verticales cerámicos. Con cada tipo de mortero se ha revestido una parte de un muro, con acabado liso y rugoso.



Figura 8.1 Realización del enfoscado vertical. Octubre 2016.

En el momento de su aplicación (Figura 8.1) se observa que precisan más agua de amasado que la calculada teóricamente, necesitando una aplicación cuidadosa para evitar el desprendimiento del material. Una vez comenzado el proceso de fraguado y endurecimiento de los morteros, éstos tienen muy buen comportamiento.

Para comprobar el efecto del tiempo sobre el material, se realiza una inspección visual cada tres meses, coincidiendo con el cambio de estación.



Figura 8.2 Puesta en obra. Enfoscado CH40LF+1/3MB600 (izquierda) y BAS-C-LF+1/3MB600 (derecha). Enero 2017.

En el mes de enero de 2017 (Figura 8.2) se realiza la primera inspección visual, con el objetivo de observar cómo han afectado los fenómenos climatológicos al material. Se observan agrietamientos superficiales, más acusados en el mortero CH40LF+1/3MB600 que el BAS-C-LF+1/3MB600. Sin embargo, en ambos casos la fijación a la fábrica resulta muy buena, sin desprendimientos ni abombamientos.



Figura 8.3 Puesta en obra. Revestimiento CH40LF+1/3MB600 (izquierda) y BAS-C-LF+1/3MB600 (derecha). Abril 2017.



Figura 8.4 Puesta en obra. Revestimiento CH40LF+1/3MB600 (izquierda) y BAS-C-LF+1/3MB600 (derecha). Julio 2017.

Tres meses después, en abril (Figura 8.3), se realiza la segunda inspección visual para comprobar el efecto del invierno. No se aprecia en ninguno de los casos variaciones respecto de la anterior inspección. No obstante, aunque con temperaturas frías, el invierno de 2017 no ha sido especialmente riguroso en Burgos. Tras la estación primaveral, en julio (Figura 8.4), tampoco se han observado cambios significativos en los morteros.



Figura 8.5 Puesta en obra. Revestimiento CH40LF+1/3MB600 (izquierda) y BAS-C-LF+1/3MB600 (derecha). Octubre 2017.

Finalmente, en octubre (Figura 8.5), tras cumplir un año de su fabricación, se realiza la última inspección visual antes de realizar los ensayos. En ninguno de los casos se observa variaciones significativas en las muestras respecto a la inspección visual anterior.



Figura 8.6 Realización de discos. Muestra CH40EAF+2%MR2100 (izquierda) y BAS-C-EAF (derecha).

Para comprobar cómo ha afectado la climatología a la estabilidad de los enfoscados y revocos se ha realizado el ensayo de resistencia a la adhesión. Sobre la muestra lisa se marcan con la broca hueca siete discos, con el propósito de obtener siete resultados de adherencia para cada mortero (Figura 8.6).

Adherencia de los morteros para revestimiento (MPa)								
	1	2	3	4	5	6	7	Resultado
CH40LF+1/3MB600	0,52	0,61	0,41	0,41	0,41	0,60	0,58	0,52
BAS-C-LF+1/3MB600	0,15	0,12	0,15	0,18	0,19	0,17	0,29	0,19

Tabla 8.1 Adherencia (MPa) para las muestras de la puesta en obra.

Los resultados obtenidos (Tabla 8.1) muestran diferente comportamiento para cada tipo de mortero ensayado. Por una parte, el mortero realizado con cal aérea y cemento presenta una adhesión muy parecida a la obtenida en el ensayo de laboratorio realizado a los 56 días (0,22 MPa), lo que demuestra que este mortero no experimenta alteraciones significativas de adherencia, independientemente de la edad de curado y de su exposición a las inclemencias climáticas.

Se comprueba que la muestra de cal hidráulica incrementa su resistencia a la adhesión, pasando de 0,16 MPa a 0,52 MPa. Este comportamiento puede explicarse por la carbonatación del hidróxido cálcico, que crea puntos de fijación pétreos sobre el soporte, cada vez más resistentes con el paso del tiempo.



Figura 8.7 Muestra CH40LF+1/3MB600 (izquierda) y BAS-C-LF+1/3MB600 (derecha).

Además, según muestra la Figura 8.7, el tipo de rotura ha cambiado en la mayoría de los casos. En los ensayos en laboratorio todas las pruebas han resultado con una rotura de tipo adhesivo, mientras que en la puesta en obra se puede observar en la mayoría de ellas que el tipo de rotura obtenido ha resultado ser cohesiva en el mortero.

Por lo tanto, ambos morteros han mostrado un excelente comportamiento en situación de prestación después de un año de su puesta en obra, lo que garantiza su adherencia a largo plazo.

8.2. FÁBRICA DE ALBAÑILERÍA

La puesta en obra de los morteros para fábrica de ladrillo, CH40EAF+2%MB2100 y BAS-C-EAF, ha consistido en la realización de unidades constructivas de ladrillos cerámicos, utilizando el mortero como elemento de unión.



Figura 8.8 Realización de la fábrica de albañilería. Octubre 2016.

Durante su elaboración (Figura 8.8), los morteros utilizados en fábricas de ladrillo tienen un buen comportamiento, semejante al de los morteros fabricados con materiales tradicionales.

Durante los primeros 28 días de curado, las probetas estuvieron en la cámara humedad en condiciones de humedad y temperatura, tal y como establece la norma. Trascorrido ese periodo de tiempo, permanecen a la intemperie durante un año, expuestas a los ciclos estacionales. Igualmente, para comprobar el efecto del tiempo sobre el material, se realiza una inspección visual cada tres meses, coincidiendo con el cambio de estación.



Figura 8.9 Puesta en obra. Probetas CH40EAF+2%MR2100 (izquierda) y BAS-C-EAF (derecha). Enero 2017.

En el mes de enero de 2017 (Figura 8.9) se realiza la primera inspección visual, con el objetivo de observar cómo han afectado los fenómenos climatológicos al mortero de las juntas en las fábricas. En ambos casos la adherencia a los ladrillos resulta perfecta, presentando el conjunto una estructura uniforme, estable y resistente.



Figura 8.10 Puesta en obra. Probetas CH40EAF+2%MR2100 (izquierda) y BAS-C-EAF (derecha).
Abril 2017.



Figura 8.11 Puesta en obra. Probetas CH40EAF+2%MR2100 (izquierda) y BAS-C-EAF (derecha).
Julio 2017.



Figura 8.12 Puesta en obra. Probetas CH40EAF+2%MR2100 (izquierda) y BAS-C-EAF (derecha).
Octubre 2017.

En ninguna de las inspecciones visuales posteriores (Figura 8.10, Figura 8.11 y Figura 8.12), tras el invierno (abril), la primavera (julio) y el verano (octubre), se observan variaciones significativas en las muestras respecto a la inspección visual anterior.

Finalmente, en octubre, tras cumplir un año de su fabricación, los morteros se ensayan a esfuerzo cortante para determinar la capacidad de unión que establecen las juntas de mortero entre las piezas cerámicas.

Existen otros ensayos que se pueden realizar sobre fábricas de ladrillos para evaluar su comportamiento y determinar sus prestaciones. Sin embargo, se ha optado por realizar este ensayo por ser el único que proporciona información sobre el comportamiento del mortero de unión y no sobre la unidad en conjunto.

Resistencia a cortante de los morteros de fábrica de ladrillos (MPa)					
	1	2	3	4	Resultado
CH40EAF+2%MR2100	0,57	0,24	0,56	0,41	0,43
BAS-C-EAF	0,41	0,68	0,70	0,81	0,66

Tabla 8.2 Resistencia inicial a cortante (MPa) para las muestras de la puesta en obra.

De acuerdo con los resultados obtenidos (Tabla 8.1) se observa un buen comportamiento de los morteros ensayados, con valores de resistencia a cortante mayores a las habituales en los morteros convencionales utilizados en el sentado de fábricas.

Además, como se puede observar en la Figura 8.13 y en la Figura 8.14, la rotura del conjunto ladrillo-mortero se ha producido siempre en la pieza.



Figura 8.13 Rotura de probetas CH40EAF+2%MR2100.



Figura 8.14 Rotura de probetas BAS-C-EAF.

Los morteros de fábrica de ladrillos se han comportado adecuadamente tras el test de puesta en obra realizado, por lo que de nuevo nos aporta más fiabilidad de su comportamiento en estado real con el paso del tiempo.

8.3. CONCLUSIONES

1. Los morteros diseñados para revestimiento de paramentos verticales muestran buen comportamiento frente al paso del tiempo y el cambio de las condiciones meteorológicas. La fijación a la fábrica es buena, sin desprendimientos ni abombamientos, a pesar de la aparición de pequeñas fisuras superficiales. La adherencia mostrada después de un año es mayor a la obtenida en el laboratorio.
2. Los morteros diseñados para rejuntado de fábricas de ladrillo no han experimentado cambios apreciables visualmente. Su aspecto es adecuado, estable y resistente. Su comportamiento frente a esfuerzos cortantes es comparable al de los morteros comerciales convencionales.
3. Tras la experimentación realizada, se puede concluir que los cuatro morteros estudiados muestran propiedades muy similares en referencia a los ensayos realizados en el laboratorio, después de estar expuestos un año a la intemperie, por lo que los resultados obtenidos se pueden considerar fiables.
4. Ninguno de los morteros puestos en obra ha mostrado deterioro por las temperaturas bajas del invierno o los cambios bruscos que se producen en la ciudad de Burgos en verano, pese a no haber superado el ensayo de heladicidad y/o choque térmico en alguno de los casos.



CAPITULO IX

Estudio económico

9. ESTUDIO ECONÓMICO

El objetivo de este capítulo es realizar un estudio que justifique la viabilidad económica de los morteros estudiados.

En primer lugar, se realiza una estimación de los costes de cada uno de los productos finales de esta Tesis Doctoral. Se completa así el estudio de las posibilidades reales de valorización de los residuos siderúrgicos como árido para la fabricación de morteros para albañilería, que utilizan cal como conglomerante.

En segundo lugar, se tiene en cuenta los aspectos cualitativos que se integran en el coste efectivo del material, el beneficio medioambiental que implica el reaprovechamiento de residuos y la disponibilidad del desecho generado en respuesta a una potencial demanda del mercado.

9.1. ESTUDIO ECONÓMICO

El proceso seguido para la fabricación de un mortero industrial terminado se puede dividir en cuatro etapas: recepción y acopio de los materiales, dosificación, mezclado de componentes y obtención del producto acabado²⁷⁶.

La puesta en obra del material no se ha tenido en cuenta, al igual que la dosificación y el mezclado de los componentes, pues el coste es el mismo en todos los casos, sean estos productos reciclados o no. Por ello, para obtener este coste, se tienen en cuenta tres factores críticos en el precio final: el coste de transformación, el coste de las materias primas y el coste del transporte.

9.1.1. Coste de transformación

Antes de proceder a estimar los costes aproximados de la transformación de la escoria de acería en árido siderúrgico, es preciso referir los diferentes procesos previos para que se produzca esta transformación.

A continuación, se muestran los procedimientos seguidos para su reciclado externo o para su reutilización en la planta de producción de acero.

El primer tratamiento consiste en estabilizar la escoria para evitar proceso de expansividad debido a la presencia de cal y magnesia libres. Lo habitual es depositar la escoria en vertederos a la intemperie durante periodos largos de tiempo, periódicamente se somete a una humectación y un volteo, hasta garantizar la hidratación total del CaO y del MgO para

²⁷⁶ Revuelta, M. B. (2008). Hormigones y morteros, Fuego.

evitar los posibles efectos expansivos al transformarse en Portlandita y Brucita.

Sin embargo, se han desarrollado diversos tipos de tratamientos de estabilización acelerada, muy apropiados cuando no se dispone de espacio suficiente para el almacenamiento de la escoria a la intemperie²⁷⁷:

- La inyección de vapor, utilizada en plantas de Japón.
- La adición de sílice, que liga los óxidos de cal y de magnesio libres, desarrollada por ThyssenKrupp Steel y el Instituto de Materiales de Construcción²⁷⁸.
- El proceso BSSF (Baosteel Short Slag treatment Facility) desarrollado por Baosteel a partir de 1995²⁷⁹.

Para el tratamiento de las escorias de Horno Eléctrico de Arco una instalación típica es la utilizada en la planta siderúrgica ABS en Udine (Figura 9.1)²⁸⁰.

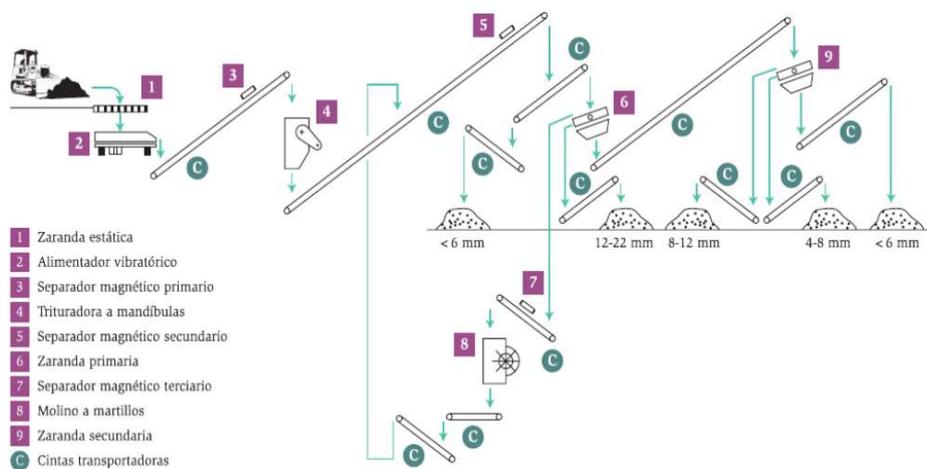


Figura 9.1 Esquema de instalación (recuperación de acero y separación de la escoria en diversas fracciones granulométricas). (Zimolo).

²⁷⁷ Madías, J. (2009). "Reciclado de polvos de horno eléctrico." *Acero Latinoamericano* **23**(513): 38.

²⁷⁸ Drissen, P., A. Ehrenberg, M. Kühn and D. Mudersbach (2009). "Recent development in slag treatment and dust recycling." *steel research international* **80**(10): 737-745.

²⁷⁹ Folleto "BSSF", en www.baosteel.com

²⁸⁰ Zimolo, D. and L. Tomadin (2013). EAF slag recovery turns a waste disposal problem into a business opportunity. 44th ABM Steelmaking Seminar.

Se trata de una instalación altamente automatizada, en la que en diversas etapas se realiza la separación magnética de los fragmentos de colada, el triturado de la escoria y su posterior molienda. Tras este proceso se generan tres productos diferentes de árido: una fracción gruesa entre 8 y 12 mm, una fracción media entre 4 y 8 mm y una fracción fina de menos de 4 mm.

La línea de tratamiento ocupa una superficie de (50 x 80) m, pero se necesita una superficie aun mayor para el almacenaje a la intemperie de todo el material.

Llegados a este punto, puede verse claramente las necesidades que una empresa siderúrgica puede requerir para la transformación del residuo en árido apto para construcción, y de este modo poder repercutir los costes de este tratamiento al precio final del material. A continuación, se presenta un cálculo estimado de los costes totales de producción estableciendo unas premisas iniciales.

Para proceder a estimar económicamente estos parámetros se aplican precios estimados obtenidos de distintas fuentes. En todo caso se pretende una aproximación realista y no un estudio pormenorizado. Para este cálculo se van para tener en cuenta siguientes premisas²⁸¹:

Coste de las instalaciones:

- Se valora la incorporación a una empresa siderúrgica de una planta de tratamiento de escoria, estimando una producción total anual de 100.000 toneladas. Esta planta debe incluir el machaqueo y clasificación por tamaños, estimando un periodo de amortización de las instalaciones de 10 años. El precio estimado de la planta de tratamiento ha sido proporcionado por el departamento comercial de la empresa Maquinaria de Canteras Trimán, S.A.U.
- Para calcular los gastos de amortización a 10 años se aplica un interés fijo del 6%, en base a los datos del Instituto de Crédito Oficial (ICO), sobre préstamos y créditos para empresas y emprendedores del año 2014.

Planta de tratamiento de áridos	2.000.000 €
Amortización (6% a 10% años)	2.640.000 €
Coste de las instalaciones (10 años)	4.460.000 €
<i>Coste anual de las instalaciones</i>	<i>446.000 €</i>

²⁸¹ Campos de la Fuente, P. L. (2016). Reactividad y reciclado de pizarras para su empleo como áridos en construcción, Tesis doctoral, Universidad de Burgos, España.

Coste salarial:

- Para el correcto funcionamiento de la planta se estima la contratación de cuatro nuevos trabajadores (un encargado y tres empleados).
- Los salarios de los empleados necesarios para desarrollar la actividad se estiman teniendo en cuenta los datos de la nota de prensa, publicada en la página web del Instituto Nacional de Estadística (INE), que lleva por título "Decil de salarios del empleo principal. Encuesta de Población Activa (EPA). Año 2015".

Jefe de planta	42.000 €
Empleados (3x25.200)	75.600 €
Seguridad Social	35.280 €
<u>Coste anual salarial</u>	<u>152.880 €</u>

Coste consumo energético:

- Se evalúan de igual modo los cuantiosos gastos energéticos en este tipo de industria. Los parámetros se consideran para el cálculo de consumos energéticos para una producción de 100.000 toneladas anuales, aun suponiendo que los avances de la ingeniería habrán mejorado la eficacia de los procesos, durante el transcurso de los años.
- El precio de combustible se estima como la media de los valores registrados en el año 2016 y se ha obtenido del Informe anual del Ministerio de Industria, Comercio y Turismo. Se toma un valor medio de 1,1 €/L.
- El coste de la energía eléctrica se establece tomando como referencia la última revisión del Mercado Mayorista de Electricidad (OMIE). De acuerdo con esta referencia, se aplica un precio de 39,31 €/kW y año de Término de Potencia.

Potencia instalada (39,31 €/kW y año)		
Tratamiento áridos	530 kW	20.834 €
Gasoil	1,1 €/L	
Secado escoria	4,1 L/t	451.000 €
<u>Coste anual consumo energético</u>		<u>471.834 €</u>

Coste suelo:

- Debido a las amplias posibilidades y precios, no se valora la adquisición de terreno para ubicar las instalaciones. Gracias al beneficio medioambiental que se conseguiría con esta actividad en la zona, se debería estudiar la posibilidad de emplazar las instalaciones en suelo público.

De este modo sí se repercuten todos los gastos calculados, el precio de una tonelada de escoria ascendería a:

<i>Coste anual de las instalaciones</i>	446.000 €
<i>Coste anual salarial</i>	152.880 €
<i>Coste anual consumo energético</i>	471.834 €
<i>Coste anual total</i>	1.070.714 €
<u>Coste por tonelada de escoria</u>	10,70 €/t

9.1.2. Coste del material

Este coste viene condicionado principalmente por el tipo de mezcla obtenida y la proporción de las materias primas que la componen. Los residuos utilizados son materias primas que pueden obtenerse sin ningún coste asociado, tan solo el coste de transformación calculado previamente, ya que se trata de subproductos industriales que constituyen un importante problema de gestión medioambiental.

En la Tabla 9.1 se recogen los costes de las materias primas:

Coste materias primas	
Cemento CEM I 42,5 R ^I	97,07 €/t
Cal aérea CL 90-S ^{II}	70,00 €/t
Cal hidráulica NHL-5 ^{III}	80,00 €/t
Arena silícea 0/2 ^{IV}	16,18 €/t
Filler calizo ^V	34,85 €/t
Escoria blanca LF	10,70 €/t
Escoria negra EAF	10,70 €/t
MasterSeal 600 ^{VI}	8,64 €/Kg
MasterRheobuild 2100 ^{VI}	1,73 €/Kg

^(I) el precio del cemento corresponde a 1 tonelada de cemento a granel.
^(II) el precio de la cal aérea corresponde a 1 tonelada de cal aérea a granel.
^(III) el precio de la cal hidráulica corresponde a 1 tonelada de cal hidráulica a granel.
^(IV) el precio del árido natural corresponde a 1 tonelada de arena de sílice lavada 0/2.
^(V) el precio del filler corresponde a 1 tonelada a granel
^(VI) el precio de los aditivos corresponde a 1 Kg de material suministrado en garrafa. (fuente: BASF Construction Chemicals España, S.L.)

Tabla 9.1 Costes materias primas²⁸².

²⁸² ITeC (2017). Base de precios de la construcción. <https://itec.es/nouBedec.e/bedec.aspx>.

Debido al elevado precio de los aditivos proporcionados por la empresa BASF Construction Chemicals España, S.L., hace que los morteros con aditivo en su dosificación no sean competitivos frente a los morteros convencionales.

Por ello, la primera conclusión que se debe extraer es la necesidad de mejorar las dosificaciones con aditivos más baratos u otro tipo de técnicas, con el fin de conseguir morteros con las mismas prestaciones, pero más atractivos económicamente.

En el caso de los morteros que incorporan el aditivo MasterSeal 600, no son económicamente viables cuando se fabrican en grandes cantidades, por lo que solo se pueden comercializar como soluciones excepcionales, como reparaciones o acciones en los que el factor económico no sea determinante debido a la gravedad del fallo o importancia de la construcción. El mortero dosificado con el aditivo MasterRheobuild 2100 el coste de fabricación no es tan elevado, pero continúa no siendo competitivo.

Sin embargo, si se hace un estudio de estos mismos morteros sin la incorporación de aditivos, se observa que los dosificados con escoria sí pueden ser viables económicamente.

Dosificación en peso 1 m ³ de mortero (Kg)		
	Conglomerante	Árido
CH40NA	624,19 cal hidráulica	889,48 arena silícea 46,81 filler calizo
BAS-C-NA	63,35 cal aérea 190,04 cemento	1444,28 arena silícea 76,01 filler calizo
CH40LF	525,22 cal hidráulica	787,83 escoria blanca
BAS-C-LF	45,07 cal aérea 135,21 cemento	1081,66 escoria blanca
CH40EAF	758,28 cal hidráulica	1137,42 escoria negra
BAS-C-EAF	78,62 cal aérea 235,85 cemento	1886,78 escoria negra

Tabla 9.2 Dosificación de un metro cubico (Kg).

En la Tabla 9.2 se muestra la relación de componentes en peso, para cada una de las dosificaciones referidas a 1 m³ de mortero. De igual modo, se muestra la relación de componentes para los dos morteros de referencia correspondientes, para realizar un estudio comparativo de costes. No se ha incluido la cantidad de agua empleada, ya que su repercusión en el precio final apenas supone del 0,5%.

Precio 1 m ³ de mortero (€)	
CH40NA	65,96
CH40LF	50,45
CH40EAF	72,83
BAS-C-NA	48,90
BAS-C-LF	27,85
BAS-C-EAF	48,59

Tabla 9.3 Coste de los morteros.

La Tabla 9.3 muestra una combinación entre la Tabla 9.1 y Tabla 9.2, en la que se muestra el coste total de las materias primas para 1 m³ de mortero. En ella se observa como los morteros dosificados con escoria blanca si presentan un coste en sus materias primas menor que los morteros fabricados con arena silícica natural. Por el contrario, los morteros fabricados con escoria negra, debido a ser más densos y necesitar más material por metro cubico, no resultan rentables.

9.1.3. Coste de transporte

El coste final de las materias primas se ve directamente afectado por el transporte del lugar de producción del residuo al centro de utilización, y dependiendo de la distancia estimada, puede suponer un coste muy importante, con especial repercusión en el producto elaborado final.

Para realizar un estudio objetivo completo, se han simulado una serie de situaciones, considerando diferentes distancias entre los centros de generación de residuos y los centros de recepción o consumo. Cuanto mayor es la distancia existente entre ambos centros, mayores serán también los costes de transporte del residuo.

Como se ha indicado al comienzo de esta Tesis Doctoral, la industria de la acería en España se agrupa en núcleos geográficos muy concretos, mayoritariamente en la Comunidad Autónoma del País Vasco. Este hecho no permite una distribución homogénea de la escoria producida, al contrario de lo que ocurre con los áridos naturales o los conglomerantes, con plantas de fabricación distribuidas a lo largo de la geografía española.

Cálculo de coste de transporte del residuo				
Opción	Distancia (ida + vuelta) Km	Tiempo desplazamiento (ida/vuelta, carga/descarga) horas	Coste de viaje €	€/tonelada
Opción 1 (50 km):	100	2	106,88	4,45
Opción 2 (100 km):	200	4	213,76	8,90
Opción 3 (150 km):	300	6	320,64	13,36
Opción 4 (200 km):	400	8	427,52	17,81
Opción 5 (300 km):	600	12	641,28	26,72
*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)				53,44 €/h

Tabla 9.4 Cálculo coste transporte del residuo.

Por todo ello, se ha considerado como coste de transporte de la escoria blanca y negra el itinerario desde el lugar de generación del residuo hasta la planta de fabricación del mortero (ida + vuelta), estableciendo unas distancias comparativas de 50 km, 100 km, 150 km, 200 km y 300 km (Tabla 9.4).

Capítulo IX

Esta comparativa no se ha realizado con el resto de las materias primas utilizadas en la fabricación del mortero, ya que es fácil disponer de las mismas (cemento, cal y arena), al estar los centros de producción distribuidos uniformemente por toda la geografía española.

En Tabla 9.5 se estima la distancia máxima para la cual el mortero con árido siderúrgico sigue siendo rentable. Para ello, se repercute el coste de transporte de cada tonelada de árido, tomando como referencia la dosificación de 1 m³ de mortero.

Precio m ³ de mortero con transporte incluido (€)						
		Opción 1 (50 km):	Opción 2 (100 km):	Opción 3 (150 km):	Opción 4 (200 km):	Opción 5 (300 km):
CH40NA	65,96 €					
CH40LF	50,45 €	53,95 €	57,45 €	60,96 €	64,47 €	71,48 €
CH40EAF	72,83 €	77,89 €	82,95 €	88,02 €	93,08 €	103,21 €
BAS-C-NA	48,90 €					
BAS-C-LF	27,85 €	32,66 €	37,47 €	42,29 €	47,10 €	56,73 €
BAS-C-EAF	48,59 €	57,05 €	65,50 €	73,97 €	82,43 €	99,36 €

Tabla 9.5 Cálculo coste del mortero (€) con la repercusión del coste de transformación y transporte del residuo.

En la Figura 9.2 se muestra el área de la geografía española en la cual sería rentable comercializar los morteros en función de los costes de transporte asociados.



Figura 9.2 Área de comercialización del mortero.

La zona marcada de color gris oscuro corresponde a las provincias donde se puede comercializar los morteros con escoria blanca, mientras que la zona gris clara, correspondiente al levante español, zona donde la comercialización de estos morteros supondría un coste mayor que los morteros tradicionales.

Por su parte, solo se podría plantear la comercialización de los morteros de escoria negra en las zonas más cercanas a los centros de generación, pero haciendo un estudio más profundo de su rentabilidad con todos los factores que puedan afectar al precio final del material puesto en el lugar de consumo. En el caso de la Comunidad Autónoma del País Vasco, debido a la gran cantidad de residuo generado, esta comercialización no supondría ningún inconveniente, siendo en esta Comunidad donde más beneficio tanto económico como medioambiental se produciría, tanto en el caso de la escoria blanca como de la negra.

9.2. VALORACIÓN CUALITATIVA

Es difícil establecer cuantitativamente los beneficios que conlleva la valorización de los residuos siderúrgicos, ya que son muchas las variables que se deben considerar para su determinación. Pero es evidente que, en un sentido más amplio, el estudio económico debe también considerar los beneficios cualitativos, referidos a la mejora para el medio ambiente, la eliminación del impacto ambiental que generan y los problemas de contaminación de suelos y acuíferos. Estas consideraciones ya, por sí mismas, son determinantes para buscar soluciones alternativas a su depósito en vertederos y acopios²⁸³.

La valorización de la escoria siderúrgica como árido para la construcción conlleva un beneficio para todas las empresas relacionadas con la producción, la gestión y el uso del residuo.

En la actualidad, la gestión de los residuos siderúrgicos es asumida por las empresas productoras, soportando los costes que genera su acumulación en vertederos, propios o externos. Para evitar este coste de gestión, podría considerarse la opción de transformar y valorizar el residuo como árido siderúrgico. Su valorización podría suponer un beneficio económico considerable para las empresas que lo generan, por el contrario, encarecería el precio final del mortero, como así se ha mostrado en el estudiado.

De igual forma, las empresas consumidoras de la escoria darían un valor añadido al material ofreciendo alternativas sostenibles a sus clientes, con la consiguiente generación de beneficios. Y lo mismo para las empresas consumidoras del mortero final, ya que encontraría una mayor oferta de productos alternativos para sus necesidades.

No obstante, el mayor beneficio lo tendría la propia sociedad, al cerrar el ciclo de la economía circular de las escorias de acería, con el consiguiente beneficio para el medio ambiente y la calidad de vida.

²⁸³ Junco Petrement, C. (2012). Morteros aligerados con residuos de espumas rígidas de poliuretano: obtención, caracterización y puesta en obra. Tesis doctoral, Universidad de Burgos, España.

Para hacer atractivo el uso de las escorias como materia prima para otros procesos industriales, las Administraciones deberían implantar políticas de apoyo e incentivo, orientadas al reciclaje y reutilización de los residuos generados por la industria, en aras de conseguir una economía circular de los procesos²⁸⁴.

Las razones que justifican la utilización de las escorias negras y blancas obtenidas en los procesos de fabricación de acero, en la elaboración de morteros de albañilería, en sustitución de los áridos extraídos de depósitos naturales son las siguientes:

1. Las fundiciones generan entornos muy degradados y deteriorados, con un fuerte impacto paisajístico y altos índices de contaminación en suelos y acuíferos. La reutilización de las escorias sería una buena opción para recuperar los entornos naturales y evitar el impacto ambiental que produce la fabricación del acero.
2. Los terrenos y acopios utilizados como depósitos de las escorias podrían ponerse en valor, bien como solares, zonas de ocio o espacios naturales.
3. Existe un agotamiento de los recursos naturales obtenidos en las canteras, lo que está llevando a una aplicación de normativas cada vez más restrictivas y exigentes por parte de las Administraciones Públicas. La utilización de áridos reciclados de carácter siderúrgico disminuiría la extracción de nuevas materias primas, contribuyendo al desarrollo sostenible de los procesos de fabricación del acero.

9.3. CONCLUSIONES

Respecto al estudio económico:

1. Los morteros definitivos dosificados con aditivos no son viables económicamente, aunque solo se considere el coste de las materias primas.
2. Sin embargo, los morteros dosificados con escoria blanca sin aditivar son rentables, con costes de producción inferiores a los de los morteros tradicionales.
3. El coste de transporte de la escoria permite establecer diferentes escenarios de comercialización en función del punto de consumo del producto. La escoria blanca LF presenta zonas de acción amplias.
4. Los morteros fabricados con escoria negra EAF, no son rentables en todos los casos. Éstos permiten un área de actuación más limitada debido al mayor peso del material, lo que incrementa el precio del

²⁸⁴ Gutiérrez González, S. (2012). Yesos aligerados fabricados a partir de residuos de espumas de poliuretano y polvo de poliamida, Tesis doctoral, Universidad de Burgos, España.

producto final. Su área de actuación quedaría limitada a las zonas más próximas a las plantas generadoras.

Respecto la valoración cualitativa:

5. Aunque los morteros no son rentables en todos los casos estudiados, es preciso considerar los beneficios cualitativos, referidos principalmente a la mejora que la reutilización de las escorias supone para el medio ambiente, la eliminación del impacto ambiental que generan como residuos y los problemas de contaminación de suelos y acuíferos.
6. Para hacer atractivo el uso de las escorias como materia prima para otros procesos industriales, las Administraciones deberían implantar políticas de apoyo e incentivo, orientadas al reciclaje y reutilización de los residuos generados por la industria, para conseguir una economía circular de los procesos con unos precios de comercialización más atractivos.



CAPITULO X

Conclusiones finales y estudios futuros

10. CONCLUSIONES FINALES Y ESTUDIOS FUTUROS

10.1. CONCLUSIONES FINALES

En esta Tesis Doctoral se demuestra que es posible diseñar morteros de cal utilizando escoria blanca LF y escoria negra EAF en sustitución de los áridos naturales.

Las escorias siderúrgicas utilizadas como áridos permiten obtener morteros para su uso en revestimientos o para sentar fábricas de ladrillo, ya sea para construcción de edificios de nueva planta o en rehabilitación.

Las conclusiones recogidas en este capítulo son un resumen de las expuestas anteriormente en cada uno de los apartados objeto de estudio, haciendo mención de los aspectos más relevantes de la investigación desarrollada.

Respecto al material y la fase experimental previa:

1. Debido a las importantes cantidades de escorias que se generan en los procesos de fabricación del acero, es preciso dedicar recursos a la investigación para encontrar alternativas a su depósito en vertederos y valorizarlas como materia prima en otros procesos de fabricación.
2. Las escorias utilizadas en las investigaciones desarrolladas en esta Tesis Doctoral cumplen con las prescripciones de la norma UNE 13139 de áridos para morteros. No obstante, es preciso someterlas a una estabilización previa a su dosificación en mezclas con conglomerantes.
3. De los resultados obtenidos en la investigación se puede concluir que el Método de Análisis Mediante Superficies de Respuesta puede ser utilizado en el estudio de las mezclas con comportamientos mecánicos idóneos, especialmente cuando los valores de resistencia mecánica son singularmente altos.
4. Las resistencias mecánicas de los morteros diseñados varían en función de proporción de cal que sustituye al cemento y de la naturaleza del árido utilizado. Los morteros dosificados con mayores cantidades de cal precisan de un mayor tiempo de curado para garantizar los procesos de carbonatación de hidróxido de calcio, y poder obtener valores fiables de su comportamiento mecánico.
5. Los morteros dosificados con escoria negra muestran un buen comportamiento mecánico, mayor que el observado en los morteros

fabricados con escoria blanca o arena natural, lo que los hace idóneos para su utilización como morteros de albañilería en fábricas resistentes para construcción.

6. En las mezclas fabricadas con escoria blanca las resistencias obtenidas son menores. No obstante, para morteros con grandes cantidades de cal es posible la sustitución de la arena por la escoria blanca, ya que los resultados de resistencia mecánica son adecuados. No es el caso cuando la presencia de cemento es mayor.

Respecto a las propiedades de los morteros bastardos:

7. Los morteros fabricados con escoria blanca son morteros con gran porosidad y baja densidad, que presentan mucha más absorción de agua, tanto por absorción a presión atmosférica como por capilaridad. La escoria blanca no permite obtener una mayor trabajabilidad, a pesar de su baja densidad. La retención de agua está cercana o supera el 80%, límite mínimo con el que trabajan los fabricantes de morteros. En las mezclas preparadas con escoria blanca la dureza superficial y la adherencia son menores.
8. El empleo de escoria blanca en sustitución total del árido natural en la fabricación de morteros precisaría de un estudio más profundo, con la posible inclusión de aditivos para mejorar su comportamiento.
9. Los morteros bastardos dosificados con escoria negra contienen una baja porosidad, lo que hace de ellos unos morteros con gran densidad. Presentan una mayor trabajabilidad al ser manipulados, con una retención de agua del 80%. La permeabilidad de los morteros fabricados con escoria negra es similar a la de los morteros fabricados con árido natural, al igual que su dureza superficial y adherencia.
10. Los morteros bastardos fabricados con escoria negra presentan un mejor comportamiento mecánico, tanto a flexión como compresión, que los dosificados con escoria blanca o con arena natural.
11. El uso de escoria negra en sustitución del árido natural, en la elaboración de morteros bastardos de albañilería es una opción técnicamente viable, ya que los resultados de laboratorio muestran comportamientos aceptables para su utilización en construcción. Sin embargo, resultan ser morteros muy pesados que sería conveniente aligerar.

Respecto a las propiedades de los morteros de cal:

12. Se puede comprobar que cuanto mayor es la cantidad de cal hidráulica dosificada se obtienen mayores resistencias mecánicas, superiores a las de la cal aérea.

13. Las escorias blancas de horno de cuchara utilizadas como árido en la fabricación de morteros de cal aérea precisan mayores cantidades de agua de amasado. Sin embargo, no parece que afecte negativamente a las propiedades de este tipo de mortero, puesto que las resistencias mecánicas son mayores. Son morteros con densidad muy similar a los tradicionales, superior cuando aumenta la proporción de escoria empleada como árido en su composición.
14. La absorción de agua del mortero a presión atmosférica aumenta con la presencia de escoria blanca en los morteros, con registros mayores a los de referencia. En lo que se refiere a las resistencias mecánicas de los morteros con escoria blanca solo son mejoradas en el caso de utilizar cal aérea.
15. Los morteros dosificados con escoria negra tienen una densidad aparente mayor a los morteros patrón y los morteros con escoria blanca. La cantidad de aire ocluido en los morteros no se ve afectada por la presencia de escorias.
16. La escoria negra confiere morteros de cal con resistencias mecánicas mejoradas, tanto con cal aérea como hidráulica, mientras que para la escoria blanca solo se observan incrementos utilizando como conglomerante la cal aérea.

Por todo lo referido, se puede considerar que el mortero experimental analizado elaborado con cal y escoria ofrece resultados prometedores. Un estudio pormenorizado de estos morteros, con dosificaciones alternativas a las consideradas en esta Tesis, podría ser de gran interés.

Respecto a la caracterización de los morteros definitivos:

17. Los morteros con escoria blanca y aireante, CH40LF+1/3MB600 y BAS-C-LF+1/3MB600, son morteros menos densos y con más cantidad de poros, lo que les hace idóneos para el revestimiento de paramentos por su ligereza. De igual modo, son morteros con una resistencia a la adherencia superior a sus morteros patrón. Su alta permeabilidad al agua no les hace aptos para exteriores.
18. Los morteros con escoria negra, CH40EAF+2%MR2100 y BAS-C-EAF son adecuados para ser prescritos como morteros de albañilería, ya que ambos presentan una resistencia a compresión muy elevada, por encima a sus morteros patrón, debido a la incorporación del aditivo y las propias características de la escoria negra.
19. Los morteros para revestimiento CH40LF+1/3MB600 y BAS-C-LF+1/3MB600 son mejores aislantes térmicos que los morteros de fábrica de ladrillos CH40EAF+2%MR2100 y BAS-C-EAF. Todas las muestras ensayadas han de ser consideradas acústicamente muy poco absorbentes.

20. Los morteros definitivos presentan buen comportamiento frente a los agentes agresivos externos, como son la presencia de agua salina, fenómenos de carbonatación acelerada y afección por contaminantes presentes en las atmosferas industriales, y han superado satisfactoriamente los ensayos. Sin embargo, estos morteros no muestran un buen comportamiento cuando están expuestos a ambientes heladizos, propios de zonas frías o de alta montaña.
21. Los morteros confeccionados con escorias negras muestran buen comportamiento en ambientes con presencia de sales y contrastes térmicos de humedad-sequedad elevados. Por el contrario, los morteros dosificados con escoria blanca no soportan estos cambios ambientales.

Respecto al estudio económico:

22. Los morteros definitivos dosificados con aditivos no son viables económicamente, debido al alto coste de los aditivos estudiados.
23. Sin embargo, los morteros dosificados con escoria blanca sin aditivar son rentables, con costes de producción inferiores a los de los morteros tradicionales. Debido al coste del transporte del material, la comercialización de los morteros con escoria blanca presenta una zona muy amplia de influencia.
24. Por el contrario, los morteros fabricados con escoria negra EAF permiten un área de actuación mucho más limitada debido al mayor peso del material, lo que incrementa el precio del producto final por el factor transporte y no son rentables.
25. Es preciso considerar los beneficios cualitativos, referidos principalmente a su valorización para evitar el impacto ambiental como residuo industrial. Para hacer atractivo el uso de las escorias como materia prima para otros procesos industriales, las Administraciones deberían implantar políticas de apoyo e incentivo, para conseguir una economía circular de los procesos.

Se puede afirmar que los objetivos de la investigación de esta Tesis Doctoral se han cumplido. Se han obtenido cuatro morteros elaborados con áridos siderúrgicos adecuados para su utilización en construcción y rehabilitación, con prestaciones semejantes a las de los morteros de referencia elaborados con árido natural.

La utilización de escoria de acería en sustitución de áridos silíceos permite obtener morteros de albañilería para construcción con propiedades equivalentes a las obtenidas con los morteros tradicionales.

Sin embargo, sería conveniente estudiar con más detenimiento el comportamiento de la escoria blanca en los morteros, ya que ésta muestra reacciones que no la hace idónea en todos sus casos, como puede ser la pérdida de resistencia con el paso del tiempo, o su mal comportamiento frente al calor.

Por su parte, sería adecuado fabricar morteros con escoria negra menos densos, lo que mejoraría no solo su trabajabilidad y puesta en obra, si no sus prestaciones y peso de las fábricas finales. Con ello se conseguiría utilizar menos material en las mezclas, lo que permitiría su transporte y comercialización.

10.2. ESTUDIOS FUTUROS

Aunque el estudio del comportamiento de los morteros de cal y bastardos ha sido exhaustivo, en la presente Tesis Doctoral no se ha profundizado en el conocimiento de las características de otro tipo de mortero o diferentes combinaciones de los materiales.

Por ello, se proponen los siguientes Estudios de Investigación:

1. Realizar los diferentes ensayos de caracterización para morteros de cal hidráulica en dosificación 1/6 con el fin de poder comparar el comportamiento con los morteros bastardos. De igual modo, estudiar las posibles combinaciones de cal hidráulica con cemento, apoyándose de nuevo en el Método de Superficies de Respuesta (RSM).
2. Utilizar el Método de Superficies de Respuesta (RSM) para las diferentes dosificaciones de cal aérea e hidráulica. Se podría hacer en K^3 o K^2 .
3. Sería interesante conocer el comportamiento de alguna dosificación idónea con algún tipo de combinación intermedia a las propuestas. La mezcla de alguna cantidad de escoria negra con escoria blanca podría favorecer al comportamiento de esta última en los morteros, al igual que la escoria blanca aligeraría los morteros de escoria negra.
4. Sería posible la utilización de otro tipo de aditivo o adiciones con el objetivo de mejorar alguna de las características de los morteros estudiados.
5. La realización de estudios que permitan conocer los fenómenos de comportamiento de la escoria blanca frente a las altas temperatura y estudiar la evolución de sus propiedades a más largo plazo, tanto en fenómenos de carbonatación como de resistencia a los agentes agresivos.
6. Se podría investigar el comportamiento de los residuos de escoria negra con otro tipo de materiales o residuos poliméricos con el fin de obtener morteros menos densos.



Bibliografía

BIBLIOGRAFÍA

- Adolfsson, D., F. Engström, R. Robinson and B. Björkman (2011). "Cementitious phases in ladle slag." Steel research international **82**(4): 398-403.
- Adolfsson, D., R. Robinson, F. Engström and B. Björkman (2011). "Influence of mineralogy on the hydraulic properties of ladle slag." Cement and concrete research **41**(8): 865-871.
- AENOR (1985). "UNE 102-039-85 Yesos y escayolas de construcción: Determinación de la dureza Shore C y dureza brinell". Madrid, Aenor.
- 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 ISO 6988 Recubrimientos metálicos y otros recubrimientos no orgánicos. Ensayo al dióxido de azufre con condensación general de la humedad", 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 1015-7 Métodos de ensayo de los morteros de albañilería. Parte 7: Determinación del contenido de aire en el 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 para albañilería. Parte 11: Determinación de la resistencia a flexión y a compresión del mortero endurecido". Madrid, Aenor.

Bibliografía

AENOR (2000). "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". Madrid, Aenor.

AENOR (2002). "UNE-EN 12667 Materiales de construcción. Determinación de la resistencia térmica por el método de la placa caliente guardada y el método del medidor de flujo de calor. Productos de alta y media resistencia térmica". Madrid, Aenor.

AENOR (2002). "UNE-EN ISO 10534-2 Acústica. Determinación del coeficiente de absorción acústica y de la impedancia acústica en tubos de impedancia. Parte 2: Método de la función de transferencia.", 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 1052-3 Métodos de ensayo para fábricas de albañilería. Parte 3: Determinación de la resistencia inicial a cortante". Madrid, Aenor.

AENOR (2003). "UNE-EN 1052-3/A1:2008 Métodos de ensayo para fábricas de albañilería. Parte 3: Determinación de la resistencia inicial a cortante". Madrid, Aenor.

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

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

AENOR (2004). "UNE 83509 Hormigones con fibras. Rotura por flexotracción" Madrid, Aenor.

AENOR (2004). "UNE 83510 Hormigones con fibras. Determinación del índice de tenacidad y resistencia a la primera fisura" 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 (2010). "UNE-EN 1744-1 Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos. Parte 1: Análisis químico". Madrid, Aenor.

AENOR (2010). "UNE-EN 13501-1 Clasificación en función del comportamiento frente al fuego de los productos de construcción y elementos para la edificación. Parte 1: Clasificación a partir de datos obtenidos en ensayos de reacción al fuego". Madrid, Aenor.

- AENOR (2010). "UNE 83515 Hormigones con Fibras. Determinación de la resistencia a fisura, tenacidad y resistencia residual a tracción". Madrid, Aenor.
- AENOR (2011). "UNE-EN 459-1. Cales para la construcción. Parte 1: Definiciones, especificaciones y criterios de conformidad". Madrid, Aenor.
- AENOR (2011). "UNE-EN 459-2. Cales para la construcción. Parte 2: Métodos de ensayo". 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 (2011). "UNE-EN ISO 1182 Ensayos de reacción al fuego de productos. Ensayo de no combustibilidad", Madrid, Aenor.
- AENOR (2012). "UNE-EN 459-3. Cales para la construcción. Parte 3: Evaluación de la conformidad". Madrid, Aenor.
- AENOR (2012). "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 (2014). "UNE-EN 14066 Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la resistencia al envejecimiento por choque térmico", Madrid, Aenor.
- AFAM (2004). Guía Morteros Especiales, Asociación Nacional de Fabricantes de Morteros.
- Aitcin, P. (1994). "Durable concrete--current practice and future trends." Special Publication 144: 85-104.
- Alyamac, K. E., E. Ghafari and R. Ince (2017). "Development of eco-efficient self-compacting concrete with waste marble powder using the response surface method." Journal of Cleaner Production 144: 192-202.
- Amaral De Lima, L. (1999). Hormigones con escorias de horno eléctrico como áridos: propiedades, durabilidad y comportamiento ambiental, Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona.
- ANEFA (2015). "Presentación." Revista anual Anefa 2014-2015(Asociación Nacional de Empresarios Fabricantes de Áridos).
- ANEFA (2017). "Datos básicos del sector." Revista anual Anefa 2016 - 2017(Asociación Nacional de Empresarios Fabricantes de Áridos).
- Angelopoulos, P., H. Evangelaras and C. Koukouvinos (2009). "Small, balanced, efficient and near rotatable central composite designs." Journal of Statistical Planning and Inference 139(6): 2010-2013.

Bibliografía

- Arribas García, I. (2011). Estudio y diseño de hormigones estructurales basados en la incorporación de subproductos siderúrgicos: viabilidad tecnológica, Tesis Doctoral, Universidad del País Vasco, España.
- Ashurst, J. (1984). Mortars, plasters and renders in conservation, Ecclesiastical architects' and surveyors' association.
- 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.
- Atkinson, M. F. (2003). Structural defects reference manual for low-rise buildings, CRC Press.
- Avci, H., H. Ghorbanpoor, I. B. Topcu and M. Nurbas (2017). "Investigation and Recycling of Paint Sludge with Cement and Lime for Producing Lightweight Construction Mortar." Journal of Environmental Chemical Engineering.
- Babaki, M., M. Yousefi, Z. Habibi and M. Mohammadi (2017). "Process optimization for biodiesel production from waste cooking oil using multi-enzyme systems through response surface methodology." Renewable Energy **105**: 465-472.
- Babu, K. G. and D. S. Babu (2003). "Behaviour of lightweight expanded polystyrene concrete containing silica fume." Cement and Concrete Research **33**(5): 755-762.
- Barca, C., C. Gérente, D. Meyer, F. Chazarenc and Y. Andrès (2012). "Phosphate removal from synthetic and real wastewater using steel slags produced in Europe." Water research **46**(7): 2376-2384.
- Barra, M., E. Ramonich and M. Munoz (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, University of Durham.
- Benavente, D., M. G. a. del Cura and S. Ordóñez (2003). "Salt influence on evaporation from porous building rocks." Construction and building materials **17**(2): 113-122.
- Benavente, D., J. Martínez-Martínez, N. Cueto and M. García-del-Cura (2007). "Salt weathering in dual-porosity building dolostones." Engineering geology **94**(3): 215-226.
- Bonenfant, D., L. Kharoune, S. Sauve, R. Hausler, P. Niquette, M. Mimeault and M. Kharoune (2008). "CO2 sequestration potential of steel slags at ambient pressure and temperature." Industrial & engineering chemistry research **47**(20): 7610-7616.
- Bosela, P., N. Delatte, R. Obratil and A. Patel (2009). "Propiedades para firmes del hormigón fabricado con áridos siderúrgicos." Carreteras: Revista técnica de la Asociación Española de la Carretera(166): 55-66.
- Bouasker, M., N. E. H. Khalifa, P. Mounanga and N. B. Kahla (2014). "Early-age deformation and autogenous cracking risk of slag–limestone filler-cement blended binders." Construction and Building Materials **55**: 158-167.
- Brundtland, G., M. Khalid, S. Agnelli, S. Al-Athel, B. Chidzero, L. Fadika, V. Hauff, I. Lang, M. Shijun and M. M. de Botero (1987). "Our common future."

- Bustos, G. (2004). Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes. M. d. Fomento.
- Butler, A., D. Leek and R. Johnson (2000). "The potential for using some alternative aggregates in structural concrete." Structural Engineer **78**(22).
- Caggiano, A., M. Cremona, C. Faella, C. Lima and E. Martinelli (2012). "Fracture behavior of concrete beams reinforced with mixed long/short steel fibers." Construction and Building Materials **37**: 832-840.
- Campos de la Fuente, P. L. (2016). Reactividad y reciclado de pizarras para su empleo como áridos en construcción, Tesis doctoral, Universidad de Burgos, España.
- Campos, P., J. Gadea, J. Soriano, A. Martin and V. Calderon (2010). "Alkali-silica and alkali-silicate reactivity in slates." Estudios Geologicos-Madrid **66**(1): 91-98.
- Cano Guillén, J. J., E. Garzón Garzón and B. Marín Valiño (2000). La cal como aglomerante. Almería, Servicio de Publicaciones de la Universidad de Almería.
- Cao, J. and D. Chung (2002). "Damage evolution during freeze–thaw cycling of cement mortar, studied by electrical resistivity measurement." Cement and Concrete Research **32**(10): 1657-1661.
- Cao, M., C. Zhang, H. Lv and L. Xu (2014). "Characterization of mechanical behavior and mechanism of calcium carbonate whisker-reinforced cement mortar." Construction and Building Materials **66**: 89-97.
- Cao, W. and Q. Yang (2014). "Properties of a Carbonated Steel Slag-Slaked Lime Mixture." Journal of Materials in Civil Engineering **27**(1): 04014115.
- Casco, A. G. (2007). Morteros de Construcción y Ornamentación [<http://www.ugr.es/~agcasco/personal/restauracion/teoria/TEMA04.htm>], Universidad de Granada.
- 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.
- Comité, A. (2001). Control de la Fisuración en estructuras de hormigón.
- Courard, L., A. Darimont, M. Schouterden, F. Ferauche, X. Willem and R. Degeimbre (2003). "Durability of mortars modified with metakaolin." Cement and Concrete Research **33**(9): 1473-1479.
- Cuesta, I., M. Lorenzo and J. Alegre (2014). "Response surface application for estimating failure time and other creep properties using the Small Punch Creep Test." Engineering Failure Analysis **45**: 49-58.
- Cultrone, G. and E. S. Pardo "Deterioro en Muros de Edificios Ocasionado por Eflorescencias Salinas."
- Cunha, G., A. C. Andrade, J. M. M. Souza, A. C. J. Evangelista and V. C. Almeida (2010). Characterization of Civil Construction Waste and its Incorporation to Mortar. Materials Science Forum, Trans Tech Publ.

Bibliografía

- Charola, A. E. (2004). Stone deterioration in historic buildings and monuments. Proceedings of the 10th International congress on Deterioration and Conservation of Stone; Vol. 1, ICOMOS Sweden.
- Chávez-Valencia, L., C. Hernández-Barriga and A. Manzano-Ramírez (2011). "Pavement aging model by response surface modeling." Ingeniería, investigación y tecnología **12(4)**: 373-382.
- Chidiac, S. E. (2009). "Sustainability of civil engineering structures—Durability of concrete." Cement and Concrete Composites **31(8)**: 513-514.
- Cho, J.-S., K.-Y. Moon, M.-K. Choi, K.-H. Cho, J.-W. Ahn and K.-S. Yeon (2017). "Performance improvement of local Korean natural hydraulic lime-based mortar using inorganic by-products." Korean Journal of Chemical Engineering **34(5)**: 1385-1392.
- Choisy, A. (2006). Arte de construir en Egipto, Reverte.
- De la Fuente Alonso, J. A. (2016). Comportamiento del hormigón con áridos siderúrgicos (EAF) reforzado con fibras, Tesis doctoral, Universidad de Burgos, España.
- del Río Merino, M., P. Izquierdo Gracia and I. S. Weis Azevedo (2010). "Sustainable construction: construction and demolition waste reconsidered." Waste management & research **28(2)**: 118-129.
- DIN (1997). "DIN 50018 Sulfur dioxide corrosion testing in a saturated atmosphere", Berlin, Deutsches Institut für Normung.
- Drizo, A., C. Forget, R. P. Chapuis and Y. Comeau (2006). "Phosphorus removal by electric arc furnace steel slag and serpentinite." Water Research **40(8)**: 1547-1554.
- Duić, N. (2015). Configuration-'Climate action, environment, resource efficiency and raw materials'. 6th PC meeting for the Specific Programme implementing Horizon 2020.
- Elsen, J. (2006). "Microscopy of historic mortars—a review." Cement and Concrete Research **36(8)**: 1416-1424.
- Enfedaque, A., J. Gálvez and F. Suárez (2015). "Analysis of fracture tests of glass fibre reinforced cement (GRC) using digital image correlation." Construction and Building Materials **75**: 472-487.
- Etxeberria, M., C. Pacheco, J. Meneses and I. Berridi (2010). "Properties of concrete using metallurgical industrial by-products as aggregates." Construction and Building Materials **24(9)**: 1594-1600.
- EUROSLAG. The European Association representing metallurgical slag producers and processors. [<http://www.euroslag.com/>].
- Fernández, Á. V. (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.
- Frías, M., R. Vigil de la Villa, R. García, M. I. Sánchez de Rojas and A. Juan Valdés (2013). "The influence of slate waste activation conditions on

mineralogical changes and pozzolanic behavior." Journal of the American Ceramic Society **96**(7): 2276-2282.

Furlan, V. (1996). "Causes, mechanisms and measurement of damage in cultural heritage materials. The state of the art: mortars, bricks and rendering." LCP publications 1975-1995: Matériaux de construction. Pierre. Pollution atmosphérique. Peinture murale: 75-83.

Furlan, V. and P. Bissegger (1975). Les mortiers anciens. Histoire et essais d'analyse scientifique, na.

Gadea, J., M. A. Salas, S. Gutiérrez-González, A. Rodríguez, M. Horgnies and V. Calderón (2013). "Permeability and porosity on lightweight mortars fabricated with polyamide powder wastes." Advanced Materials Research **687**: 527-531.

Gadea, J., J. Soriano, A. Martín, P. Campos, A. Rodríguez, C. Junco, I. Adán and V. Calderón (2010). "The alkali-aggregate reaction for various aggregates used in concrete." Materiales de Construcción **60**(299): 69-78.

Garate Rojas, I. (2002). Artes de la Cal, Instituto español de Arquitectura, Madrid.

García-Cuadrado, J. (2014). Análisis de las propiedades a fractura de morteros bastardos fabricados con residuos siderúrgicos para su uso en construcción, Escuela Politécnica Superior. Universidad Politécnica de Burgos, Spain.

García-Cuadrado, J., S. Gutiérrez-González, I. Santamaria-Vicario and A. Rodríguez, & Calderón, V. (En revisión). "Characterization of lime-cement mortars manufactured with steel-making waste aggregate and the study of their properties by means of response surface methodology." Construction and Building Materials.

García-Cuadrado, J., A. Rodríguez, I. Cuesta, V. Calderón and S. Gutiérrez-González (2017). "Study and analysis by means of surface response to fracture behavior in lime-cement mortars fabricated with steelmaking slags." Construction & Building Materials **138**: 204-213.

García, O., A. Fernandez, F. Azconegui, M. Martín, P. Cascos and A. Díaz (1998). Guía práctica de la cal y el estuco,. León, Editorial de los Oficios.

Garofano, I., M. Robador and A. Duran (2014). "Materials characteristics of Roman and Arabic mortars and stuccoes from the Patio de Banderas in the Real Alcazar of Seville (Spain)." Archaeometry **56**(4): 541-561.

Gautier, M., J. Poirier, F. Bodénan, G. Franceschini and E. Veron (2013). "Basic oxygen furnace (BOF) slag cooling: laboratory characteristics and prediction calculations." International Journal of Mineral Processing **123**: 94-101.

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

González Cortina, M. and L. D. Villanueva Domínguez (2002). "Morteros hidráulicos de cal y chamota." Materiales de Construcción **52**(266): 65-76.

González, I. J. (2008). Efecto de los ciclos de humedad-sequedad en el deterioro de rocas ornamentales que contienen minerales de la arcilla, Editorial de la Universidad de Granada.

Bibliografía

- Gourdin, W. H. and W. D. Kingery (1975). "The beginnings of pyrotechnology: Neolithic and Egyptian lime plaster." Journal of Field Archaeology **2**(1-2): 133-150.
- Green, K., M. A. Carter, W. Hoff and M. Wilson (1999). "The effects of lime and admixtures on the water-retaining properties of cement mortars." Cement and concrete research **29**(11): 1743-1747.
- Guardia Olmedo, J. J., I. Valverde Palacios, M. Martín Morales, J. L. Piqueras Sala and B. M. Castilla Rodríguez "BUILDING MATERIALS II: TECHNOLOGY OF MATERIALS."
- Gupta, V. K., S. Agarwal, M. Asif, A. Fakhri and N. Sadeghi (2017). "Application of response surface methodology to optimize the adsorption performance of a magnetic graphene oxide nanocomposite adsorbent for removal of methadone from the environment." Journal of Colloid and Interface Science **497**: 193-200.
- Gutiérrez-González, S., J. Gadea, A. Rodríguez, C. Junco and V. Calderón (2012). "Lightweight plaster materials with enhanced thermal properties made with polyurethane foam wastes." Construction and Building Materials **28**(1): 653-658.
- Gutiérrez González, S. (2012). Yesos aligerados fabricados a partir de residuos de espumas de poliuretano y polvo de poliamida, Tesis doctoral, Universidad de Burgos, España.
- Hassibi, M. (1999). Una perspectiva general del apagado de la cal y los factores que afectan al proceso. 3rd Synopsium Internacional Sorbalit.
- Hsu, T. T., F. O. Slate, G. M. Sturman and G. Winter (1963). Microcracking of plain concrete and the shape of the stress-strain curve. Journal Proceedings.
- Huang, M., B. Huang, S. Lin, B. Huang and Y. Chen (2016). Preparation and performance of calcium-rich activated carbon monolith cemented by sticky rice-lime mortar, Chemistry and Industry of Forest Products. **36**(6): 16-22.
- IHOBE, S. (1999). Libro Blanco de minimización de residuos y emisiones de escorias de acería, Sociedad Pública de Gestión Ambiental, Departamento de Ordenación del Territorio, Vivienda y Medio Ambiente del Gobierno Vasco.
- Ince, C., S. Derogar and T. Michelitsch (2015). "Influence of supplementary cementitious materials on water transport kinetics and mechanical properties of hydrated lime and cement mortars." Materiales de Construcción **65**(318): 056.
- Jawed, I., J. Skalny and J. Young (1983). Structure and Performance of Cements, edited by P. Barnes, Applied science publishers.
- Junco, C., J. Gadea, A. Rodríguez, S. Gutiérrez-González and V. Calderón (2012). "Durability of lightweight masonry mortars made with white recycled polyurethane foam." Cement and Concrete Composites **34**(10): 1174-1179.
- Junco Petrement, C. (2012). Morteros aligerados con residuos de espumas rígidas de poliuretano: obtención, caracterización y puesta en obra, Tesis doctoral, Universidad de Burgos, España.
- Kambole, C., P. Paige-Green, W. Kupolati, J. Ndambuki and A. Adeboje (2017). "Basic oxygen furnace slag for road pavements: A review of material

- characteristics and performance for effective utilisation in southern Africa." Construction and Building Materials **148**: 618-631.
- Khmiri, A., M. Chaabouni and B. Samet (2013). "Chemical behaviour of ground waste glass when used as partial cement replacement in mortars." Construction and building materials **44**: 74-80.
- Kim, H.-S., K.-S. Kim, S. S. Jung, J. I. Hwang, J.-S. Choi and I. Sohn (2015). "Valorization of electric arc furnace primary steelmaking slags for cement applications." Waste Management **41**: 85-93.
- Kim, J. J., T. Fan, M. M. R. Taha and N. G. Shrive (2012). "The effect of damage and creep interaction on the behaviour of masonry columns including interface debonding and cracking." Materials and structures **45**(1-2): 15-29.
- Kirilovica, I., L. Gulbe, I. Vitina and S. Igaune-Blumberga (2015). Chemical Characterization of Lime-Based Binders in Historic Buildings of Latvia. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, IOP Publishing.
- Kourounis, S., S. Tsivilis, P. Tsakiridis, G. Papadimitriou and Z. Tsibouki (2007). "Properties and hydration of blended cements with steelmaking slag." Cement and Concrete Research **37**(6): 815-822.
- Landforms, E. S. P. (1999). "Salt weathering: influence of evaporation rate, supersaturation and crystallization pattern." Earth Surf. Process. Landforms **24**: 191-209.
- Lasso, P. R. O., C. M. P. Vaz, A. C. d. C. Bernardi, C. R. d. Oliveira and O. O. S. Bacchi (2013). "Evaluation of correction of soil acidity with recycled construction and demolition debris." Revista Brasileira de Ciência do Solo **37**(6): 1659-1668.
- Lavalle, J. (1853). "Recherches sur la formation lente des cristaux à la température ordinaire." Compte Rend. Acad. Sci.(Paris) **36**: 493-495.
- Li, Q., H. Ding, A. Rahman and D. He (2016). "Evaluation of Basic Oxygen Furnace (BOF) material into slag-based asphalt concrete to be used in railway substructure." Construction and Building Materials **115**: 593-601.
- Ling, T.-C., C.-S. Poon and S.-C. Kou (2011). "Feasibility of using recycled glass in architectural cement mortars." Cement and Concrete Composites **33**(8): 848-854.
- López, V. O. (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, Tesis doctoral, Universidad de Burgos, España.
- Losañez González, M. (2005). Aprovechamiento integral de escorias blancas y negras de acería eléctrica en construcción y obra civil, Tesis Doctoral, Universidad del País Vasco, España.
- Luxán, M., 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 **30**(4): 517-519.
- Maghool, F., A. Arulrajah, S. Horpibulsuk and Y.-J. Du (2016). "Laboratory Evaluation of Ladle Furnace Slag in Unbound Pavement-Base/Subbase Applications." Journal of Materials in Civil Engineering: 04016197.

Bibliografía

- Mahdi, F., H. Abbas and A. Khan (2010). "Strength characteristics of polymer mortar and concrete using different compositions of resins derived from post-consumer PET bottles." Construction and Building Materials **24**(1): 25-36.
- Maher, A. and D. Darwin (1982). Mortar constituent of concrete in compression. Journal Proceedings.
- Mahoutian, M., Y. Shao, A. Mucci and B. Fournier (2015). "Carbonation and hydration behavior of EAF and BOF steel slag binders." Materials and Structures **48**(9): 3075-3085.
- Malinowski, R. (1982). "Ancient mortars and concretes: Aspects of their durability." History of Technology London **7**: 89-100.
- Malinowski, R. and Y. Garfinkel (1991). "Prehistory of concrete." Concrete International **13**(3).
- Manso, J. M. (2001). "Fabricación de hormigón hidráulico con escoria negra de Horno Eléctrico de Arco", Tesis doctoral, Universidad de Burgos, España.
- Manso, J. M., M. Losañez, J. A. Polanco and J. J. Gonzalez (2005). "Ladle furnace slag in construction." Journal of materials in civil engineering **17**(5): 513-518.
- Manso, J. M., J. A. Polanco, M. Losanez and J. J. González (2006). "Durability of concrete made with EAF slag as aggregate." Cement and Concrete Composites **28**(6): 528-534.
- Manso, J. M., Á. Rodríguez, Á. Aragón and J. J. Gonzalez (2011). "The durability of masonry mortars made with ladle furnace slag." Construction and Building Materials **25**(8): 3508-3519.
- Maraghechi, H., S. Salwocki and F. Rajabipour (2017). "Utilisation of alkali activated glass powder in binary mixtures with Portland cement, slag, fly ash and hydrated lime." Materials and Structures **50**(1): 16.
- Marco, J., E. García, M. Más, V. Alcaraz and A. Luizaga (2012). "Estudio de la resistencia a compresión de morteros fabricados con conglomerante compuesto de polvo de vidrio." Informes de la Construcción **64**(528): 529-536.
- Martin, A., J. Y. Pastor, A. Palomo and A. F. Jiménez (2015). "Mechanical behaviour at high temperature of alkali-activated aluminosilicates (geopolymers)." Construction and Building Materials **93**: 1188-1196.
- Matos, A. M. and J. Sousa-Coutinho (2012). "Durability of mortar using waste glass powder as cement replacement." Construction and Building Materials **36**: 205-215.
- Mehta, P. and P. Monteiro (1987). "Effect of aggregate, cement, and mineral admixtures on the microstructure of the transition zone." MRS Online Proceedings Library Archive **114**.
- Meier, A., N. Gremaud and A. Steinfeld (2005). "Economic evaluation of the industrial solar production of lime." Energy conversion and management **46**(6): 905-926.

- Menéndez, G., V. Bonavetti and E. Irassar (2003). "Strength development of ternary blended cement with limestone filler and blast-furnace slag." Cement and Concrete Composites **25**(1): 61-67.
- Ministerio-Fomento (2008). "Anejo 13." Índice de contribución de la estructura a la sostenibilidad.
- 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.
- Ministerio_de_Vivienda (2006). "Código Técnico de la Edificación. DB-SE-F."
- Montani, R. (2000). "La carbonatación, enemigo olvidado del concreto." Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, AC-Revista Construcción y Tecnología.-México.-Diciembre.
- Morino, K. and E. Iwatsuki (2001). Properties of concrete using electric arc furnace oxidizing slag aggregates. JSCE second international conference on engineering materials, California, USA.
- Motz, H. and J. Geiseler (2001). "Products of steel slags an opportunity to save natural resources." Waste Management **21**(3): 285-293.
- Mtarfi, N., Z. Rais, M. Taleb and K. Kada (2016). "Effect of fly ash and grading agent on the properties of mortar using response surface methodology." Journal of Building Engineering **127**: 59-68.
- Müller, U. and M. I. C. Kanan (2005). "The micro structure of traditional brazilian lime plasters - The custom house of florianopolis." MA Cincotto, DA da Silva, J. de Oliveira, Figura **25**.
- Muñoz-Ruiperez, C., A. Rodríguez, S. Gutiérrez-González and V. Calderón (2016). "Lightweight masonry mortars made with expanded clay and recycled aggregates." Construction and Building Materials **118**: 139-145.
- Naceur, H., S. Ben-Elechi, J. Batoz and C. Knopf-Lenoir (2008). "Response surface methodology for the rapid design of aluminum sheet metal forming parameters." Materials & Design **29**(4): 781-790.
- Navrátilová, E. and P. Rovnaníková (2016). "Pozzolanic properties of brick powders and their effect on the properties of modified lime mortars." Construction and Building Materials **120**: 530-539.
- 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 Sci. Bull. Ser. B **69**(2): 99-108.
- Nixon, P. (1976). "The use of materials from demolition in construction." Resources Policy **2**(4): 276-283.
- Norma, N. (1991). "FL-90." Muros resistentes de fábrica de ladrillo: 206-207.
- Nóvoa, P., M. Ribeiro, A. Ferreira and A. Marques (2004). "Mechanical characterization of lightweight polymer mortar modified with cork granulates." Composites science and technology **64**(13): 2197-2205.

Bibliografía

- Oliveira, M. A., M. Azenha, P. B. Lourenço, A. Meneghini, E. T. Guimarães, F. Castro and D. Soares (2017). "Experimental analysis of the carbonation and humidity diffusion processes in aerial lime mortar." Construction and Building Materials **148**: 38-48.
- Oluwasola, E. A., M. R. Hainin and M. M. A. Aziz (2015). "Evaluation of asphalt mixtures incorporating electric arc furnace steel slag and copper mine tailings for road construction." Transportation Geotechnics **2**: 47-55.
- Pahlavan, P., S. Manzi, M. T. Rodriguez-Estrada and M. C. Bignozzi (2017). "Valorization of spent cooking oils in hydrophobic waste-based lime mortars for restorative rendering applications." Construction and Building Materials **146**: 199-209.
- Palomar, I. and G. Barluenga (2017). "Assessment of lime-cement mortar microstructure and properties by P-and S-ultrasonic waves." Construction and Building Materials **139**: 334-341.
- Panesar, D. and B. Shindman (2012). "The mechanical, transport and thermal properties of mortar and concrete containing waste cork." Cement and Concrete Composites **34**(9): 982-992.
- Parrott, L. (1987). A review of carbonation in reinforced concrete.
- 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 **181**(1): 938-948.
- Patural, L., P. Marchal, A. Govin, P. Grosseau, B. Ruot and O. Deves (2011). "Cellulose ethers influence on water retention and consistency in cement-based mortars." Cement and Concrete Research **41**(1): 46-55.
- Pavía, S. and M. Aly (2016). "Influence of aggregate and supplementary cementitious materials on the properties of hydrated lime (CL90s) mortars." Materiales de Construcción **66**(324): 104.
- Pellegrino, C. and V. Gaddo (2009). "Mechanical and durability characteristics of concrete containing EAF slag as aggregate." Cement and Concrete Composites **31**(9): 663-671.
- Peng, J., M. Chen and J. Zhang (2002). "Study on waste expanded polystyrene as lightweight aggregate for thermal insulating mortar." Journal of Building Materials **5**: 166.
- Penttala, V. (2006). "Surface and internal deterioration of concrete due to saline and non-saline freeze–thaw loads." Cement and Concrete Research **36**(5): 921-928.
- Pineda, P., A. García-Martínez and D. Castizo-Morales (2017). "Environmental and structural analysis of cement-based vs. natural material-based grouting mortars. Results from the assessment of strengthening works." Construction & Building Materials **138**: 528-547.
- Pineda, P., M. Robador and J. Perez-Rodriguez (2013). "Characterization and repair measures of the medieval building materials of a Hispanic–Islamic construction." Construction and Building Materials **41**: 612-633.

- Planas, J., G. Guinea, J. Galvez, B. Sanz, A. Fathy and J. Planas (2007). "Indirect tests for stress-crack opening curve." Final Report of RILEM Technical Committee TC: 13-29.
- Ploger, R. R. (1947). An Investigation of the Compressive Strength of Concrete in which Concrete Rubble was Used as Aggregate, Cornell University.
- 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 **108**(2).
- Polión, M. V. (1992). Los diez libros de arquitectura, Ediciones Akal.
- Powers, T. C. (1945). A working hypothesis for further studies of frost resistance of concrete. Journal Proceedings.
- Powers, T. C. and R. Helmuth (1953). Theory of volume changes in hardened portland-cement paste during freezing. Highway research board proceedings.
- 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, Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, España.
- Prieto, M., A. Cobo, A. Rodríguez and V. Calderón (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**: 188-194.
- Prieto, M. I., A. Cobo, Á. Rodríguez and M. de las Nieves González (2014). "The efficiency of surface-applied corrosion inhibitors as a method for the repassivation of corroded reinforcement bars embedded in ladle furnace slag mortars." Construction and building materials **54**: 70-77.
- Puertas, M., F. Blanco and S. Palomo (1989). "Microestructura del hormigón-Influencia sobre sus propiedades." Instituto de Ciencias de la construcción Eduardo Torroja. Madrid(398).
- Qian, G., D. Sun, J. Tay and Z. Lai (2002). "Hydrothermal reaction and autoclave stability of Mg bearing RO phase in steel slag." British ceramic transactions **101**(4): 159-164.
- Ramonich, E. V. and M. Barra (2001). "Reactivity and expansion of electric arc furnace slag in their application in construction." Materiales de Construcción **51**(263-264): 137-148.
- Reardon, E. and R. Fagan (2000). "The calcite/portlandite phase boundary: enhanced calcite solubility at high pH." Applied Geochemistry **15**(3): 327-335.
- Rebeiz, K. S., A. S. Banko and A. P. Craft (1995). "Thermal properties of polymer mortar using recycled PET and fly ash." Journal of materials in civil engineering **7**(2): 129-133.
- Reis, J. and E. Carneiro (2012). "Evaluation of PET waste aggregates in polymer mortars." Construction and Building Materials **27**(1): 107-111.

Bibliografía

- Rena, C. Y., H. Cifuentes, I. Rivero, G. Ruiz and X. Zhang (2016). "Dynamic fracture behaviour in fibre-reinforced cementitious composites." Journal of the Mechanics and Physics of Solids **93**: 135-152.
- Rezaifar, O., M. Hasanzadeh and M. Gholhaki (2016). "Concrete made with hybrid blends of crumb rubber and metakaolin: Optimization using Response Surface Method." Construction and Building Materials **123**: 59-68.
- Rice, J. (1968). "A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks." Journal of Applied mechanics **35**: 379-386.
- Robador, M., F. Arroyo and J. Perez-Rodriguez (2014). "Study and restoration of the Seville City Hall façade." Construction and Building Materials **53**: 370-380.
- Robador, M. D. and J. L. Pérez-Rodríguez (2015). "Analysis, diagnosis, consolidation and water repellent treatment of the Burgos Cathedral stone." European Journal of Science and Theology **11**(5): 285-296.
- Roberts, M. (1981). Carbonation of concrete made with dense natural aggregates, Building Research Establishment.
- Rodríguez-Mora, O. (2003). Morteros: guía general, AFAM, Asociación Nacional de Fabricantes de Mortero.
- Rodríguez-Navarro, C., E. Sebastian, E. Doehne and W. S. Ginell (1998). "The role of sepiolite-palygorskite in the decay of ancient Egyptian limestone sculptures." Clays and clay minerals **46**(4): 414-422.
- Rodríguez, A. (2008). Fabricación de morteros de albañilería con escoria blanca de horno cuchara y su utilización en construcción, Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Burgos, España.
- Rodríguez, A., V. Calderón, S. Gutierrez, J. Gadea, J. Garabito and C. Junco (2013). "Manufacture of Masonry Mortars with Melamine Powder Waste and Melamine Paper from the Manufacture of Agglomerated Particle Boards." Advanced Materials Research **687**: 538-543.
- Rodríguez, A., P. L. Campos, J. Garabito, J. García and I. Santamaría (2015). "Manufacture of high-performance concrete made with powdered polyester resin waste and carboxylic-ester based superplasticizer." Advanced Materials Research **1129**: 523-529.
- Rodríguez, A., S. Gutiérrez-González, M. Horgnies and V. Calderón (2013). "Design and properties of plaster mortars manufactured with ladle furnace slag." Materials & Design **52**: 987-994.
- Rodríguez, A., S. Gutiérrez-González, M. Prieto, A. Cobo and V. Calderón (2015). "Analysis of long-term corrosion behavior in mortars containing recycled ladle furnace slag using computerized tomography and SEM." Materials and Corrosion **66**(3): 199-205.
- Rodríguez, Á., J. M. Manso, Á. Aragón and J. J. Gonzalez (2009). "Strength and workability of masonry mortars manufactured with ladle furnace slag." Resources, conservation and recycling **53**(11): 645-651.

- Rodríguez, M., C. M. López Garello, I. Carol and F. C. Caner (2009). Meso-mechanical analysis of the fracture of concrete specimens in mixed mode. X International Conference on Computational Plasticity.
- Roselló, J., L. Soriano, M. P. Santamarina, J. L. Akasaki, J. Monzó and J. Payá (2017). "Rice straw ash: A potential pozzolanic supplementary material for cementing systems." Industrial Crops and Products **103**: 39-50.
- Rostamiyan, Y., A. Fereidoon, M. Rezaeiashtiyani, A. H. Mashhadzadeh and A. Salmankhani (2015). "Experimental and optimizing flexural strength of epoxy-based nanocomposite: Effect of using nano silica and nano clay by using response surface design methodology." Materials & Design **69**: 96-104.
- 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. Barcelona.
- Saad, M. and H. Tahir (2017). "Synthesis of carbon loaded γ -Fe₂O₃ nanocomposite and their applicability for the selective removal of binary mixture of dyes by ultrasonic adsorption based on response surface methodology." Ultrasonics Sonochemistry **36**: 393-408.
- Safeen, W., S. Hussain, A. Wasim, M. Jahanzaib, H. Aziz and H. Abdalla (2016). "Predicting the tensile strength, impact toughness, and hardness of friction stir-welded AA6061-T6 using response surface methodology." The International Journal of Advanced Manufacturing Technology **87**(5-8): 1765-1781.
- Sagar, R. V., R. Prasad, B. R. Prasad and M. Rao (2013). "Microcracking and fracture process in cement mortar and concrete: a comparative study using acoustic emission technique." Experimental Mechanics **53**(7): 1161-1175.
- Sala, E., C. Zanotti, C. Passoni and A. Marini (2016). "Lightweight natural lime composites for rehabilitation of Historical Heritage." Construction and Building Materials **125**: 81-93.
- Salas García, M. Á. (2014). Morteros aligerados con propiedades mejoradas fabricados con residuos de poliamida, Tesis doctoral, Universidad de Burgos, España.
- Salas, M., J. Gadea, S. Gutiérrez-González, M. Horgnies and V. Calderón (2016). "Recycled polyamide mortars modified with non-ionic surfactant: physical and mechanical strength after durability tests." Materials and Structures **49**(8): 3385-3395.
- San-José Lombera, J. T. and J. Cuadrado Rojo (2010). "Industrial building design stage based on a system approach to their environmental sustainability." Construction and Building Materials **24**(4): 438-447.
- Sánchez-Moral, S., J. García-Guinea, L. Luque, R. González-Martín and P. López-Arce (2004). "Cinética de carbonatación de morteros experimentales de cal de tipo romano." Mater. Construcc **54**(275): 23-37.
- Sánchez, F. J. A. (2002). Historia, caracterización y restauración de morteros, Universidad de Sevilla.

Bibliografía

- Santamaría-Vicario, I. (2015). Fabricación de morteros de albañilería con escoria negra de horno eléctrico de arco EAF y escoria Blanca de horno de cuchara LF, Tesis doctoral, Universidad de Burgos, España.
- Santamaría-Vicario, I., A. Rodríguez-Saiz, J. García-Cuadrado, C. Junco-Petremont and S. Gutiérrez-González (2017). "The influence of porosity on the behaviour in humid environments of mortars made with steelmaking slags and additives." DYNA **92**(2): 220-225.
- Santamaría-Vicario, I., A. Rodríguez, S. Gutiérrez-González and V. Calderón (2015). "Design of masonry mortars fabricated concurrently with different steel slag aggregates." Construction and Building Materials **95**: 197-206.
- Santamaría-Vicario, I., A. Rodríguez, C. Junco, S. Gutiérrez-González and V. Calderón (2016). "Durability behavior of steelmaking slag masonry mortars." Materials & Design **97**: 307-315.
- Santamaría, A., A. Orbe, M. Losañez, M. Skaf, V. Ortega-Lopez and J. J. González (2017). "Self-compacting concrete incorporating electric arc-furnace steelmaking slag as aggregate." Materials & Design **115**: 179-193.
- Santamaría, A., E. Rojí, M. Skaf, I. Marcos and J. J. González (2016). "The use of steelmaking slags and fly ash in structural mortars." Construction and Building Materials **106**: 364-373.
- Schoenberger, H. (2001). Final draft: best available techniques reference document on the production of iron and steel, European IPPC Bureau.
- Setién, J., D. Hernández and J. González (2009). "Characterization of ladle furnace basic slag for use as a construction material." Construction and Building Materials **23**(5): 1788-1794.
- Shah, S. and F. Slate (1968). "Internal microcracking, mortar-aggregate bond and the stress-strain curve of concrete."
- Shah, S. P. and G. Winter (1966). Inelastic behavior and fracture of concrete. Journal Proceedings.
- Shi, C. (2004). "Steel slag—its production, processing, characteristics, and cementitious properties." Journal of Materials in Civil Engineering **16**(3): 230-236.
- Shu, C.-Y., W.-T. Kuo and C.-U. Juang (2016). "Analytical model of expansion for electric arc furnace oxidizing slag-containing concrete." Computers and Concrete **18**(5): 937-950.
- Sideris, K. K., C. Tassos and A. Chatzopoulos (2015). "Production of durable self-compacting concrete using ladle furnace slag (LFS) as filler material." Procedia Engineering **108**: 592-597.
- 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."
- Skaf, M., J. M. Manso, Á. Aragón, J. A. Fuente-Alonso and V. Ortega-López (2017). "EAF slag in asphalt mixes: A brief review of its possible re-use." Resources, Conservation and Recycling **120**: 176-185.

- Skaf Revenga, M. (2016). Efectos de la incorporación de escorias de acería a mezclas bituminosas drenantes, Tesis doctoral, Universidad de Burgos, España.
- Song, H.-W., C.-H. Lee and K. Y. Ann (2008). "Factors influencing chloride transport in concrete structures exposed to marine environments." Cement and Concrete Composites **30**(2): 113-121.
- Souza, L. d. F. and H. Mansur (2004). "Production and characterization of ceramic pieces obtained by slip casting using powder wastes." Journal of Materials Processing Technology **145**(1): 14-20.
- Spooner, D. (1972). "The stress-strain relationship for hardened cement pastes in compression." Magazine of Concrete Research **24**(79): 85-92.
- Srivastava, S. and R. Garg (2017). "Process parameter optimization of gas metal arc welding on IS: 2062 mild steel using response surface methodology." Journal of Manufacturing Processes **25**: 296-305.
- Taber, S. (1916). "The growth of crystals under external pressure." American Journal of Science(246): 532-556.
- Tomasiello, S. and M. Felitti (2010). "EAF slag in self-compacting concretes." Facta universitatis-series: Architecture and Civil Engineering **8**(1): 13-21.
- Torres, I. and G. Matias (2016). "Sustainable mortars for rehabilitation of old plasters." Engineering Structures **129**: 11-17.
- Tossavainen, M., F. Engstrom, Q. Yang, N. Menad, M. L. Larsson and B. Bjorkman (2007). "Characteristics of steel slag under different cooling conditions." Waste management **27**(10): 1335-1344.
- Tsakiridis, P., G. Papadimitriou, S. Tsvivilis and C. Koroneos (2008). "Utilization of steel slag for Portland cement clinker production." Journal of Hazardous Materials **152**(2): 805-811.
- Tutikian, B., M. Nunes, L. Leal and L. Marquette (2012). "Impact sound insulation of lightweight concrete floor with EVA waste." Building Acoustics **19**(2): 75-88.
- UNESID Unión de Empresas siderúrgicas. [<http://www.unesid.org>].
- Valdehita Roselló, M. T. (1976). Morteros de cemento para albanilería, Patronato de Investigación Científica y Técnica "Juan de la Cierva" del Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Instituto Eduardo Torroja de la Construcción y del Cemento.
- Valluzzi, M. R., L. Binda and C. Modena (2005). "Mechanical behaviour of historic masonry structures strengthened by bed joints structural repointing." Construction and Building Materials **19**(1): 63-73.
- Van Balen, K. and D. Van Gemert (1994). "Modelling lime mortar carbonation." Materials and structures **27**(7): 393-398.
- Villoria-Sáez, P., C. Porrás-Amores and M. del Río Merino (2015). "New quantification proposal for construction waste generation in new residential constructions." Journal of Cleaner Production **102**: 58-65.

Bibliografía

- Villoria-Saez, P., V. W. Tam, M. del Río Merino, C. V. Arrebola and X. Wang (2016). "Effectiveness of greenhouse-gas Emission Trading Schemes implementation: a review on legislations." Journal of Cleaner Production **127**: 49-58.
- Villoria Sáez, P., M. del Río Merino, A. S.-A. González and C. Porras-Amores (2013). "Best practice measures assessment for construction and demolition waste management in building constructions." Resources, Conservation and Recycling **75**: 52-62.
- Visakh, P., S. Thomas, K. Oksman and A. P. Mathew (2012). "Crosslinked natural rubber nanocomposites reinforced with cellulose whiskers isolated from bamboo waste: Processing and mechanical/thermal properties." Composites Part A: Applied Science and Manufacturing **43**(4): 735-741.
- Wang, R. and C. Meyer (2012). "Performance of cement mortar made with recycled high impact polystyrene." Cement and Concrete Composites **34**(9): 975-981.
- Wendler, E. (1997). "New materials and approaches for the conservation of stone." Environmental Sciences Research Reportes **20**: 181-198.
- Wendler, E., A. Charola and B. Fitzner (1996). Easter Island tuff: Laboratory studies for its consolidation. 8th international congress on deterioration and conservation of stone. Moller Druck und Verlag, Berlin.
- World-Steel-Association (2016). World Steel in Figures 2016.
- Xu, S., J. Wang, Q. Jiang and S. Zhang (2016). "Study of natural hydraulic lime-based mortars prepared with masonry waste powder as aggregate and diatomite/fly ash as mineral admixtures." Journal of Cleaner Production **119**: 118-127.
- Xu, S. and Y. Zhu (2009). "Experimental determination of fracture parameters for crack propagation in hardening cement paste and mortar." International Journal of Fracture **157**(1): 33-43.
- Xue, P., D. He, A. Xu, Z. Gu, Q. Yang, F. Engström and B. Björkman (2017). "Modification of industrial BOF slag: Formation of MgFe₂O₄ and recycling of iron." Journal of Alloys and Compounds **712**: 640-648.
- Xue, Y., H. Hou and S. Zhu (2009). "Characteristics and mechanisms of phosphate adsorption onto basic oxygen furnace slag." Journal of Hazardous Materials **162**(2): 973-980.
- Yildirim, I. Z. and M. Prezzi (2011). "Chemical, mineralogical, and morphological properties of steel slag." Advances in Civil engineering **2011**.
- Zarzosa Tartilán, R. (2012). Fabricación de morteros de cal con escorias blancas de horno cuchara, Escuela Politécnica Superior. Universidad Politécnica de Burgos, España.
- Zhao, H. and W. Sun (2012). "Effect of Cathode Ray Tubes Glass Sand as Fine Aggregate on Properties of Mortar." Journal of the Chinese Ceramic Society **40**(2): 240-246.

Zhao, Z., S. H. Kwon and S. P. Shah (2008). "Effect of specimen size on fracture energy and softening curve of concrete: Part I. Experiments and fracture energy." Cement and Concrete Research **38**(8): 1049-1060.

Zhou, X., S. H. Ghaffar, W. Dong, O. Oladiran and M. Fan (2013). "Fracture and impact properties of short discrete jute fibre-reinforced cementitious composites." Materials & Design **49**: 35-47.

Zimolo, D. and L. Tomadin (2013). EAF slag recovery turns a waste disposal problem into a business opportunity. 44th ABM Steelmaking Seminar.



ANEXO

Índice de tablas, gráficos y figuras

ANEXO: ÍNDICE DE TABLAS, GRÁFICOS Y FIGURAS

Índice de tablas

Tabla 2.1 Porcentaje de producción de acero por Comunidades Autónomas (2007). (UNISED).	17
Tabla 2.2 Producción de escoria en Europa (2010). (EUROSLAG).	18
Tabla 2.3 Estimación orientativa de la generación de escoria en España.	19
Tabla 2.4 Composición química escoria negra EAF española.	24
Tabla 2.5 Composición química escoria blanca LF española.	25
Tabla 2.6 Composición química escoria negra EAF. (Yildirim y Prezzi). ..	25
Tabla 2.7 Composición química escoria blanca LF. (Yildirim y Prezzi). ..	26
Tabla 2.8 Composición mineralógica escoria negra EAF. (Yildirim y Prezzi).	27
Tabla 2.9 Composición mineralógica escoria blanca LF. (Yildirim y Prezzi).	27
Tabla 2.10 Características físicas de las escorias.	28
Tabla 3.1 Matriz de experimentos.	57
Tabla 3.2 Límites superior e inferior de tamaño de árido. (AENOR).	59
Tabla 3.3 Requisitos granulométricos para el filler del árido. (AENOR). ..	60
Tabla 3.4 Limite del contenido de finos. (AENOR).	60
Tabla 4.1 Certificado de características técnicas CEM I 42,5 R. Certificado ER: ER-0572/1998.	107
Tabla 4.2 Componentes del cemento referidos al núcleo del cemento, excluido el regulador de fraguado. Fábrica Mataporquera (Cantabria).	107
Tabla 4.3 Análisis químico del cemento CEM I 42,5 R.	108
Tabla 4.4 Tipos de cales calcáreas. (AENOR).	108
Tabla 4.5 Requisitos químicos para la cal calcárea. (AENOR).	109
Tabla 4.6 Características químicas de la cal. (Calcasa).	110
Tabla 4.7 Tipos de cales hidráulicas naturales. (AENOR).	110

Anexo

Tabla 4.8 Resistencia a compresión para la cal hidráulica natural expresada como valores característicos. (AENOR).....	110
Tabla 4.9 Requisitos químicos para la cal hidráulica natural expresados como valores característicos. (AENOR).....	111
Tabla 4.10 Características químicas de la cal hidráulica natural. (Calcasa).....	112
Tabla 4.11 Requisitos físico-mecánicos de los áridos según EHE. (Ministerio de Fomento).....	113
Tabla 4.12 Limitaciones químicas de los áridos según EHE.....	113
Tabla 4.13 Características de la arena. (AIMSA).....	114
Tabla 4.14 FRX Arena. (AIMSA).....	115
Tabla 4.15 Caracterización física escoria blanca LF. (A. Rodríguez)...	116
Tabla 4.16 Caracterización química escoria blanca LF. (A. Rodríguez).....	117
Tabla 4.17 Composición química escoria blanca LF. Equipo Philips PW1480.....	117
Tabla 4.18 Microanálisis por energía dispersa de rayos X. Escoria blanca LF.....	118
Tabla 4.19 Difracción de rayos X (DRX) escoria blanca LF. Equipo Philips PW1830.....	119
Tabla 4.20 Caracterización física escoria negra EAF. (Grupo Etxeberria).....	121
Tabla 4.21 Composición química de la escoria negra. (Grupo Etxeberria).....	122
Tabla 4.22 Fluorescencia de rayos X. Escoria negra (EAF). Equipo Philips PW1480.....	122
Tabla 4.23 Microanálisis por energía dispersa de rayos X. Escoria negra EAF.....	124
Tabla 4.24 Difracción de Rayos X. Escoria negra EAF. Equipo Philips PW1830.....	124
Tabla 4.25 Características de los aditivos empleados.....	126
Tabla 4.26 Análisis microbiológico. Año 2015. (Servicio de Aguas).....	127
Tabla 4.27 Análisis fisicoquímico. Año 2015. (Servicio de Aguas).....	128
Tabla 5.1 Parámetros variables en el estudio de experimentos.....	134
Tabla 5.2 Diseño propuesto para obtener la superficie de la respuesta de cada uno de los coeficientes.....	135
Tabla 5.3 Parámetros variables en el rango [-1,1] para los tres planes de experimentación de morteros.....	136

Tabla 5.4	Dosificaciones y nomenclatura utilizada para los morteros estudiados en la fase de experimentación previa.	136
Tabla 5.5	Dosificaciones y nomenclatura utilizada para los morteros estudiados en la fase de experimentación previa.	137
Tabla 5.6	Línea granulométrica utilizada.	138
Tabla 5.7	Resumen de propiedades en estado fresco de los morteros estudiados.	140
Tabla 5.8	Resumen de propiedades en estado endurecido de los morteros estudiados.	142
Tabla 5.9	Tabla de resultados al ensayo de Tenacidad a la Fractura (BAS-A-NA con edad 7 días).	146
Tabla 5.10	Resultados obtenidos (F, U y G) para el ensayo de Tenacidad a la Fractura.	147
Tabla 5.11	Resultados obtenidos (F, U y G) para el ensayo de Tenacidad a la Fractura.	147
Tabla 5.12	Resultados obtenidos (F, U y G) para el ensayo de Tenacidad a la Fractura.	148
Tabla 5.13	Coefficientes de regresión y valor de R^2 (%) para las superficies de respuesta de	149
Tabla 5.14	Comparativa de resultados de Tenacidad a la Fractura para el	151
Tabla 5.15	Comparativa de resultados de Tenacidad a la Fractura para el	152
Tabla 5.16	Comparativa de resultados de Tenacidad a la Fractura para el	153
Tabla 5.17	Resumen de resultados de Energía de Fractura (J/m^2) para los morteros estudiados.	154
Tabla 5.18	Tabla de resultados al ensayo de Resistencia a Compresión (BAS-A-NA con edad 7 días).	159
Tabla 5.19	Resultados obtenidos para el ensayo de Resistencia a Compresión (MPa).	159
Tabla 5.20	Resultados obtenidos para el ensayo de Resistencia a Compresión (MPa).	159
Tabla 5.21	Resultados obtenidos para el ensayo de Resistencia a Compresión (MPa).	160
Tabla 5.22	Coefficientes de regresión y valor de R^2 para el ensayo de Resistencia a Compresión.	160
Tabla 5.23	Comparativa de resultados de Resistencia a Compresión (MPa) para el	161

Anexo

Tabla 5.24 Comparativa de resultados de Resistencia a Compresión (MPa) para el.....	162
Tabla 5.25 Comparativa de resultados de Resistencia a Compresión (MPa) para el.....	163
Tabla 5.26 Resumen de resultados de Resistencia a Compresión (MPa) para los morteros estudiados.....	164
Tabla 6.1 Dosificaciones y nomenclatura utilizada para los morteros bastardos.....	172
Tabla 6.2 Nuevas relaciones cal/árido estudiadas.....	173
Tabla 6.3 Dosificaciones y nomenclatura utilizada para los morteros realizados	174
Tabla 6.4 Relación agua/conglomerante de los morteros bastardos. ..	175
Tabla 6.5 Relación agua/cal de los morteros de cal aérea e hidráulica.	177
Tabla 6.6 Densidad aparente en estado fresco (kg/m^3) de los morteros bastardos.....	178
Tabla 6.7 Densidad aparente en estado fresco (Kg/m^3) de los morteros de cal aérea e hidráulica.....	180
Tabla 6.8 Cantidad de aire ocluido (%) de los morteros bastardos.	182
Tabla 6.9 Cantidad de aire ocluido (%) de los morteros de cal aérea e hidráulica.	184
Tabla 6.10 Tiempo de utilización (minutos) de los morteros bastardos.	186
Tabla 6.11 Tiempo de utilización de los morteros de cal estudiados. ..	187
Tabla 6.12 Retención de agua (%) de los morteros bastardos.....	189
Tabla 6.13 Retención de agua de los morteros de cal aérea e hidráulica.	191
Tabla 6.14 Densidad aparente en estado endurecido (kg/m^3) de los morteros bastardos.	192
Tabla 6.15 Densidad aparente del mortero endurecido (kg/m^3) de los morteros de cal aérea e hidráulica.	194
Tabla 6.16 Absorción de agua a presión atmosférica (%) de los morteros bastardos.....	196
Tabla 6.17 Absorción de agua a presión atmosférica (%) de los morteros de cal aérea e hidráulica.	197
Tabla 6.18 Absorción de agua por capilaridad ($\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0,5})$) de los morteros bastardos.	198

Tabla 6.19 Absorción de agua por capilaridad ($\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0.5})$) de los morteros de cal aérea e hidráulica.	200
Tabla 6.20 Coeficiente de permeabilidad al vapor de agua (μ) de los morteros bastardos.	202
Tabla 6.21 Coeficiente de permeabilidad al vapor de agua (μ) de los morteros de cal aérea e hidráulica.	203
Tabla 6.22 Evolución de la dureza superficial (%) de los morteros bastardos.	205
Tabla 6.23 Dureza superficial (%) de los morteros bastardos (56 días).	207
Tabla 6.24 Evolución de la dureza superficial (%) de los morteros de cal aérea e hidráulica.	208
Tabla 6.25 Dureza superficial (%) de los morteros de cal aérea e hidráulica (56 días).	210
Tabla 6.26 Evolución de la resistencia a flexión (MPa) de los morteros bastardos.	211
Tabla 6.27 Resistencia a flexión (MPa) de los morteros bastardos (56 días).	213
Tabla 6.28 Evolución de la resistencia a flexión (MPa) de los morteros de cal aérea e hidráulica.	215
Tabla 6.29 Resistencia a flexión (MPa) de los morteros de cal aérea e hidráulica (56 días).	216
Tabla 6.30 Evolución de la resistencia a compresión (MPa) de los morteros bastardos.	218
Tabla 6.31 Resistencia a compresión (MPa) de los morteros bastardos (56 días).	221
Tabla 6.32 Evolución de la Resistencia a Compresión (MPa) de los morteros de cal aérea e hidráulica.	223
Tabla 6.33 Resistencia a compresión (MPa) de los morteros de cal aérea e hidráulica (56 días).	224
Tabla 6.34 Adherencia (MPa) de los morteros bastardos.	226
Tabla 6.35 Adherencia (MPa) de los morteros de cal aérea e hidráulica.	228
Tabla 7.1 Selección de los morteros bastardos.	235
Tabla 7.2 Selección de los morteros de cal.	236
Tabla 7.3 Resumen de propiedades de los morteros mejorados con aditivos.	238
Tabla 7.4 Propiedades en estado fresco de los morteros definitivos. ..	240
Tabla 7.5 Propiedades en estado endurecido de los morteros definitivos.	242

Anexo

Tabla 7.6 Resistencias mecánicas de los morteros definitivos (56 días).	245
Tabla 7.7 Porosimetría de intrusión de mercurio PIM.....	246
Tabla 7.8 Conductividad Térmica (W/mK) de los morteros definitivos.	255
Tabla 7.9 Comparativo de la Conductividad Térmica por los dos métodos de ensayo.....	256
Tabla 7.10 Resultados obtenidos del ensayo de reacción al fuego.	259
Tabla 7.11 Variación del volumen aparente tras el ensayo de heladicidad de los morteros definitivos.	262
Tabla 7.12 Variación de la Resistencia a Compresión tras el ensayo de heladicidad	263
Tabla 7.13 Variación del peso seco tras el ensayo de choque térmico de los morteros definitivos.	267
Tabla 7.14 Variación de la Resistencia a Compresión tras el ensayo de choque térmico.....	268
Tabla 7.15 Variación del peso seco tras el ensayo de carbonatación acelerada de los morteros definitivos.	272
Tabla 7.16 Variación de la Resistencia a Compresión tras el ensayo de carbonatación acelerada.....	273
Tabla 7.17 Profundidad de carbonatación tras el ensayo de carbonatación acelerada.....	276
Tabla 7.18 Variación del peso seco tras el ensayo de agua salina de los morteros definitivos.	280
Tabla 7.19 Variación de la Resistencia a Compresión tras el ensayo de agua salina .	281
Tabla 7.20 Variación del peso seco tras el ensayo Kesternich de los morteros definitivos.	285
Tabla 7.21 Variación de la Resistencia a Compresión tras el ensayo Kesternich de los morteros definitivos.	286
Tabla 7.22 Variación del peso seco tras el ensayo de cristalización de sales de los morteros definitivos.....	290
Tabla 7.23 Variación de la Resistencia a Compresión tras el ensayo cristalización de sales	291
Tabla 8.1 Adherencia (MPa) para las muestras de la puesta en obra.	301
Tabla 8.2 Resistencia inicial a cortante (MPa) para las muestras de la puesta en obra.	305
Tabla 9.1 Costes materias primas.....	313
Tabla 9.2 Dosificación de un metro cubico (Kg).	314
Tabla 9.3 Coste de los morteros.	314

Tabla 9.4 Cálculo coste transporte del residuo	315
Tabla 9.5 Cálculo coste del mortero (€) con la repercusión del coste de transformación.....	316

Índice de gráficos

Gráfico 1.1 Consumo de áridos (millones de toneladas) para la construcción 1980 – 2017 (previsión). (ANEFA).	3
Gráfico 1.2 Consumo de áridos por habitante y año (toneladas) en Europa. (ANEFA).	4
Gráfico 2.1 Evolución de la producción mundial de acero bruto (1950-2015). (World Steel Association).	16
Gráfico 2.2 Comparativo de la producción mundial de acero año 2005 (izquierda) y 2015 (derecha).	16
Gráfico 5.1 Línea granulométrica utilizada.	139
Gráfico 5.2 Curvas fuerza-desplazamiento (BAS-A-NA con edad de 7 días).	146
Gráfico 5.3 Comparativa de resultados de Tenacidad a la Fractura para el.....	151
Gráfico 5.4 Comparativa de resultados de Tenacidad a la Fractura para el.....	152
Gráfico 5.5 Comparativa de resultados de Tenacidad a la Fractura para el.....	153
Gráfico 5.6 Gráfica de Contornos y Superficie de Respuesta Energía de Fractura (G _{4,8}),	156
Gráfico 5.7 Gráfica de Contornos y Superficie de Respuesta Energía de Fractura (G _{4,8}),	156
Gráfico 5.8 Gráfica de Contornos y Superficie de Respuesta Energía de Fractura (G _{4,8}),	156
Gráfico 5.9 Gráfica de Contornos y Superficie de Respuesta Energía de Fractura (G _{4,8}),	157
Gráfico 5.10 Gráfica de Contornos y Superficie de Respuesta Energía de Fractura (G _{4,8}),	157
Gráfico 5.11 Gráfica de Contornos y Superficie de Respuesta Energía de Fractura (G _{4,8}),	157
Gráfico 5.12 Comparativa de resultados de Resistencia a Compresión (MPa) para el.....	162
Gráfico 5.13 Comparativa de resultados de resistencia a compresión (MPa) para el.....	162
Gráfico 5.14 Comparativa de resultados de Resistencia a Compresión (MPa) para el.....	163

Anexo

Gráfico 5.15	Gráfica de Contornos y Superficie de Respuesta Resistencia a Compresión (R.Comp.),	165
Gráfico 5.16	Gráfica de Contornos y Superficie de Respuesta Resistencia a Compresión (R.Comp.),	165
Gráfico 5.17	Gráfica de Contornos y Superficie de Respuesta Resistencia a Compresión (R.Comp.),	165
Gráfico 5.18	Gráfica de Contornos y Superficie de Respuesta Resistencia a Compresión (R.Comp.),	166
Gráfico 5.19	Gráfica de Contornos y Superficie de Respuesta Resistencia a Compresión (R.Comp.),	166
Gráfico 5.20	Gráfica de Contornos y Superficie de Respuesta Resistencia a Compresión (R.Comp.),	166
Gráfico 6.1	Relación agua/conglomerante de los morteros bastardos.	176
Gráfico 6.2	Relación agua/cal en los morteros de cal aérea e hidráulica.	177
Gráfico 6.3	Densidad en estado fresco (kg/m^3) de los morteros bastardos.....	179
Gráfico 6.4	Relación entre la densidad en estado fresco (kg/m^3) y la cantidad de agua de amasado de los morteros bastardos.	180
Gráfico 6.5	Densidad aparente en estado fresco (kg/m^3) de los morteros de cal aérea e hidráulica.....	181
Gráfico 6.6	Relación entre la densidad en estado fresco (kg/m^3) y la cantidad de agua de amasado de los morteros de cal aérea e hidráulica.....	181
Gráfico 6.7	Cantidad de aire ocluido (%) de los morteros bastardos. ..	183
Gráfico 6.8	Relación existente entre densidad aparente del mortero fresco (kg/m^3) y cantidad de aire ocluido (%) de los morteros bastardos.....	184
Gráfico 6.9	Cantidad de aire ocluido (%) en los morteros de cal aérea e hidráulica.	185
Gráfico 6.10	Comparativo densidad aparente del mortero fresco (kg/m^3) y cantidad de aire ocluido (%).	185
Gráfico 6.11	Tiempo de utilización (min) de los morteros bastardos....	187
Gráfico 6.12	Tiempo de utilización (min) de los morteros de cal.	188
Gráfico 6.13	Retención de agua (%) de los morteros bastardos.	190
Gráfico 6.14	Retención de agua (%) de los morteros de cal área e hidráulica.	191

Gráfico 6.15 Densidad en estado endurecido (kg/m^3) de los morteros bastardos.....	193
Gráfico 6.16 Comparativo densidad aparente del mortero endurecido (kg/m^3) y cantidad de aire ocluido (%) de los morteros bastardos.....	193
Gráfico 6.17 Densidad aparente en estado endurecido (kg/m^3) de los morteros de cal aérea e hidráulica.	194
Gráfico 6.18 Comparativo densidad aparente del mortero endurecido (kg/m^3) y cantidad de aire ocluido (%) de los morteros de cal aérea y cal hidráulica.	195
Gráfico 6.19 Absorción de agua a presión atmosférica (%) de los morteros bastardos.	196
Gráfico 6.20 Absorción de agua a presión atmosférica (%) de los morteros de cal aérea e hidráulica.	197
Gráfico 6.21 Succión de agua por capilaridad de los morteros bastardos.	199
Gráfico 6.22 Absorción de agua por capilaridad ($\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0.5})$) de los morteros de cal aérea e hidráulica.	200
Gráfico 6.23 Flujo de vapor de agua (kg/seg) de los morteros bastardos (de arriba a abajo: Árido Natural, Escoria Blanca y Escoria Negra).	201
Gráfico 6.24 Coeficiente de permeabilidad al vapor de agua (μ) de los morteros bastardos.	202
Gráfico 6.25 Flujo de vapor de agua (kg/seg) de los morteros de cal aérea (izquierda) e hidráulica (derecha) (de arriba a abajo: Árido Natural, Escoria Blanca y Escoria Negra).....	203
Gráfico 6.26 Coeficiente de permeabilidad al vapor de agua (μ) de los morteros de cal aérea e hidráulica.	204
Gráfico 6.27 Evolución de la dureza superficial de los morteros bastardos.....	206
Gráfico 6.28 Dureza superficial (%) de los morteros bastardos (56 días).	208
Gráfico 6.29 Evolución de la dureza Shore C (%) de los morteros de cal aérea (izquierda) e hidráulica (derecha) (de arriba a abajo: Árido Natural, Escoria Blanca y Escoria Negra).....	209
Gráfico 6.30 Dureza superficial de los morteros de cal aérea e hidráulica (56 días).	210
Gráfico 6.31 Evolución de la resistencia a flexión (MPa) de los morteros bastardos.....	212

Gráfico 6.32 Resistencia a flexión (MPa) de los morteros bastardos (56 días).	214
Gráfico 6.33 Evolución de la resistencia a flexión (MPa) de los morteros de cal aérea (izquierda) e hidráulica (derecha) (de arriba a abajo: Árido Natural, Escoria Blanca y Escoria Negra).	216
Gráfico 6.34 Resistencia a flexión (MPa) de los morteros de cal aérea e hidráulica (56 días).....	217
Gráfico 6.35 Evolución de la resistencia a compresión (MPa) de los morteros bastardos	220
Gráfico 6.36 Resistencia a compresión de los morteros bastardos (56 días).	221
Gráfico 6.37 Evolución de la resistencia a compresión (MPa) de los morteros de cal aérea (izquierda) e hidráulica (derecha) (de arriba a abajo: Árido Natural, Escoria Blanca y Escoria Negra).	223
Gráfico 6.38 Resistencia a compresión (MPa) de los morteros de cal aérea e hidráulica (56 días).	225
Gráfico 6.39 Adherencia (MPa) de los morteros bastardos (56 días). .	227
Gráfico 6.40 Adherencia (MPa) de los morteros de cal estudiados (56 días).	228
Gráfico 7.1 Comparación de la densidad en estado fresco (kg/m^3) (izquierda) y cantidad de aire ocluido (%) (derecha) con la relación agua/conglomerante de los morteros definitivos. .	240
Gráfico 7.2 Trabajabilidad (minutos) (izquierda) y retención de agua (%) (derecha).....	241
Gráfico 7.3 Densidad en estado endurecido (kg/m^3) (izquierda) y absorción de agua (%).....	243
Gráfico 7.4 Succión de agua ($\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0,5})$) (izquierda) y coeficiente de permeabilidad (μ) (derecha).....	243
Gráfico 7.5 Resistencia mecánica a flexión y compresión (MPa) (izquierda) y Adherencia (MPa) (derecha) de los morteros definitivos.	245
Gráfico 7.6 Volumen intrusivo acumulado.....	247
Gráfico 7.7 Curvas derivadas del volumen intrusivo.	247
Gráfico 7.8 Distribución del volumen total de poros.....	248
Gráfico 7.9 Gráfico de temperaturas para los morteros CH40LF+1/3MB600 (izquierda)	256
Gráfico 7.10 Gráfico de temperaturas para los morteros CH40EAF+2%MR2100 (izquierda)	256

Gráfico 7.11 Coeficiente de absorción para la muestra 1 y 2 del mortero CH40LF+1/3MB600.	258
Gráfico 7.12 Coeficiente de absorción para la muestra 1 y 2 del mortero BAS-C-LF+1/3MB600.	258
Gráfico 7.13 Coeficiente de absorción para la muestra 1 y 2 del mortero CH40EAF+2%MB2100.	258
Gráfico 7.14 Coeficiente de absorción para la muestra 1 y 2 del mortero BAS-C-EAF.	258
Gráfico 7.15 Comparativo del volumen aparente tras el ensayo de heladicidad de los morteros definitivos. Volumen aparente inicial y final (dm ³) (izquierda) y variación de volumen aparente (%) (derecha).	262
Gráfico 7.16 Comparativo de la resistencia a compresión tras el ensayo de heladicidad de los morteros definitivos. Resistencia a compresión de referencia y de ensayo (MPa) (izquierda) y variación de la resistencia a compresión (%) (derecha). ..	263
Gráfico 7.17 Comparativo del peso seco tras el ensayo de choque térmico de los morteros definitivos.	267
Gráfico 7.18 Comparativo de la resistencia a compresión tras el ensayo de choque térmico de los morteros definitivos. Resistencia a compresión de referencia y de ensayo (MPa) (izquierda) y variación de la resistencia a compresión (%) (derecha). ..	269
Gráfico 7.19 Comparativo del peso seco tras el ensayo de carbonatación acelerada de los morteros definitivos. Peso seco inicial y final (gr.) (izquierda) y variación de peso seco (%) (derecha).	272
Gráfico 7.20 Comparativo de la resistencia a compresión tras el ensayo de carbonatación acelerada de los morteros definitivos. Resistencia a compresión de referencia y de ensayo (MPa) (izquierda) y variación de la resistencia a compresión (%) (derecha).	273
Gráfico 7.21 Profundidad del área carbonatada (cm) tras el ensayo de carbonatación acelerada.	279
Gráfico 7.22 Comparativo del peso seco tras el ensayo de agua salina de los morteros definitivos.	281
Gráfico 7.23 Comparativo de la resistencia a compresión tras el ensayo de agua salina de los morteros definitivos. Resistencia a compresión de referencia y de ensayo (MPa) (izquierda) y variación de la resistencia a compresión (%) (derecha). ..	282
Gráfico 7.24 Comparativo del peso seco tras el ensayo de Kesternich de los morteros definitivos.	285

- Gráfico 7.25 Comparativo de la resistencia a compresión tras el ensayo Kesternich de los morteros definitivos. Resistencia a compresión de referencia y de ensayo (MPa) (izquierda) y variación de la resistencia a compresión (%) (derecha). ..286
- Gráfico 7.26 Comparativo del peso seco tras el ensayo de cristalización de sales de los morteros definitivos. Peso seco inicial y final (gr.) (izquierda) y variación de peso seco (%) (derecha). .290
- Gráfico 7.27 Comparativo de la resistencia a compresión tras el ensayo de cristalización de sales de los morteros definitivos. Resistencia a compresión de referencia y de ensayo (MPa) (izquierda) y variación de la resistencia a compresión (%) (derecha).291

Índice de figuras

Figura 1.1 Ciclo de vida de los productos. (ANEFA).....	6
Figura 2.1 Proceso de producción del acero. (H. Schoenber).....	15
Figura 2.2 Distribución de acerías de horno eléctrico en España (izquierda) y ampliación País Vasco (derecha). (I. Santamaría).....	17
Figura 2.3 Materiales utilizados en morteros de construcción.....	30
Figura 2.4 Esquema de los tipos de cal y de los campos de aplicación. (AENOR).	41
Figura 2.5 Ciclo de la cal (izquierda) (O. García) ¹¹⁹ y proceso industrial para la obtención de cal (derecha) (Meier).....	43
Figura 3.1 Representación de la matriz de experimentación según las variables codificadas.....	55
Figura 3.2 Ejemplo de Grafica de Superficie de Respuesta.....	58
Figura 3.3 Ejemplo de Grafica de Contornos de la Superficie.....	58
Figura 3.4 Tamices y máquina de tamizado empleados.....	61
Figura 3.5 Mesa de sacudidas y utensilios para el ensayo (izquierda) y molde troncocónico relleno (derecha).	62
Figura 3.6 Medida del diámetro de la torta de mortero.	62
Figura 3.7 Molde densidad aparente (Capacidad 1 dm ³). Determinación de la densidad aparente del mortero fresco.	63
Figura 3.8 Determinación del aire ocluido.....	64
Figura 3.9 Ensayo para la determinación de la trabajabilidad.....	65
Figura 3.10 Procedimiento de ensayo para la determinación de la retención de agua.	66
Figura 3.11 Peso de la probeta saturada y peso de la probeta saturada y sumergida.....	68
Figura 3.12 Probetas en la estufa y posteriormente saturadas en agua.	69
Figura 3.13 Preparación de probetas para el ensayo de absorción.	70
Figura 3.14 Parafinado de probetas.....	70
Figura 3.15 Probetas inmersas en agua.	71
Figura 3.16 Pesado de probetas.	71
Figura 3.17 Elaboración probetas para el ensayo de permeabilidad al vapor de agua.	72

Figura 3.18 Disolución de Nitrato de Potasio (KNO_3) y sellado de las probetas.	73
Figura 3.19 Placas de ensayo con sonda de medición (izquierda) y muestras colocadas entre las mismas (derecha).	74
Figura 3.20 Placas colocadas en el equipo (izquierda) y realización del ensayo (derecha).	75
Figura 3.21 Aparato de medición de conductividad térmica. C-Therm TCl.	75
Figura 3.22 Muestra insertada en tubo de impedancias (izquierda) y tubo con sistema de adquisición de datos (derecha).	76
Figura 3.23 Molde y probetas para el ensayo de reacción al fuego.	77
Figura 3.24 Equipo utilizado en el ensayo de reacción al fuego.	78
Figura 3.25 Ensayo para la determinación de la dureza superficial.	79
Figura 3.26 Máquina de ensayo de fractura.	80
Figura 3.27 Posición de los apoyos y la probeta en la máquina de ensayo (medidas en mm).	81
Figura 3.28 Probeta previamente entallada dispuesta en la máquina de ensayo (izquierda) y ligamento resistente de la probeta ensayada a fractura (derecha).	81
Figura 3.29 Máquina de ensayo (izquierda) con sus adaptadores para el ensayo a flexión (centro) y el ensayo a compresión (derecha).	82
Figura 3.30 Detalle de una probeta sometida a rotura a flexión.	83
Figura 3.31 Detalle de una probeta sometida a rotura a compresión.	84
Figura 3.32 Probetas sometidas al ensayo de flexión y compresión.	85
Figura 3.33 Adhesivo, pastillas para realizar el ensayo y cilindros.	86
Figura 3.34 Ensayo de adherencia para moteros en estado endurecido.	86
- Figura 3.35 Rotura adhesiva (izquierda), rotura cohesiva en el mortero (centro) y rotura cohesiva en el soporte (derecha). (AENOR).	87
Figura 3.36 Fabricación de probetas para el ensayo de cortante.	88
Figura 3.37 Probetas en proceso de curado en bolsas de polietileno y con carga.	89
Figura 3.38 Ensayo preparado para su realización.	89
Figura 3.39 Tipos de fallos en el ensayo de resistencia inicial a cortante. (AENOR).	90
Figura 3.40 Realización del ensayo de heladicidad.	93

Figura 3.41 Realización del ensayo de choque térmico.	94
Figura 3.42 Realización del ensayo de carbonatación acelerada.	94
Figura 3.43 Impregnación con fenolftaleína.	95
Figura 3.44 Realización del ensayo de agua salina.	96
Figura 3.45 Realización del ensayo Kesternich.	97
Figura 3.46 Realización del ensayo de cristalización de sales.	98
Figura 3.47 Difractómetro de Rayos X.	99
Figura 3.48 Microscopio electrónico de barrido y muestras colocadas en su interior.	100
Figura 3.49 Equipo TAC.	101
Figura 4.1 Cemento tipo CEM I 42,5 R (izquierda) y cal tipo CL 90 S (centro) y cal tipo NHL 5 (derecha).	105
Figura 4.2. Saco de cemento tipo CEM I 42,5 R.	107
Figura 4.3 Saco de cal tipo CL 90 S.	109
Figura 4.4 Saco de cal hidráulica NHL-5.	111
Figura 4.5 Arena Silícica.	114
Figura 4.6 Escoria blanca de Horno de Cuchara.	116
Figura 4.7 Microanálisis por energía dispersa de rayos X. Escoria blanca LF.	119
Figura 4.8 Microscopía electrónica de barrido. Escoria blanca LF (de arriba abajo: zona 1, zona 2 y zona 3).	120
Figura 4.9 Escoria negra de Horno de Arco Eléctrico.	121
Figura 4.10 Microanálisis por energía dispersa de rayos X. Escoria negra EAF.	123
Figura 4.11 Microscopía electrónica de barrido. Escoria negra EAF ...	125
Figura 4.12 Aditivos.	126
Figura 5.1 Fallos catastróficos: Torre Ronan Point (izquierda) y Puente Tacoma Narrows (derecha).	131
Figura 5.2 Algunos patrones de fisuración. (M. Atkinson).	132
Figura 5.3 Áridos empleados: Árido natural con filler calizo (izquierda), escoria blanca (centro) y escoria negra (derecha).	138
Figura 5.4 Amasadora mecánica programable.	139
Figura 5.5 Piezas plásticas para la realización de las entallas y molde metálico para la realización de las probetas.	141
Figura 5.6 Cámara húmeda (izquierda) y cámara de curado (derecha).	142

Figura 5.7 Mapas de fisuración y curvas tensión-deformación para hormigón cargado en compresión uniaxial. (Shah y Slate).	143
Figura 5.8 Probetas BAS-A-NA con edad de 7 días sometidas al ensayo de fractura.	146
Figura 5.9 Probetas BAS-A-NA con edad de 7 días sometidas al ensayo de Resistencia a Compresión.	158
Figura 6.1 Muestra del ensayo de adherencia de mortero con Árido Natural (NA), Escoria Blanca (LF)	227
Figura 6.2 Muestra del ensayo de adherencia de mortero de cal con Escoria Blanca (LF)	229
Figura 7.1 Esquema de los morteros definitivos.	239
Figura 7.2 Tomografía axial del mortero CH40LF+1/3MB600.	249
Figura 7.3 Tomografía axial del mortero BAS-C-LF+1/3MB600.	249
Figura 7.4 Tomografía axial del mortero CH40EAF+2%MR2100.	249
Figura 7.5 Tomografía axial del mortero BAS-C-EAF.	249
Figura 7.6 Microscopia electrónica de barrido MR del mortero CH40%LF+1/3MB600.	251
Figura 7.7 Microscopia electrónica de barrido MR del mortero BAS-C-LF+1/3MB600.	252
Figura 7.8 Microscopia electrónica de barrido MR del mortero CH40%EAF+2%MR2100.	253
Figura 7.9 Microscopia electrónica de barrido MR del mortero BAS-C-EAF.	254
Figura 7.10 Muestras ensayadas	257
Figura 7.11 Inspección visual en el ensayo de heladicidad de los morteros patrón con árido natural (NA). (Parte superior: antes de ensayo; Parte inferior: después del ensayo).	264
Figura 7.12 Inspección visual en el ensayo de heladicidad de los morteros patrón con áridos siderúrgicos (LF y EAF). (Parte superior: antes de ensayo; Parte inferior: después del ensayo).	264
Figura 7.13 Inspección visual en el ensayo de heladicidad de los morteros definitivos de revestimiento. (Parte superior: antes de ensayo; Parte inferior: después del ensayo).	265
Figura 7.14 Inspección visual en el ensayo de heladicidad de los morteros definitivos de fábrica.	265

Figura 7.15 Inspección visual en el ensayo de choque térmico de los morteros patrón con árido natural (NA). (Parte superior: antes de ensayo; Parte inferior: después del ensayo).	269
Figura 7.16 Inspección visual en el ensayo de choque térmico de los morteros patrón con áridos siderúrgicos (Parte superior: antes de ensayo; Parte inferior: después del ensayo).	270
Figura 7.17 Inspección visual en el ensayo de choque térmico de los morteros definitivos de revestimiento. (Parte superior: antes de ensayo; Parte inferior: después del ensayo).	270
Figura 7.18 Inspección visual en el ensayo de choque térmico de los morteros definitivos de fábrica.	270
Figura 7.19 Inspección visual en el ensayo de carbonatación acelerada de los morteros patrón con árido natural (NA). (Parte superior: antes de ensayo; Parte inferior: después del ensayo).....	274
Figura 7.20 Inspección visual en el ensayo de carbonatación acelerada de los morteros patrón con áridos siderúrgicos (LF y EAF). (Parte superior: antes de ensayo; Parte inferior: después del ensayo).....	275
Figura 7.21 Inspección visual en el ensayo de carbonatación acelerada de los morteros definitivos de revestimiento. (Parte superior: antes de ensayo; Parte inferior: después del ensayo).	275
Figura 7.22 Inspección visual en el ensayo de carbonatación acelerada de los morteros definitivos de fábrica. (Parte superior: antes de ensayo; Parte inferior: después del ensayo).	275
Figura 7.23 Medición del área carbonatada en el ensayo de carbonatación acelerada de los morteros patrón con árido natural (NA) (de arriba a abajo: CH40%NA, BAS-C-NA). .	277
Figura 7.24 Medición del área carbonatada en el ensayo de carbonatación acelerada de los morteros patrón con áridos siderúrgicos (LF y EAF) (de arriba a abajo: CH40%LF, CH40%EAF, BAS-C-LF).	277
Figura 7.25 Medición del área carbonatada en el ensayo de carbonatación acelerada de los morteros definitivos de revestimiento (de arriba a abajo: CH40%LF+1/3MB600, BAS-C-LF+1/3MB600).	278
Figura 7.26 Medición del área carbonatada en el ensayo de carbonatación acelerada de los morteros definitivos de fábrica. (de arriba a abajo: CH40%EAF+2%MR2100, BAS-C-EAF).	278
Figura 7.27 Inspección visual en el ensayo de agua salina de los morteros patrón con árido natural (NA). (Parte superior: antes de ensayo; Parte inferior: después del ensayo).	282

Figura 7.28 Inspección visual en el ensayo de agua salina de los morteros patrón con áridos siderúrgicos (LF y EAF). (Parte superior: antes de ensayo; Parte inferior: después del ensayo).....	283
Figura 7.29 Inspección visual en el ensayo de agua salina de los morteros definitivos de revestimiento. (Parte superior: antes de ensayo; Parte inferior: después del ensayo).	283
Figura 7.30 Inspección visual en el ensayo de agua salina de los morteros definitivos de fábrica.	283
Figura 7.31 Inspección visual en el ensayo Kesternich de los morteros patrón con árido natural (NA).....	287
Figura 7.32 Inspección visual en el ensayo Kesternich de los morteros patrón con áridos siderúrgicos.....	287
Figura 7.33 Inspección visual en el ensayo Kesternich de los morteros definitivos de revestimiento.....	288
Figura 7.34 Inspección visual en el ensayo Kesternich de los morteros definitivos de fábrica.	288
Figura 7.35 Inspección visual en el ensayo de cristalización de sales de los morteros patrón con árido natural (NA). (Parte superior: antes de ensayo; Parte inferior: después del ensayo).	292
Figura 7.36 Inspección visual en el ensayo de cristalización de sales de los morteros patrón con áridos siderúrgicos (LF y EAF). (Parte superior: antes de ensayo; Parte inferior: después del ensayo).....	292
Figura 7.37 Inspección visual en el ensayo de cristalización de sales de los morteros definitivos de revestimiento. (Parte superior: antes de ensayo; Parte inferior: después del ensayo).	293
Figura 7.38 Inspección visual en el ensayo de cristalización de sales de los morteros definitivos de fábrica. (Parte superior: antes de ensayo; Parte inferior: después del ensayo).	293
Figura 8.1 Realización del enfoscado vertical. Octubre 2016.....	299
Figura 8.2 Puesta en obra. Enfoscado CH40LF+1/3MB600 (izquierda) y BAS-C-LF+1/3MB600 (derecha). Enero 2017.....	300
Figura 8.3 Puesta en obra. Revestimiento CH40LF+1/3MB600 (izquierda) y BAS-C-LF+1/3MB600 (derecha). Abril 2017.	300
Figura 8.4 Puesta en obra. Revestimiento CH40LF+1/3MB600 (izquierda) y BAS-C-LF+1/3MB600 (derecha). Julio 2017.	300

Figura 8.5 Puesta en obra. Revestimiento CH40LF+1/3MB600 (izquierda) y BAS-C-LF+1/3MB600 (derecha). Octubre 2017.	301
Figura 8.6 Realización de discos. Muestra CH40EAF+2%MR2100 (izquierda) y BAS-C-EAF (derecha).	301
Figura 8.7 Muestra CH40LF+1/3MB600 (izquierda) y BAS-C-LF+1/3MB600 (derecha).	302
Figura 8.8 Realización de la fábrica de albañilería. Octubre 2016.	303
Figura 8.9 Puesta en obra. Probetas CH40EAF+2%MR2100 (izquierda) y BAS-C-EAF (derecha).	303
Figura 8.10 Puesta en obra. Probetas CH40EAF+2%MR2100 (izquierda) y BAS-C-EAF (derecha).	304
Figura 8.11 Puesta en obra. Probetas CH40EAF+2%MR2100 (izquierda) y BAS-C-EAF (derecha).	304
Figura 8.12 Puesta en obra. Probetas CH40EAF+2%MR2100 (izquierda) y BAS-C-EAF (derecha).	304
Figura 8.13 Rotura de probetas CH40EAF+2%MR2100.	305
Figura 8.14 Rotura de probetas BAS-C-EAF.	305
Figura 9.1 Esquema de instalación (recuperación de acero y separación de la escoria en diversas fracciones granulométricas). (Zimolo).	310
Figura 9.2 Área de comercialización del mortero.	316



UNIVERSIDAD DE BURGOS

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

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

