



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

VALORIZACIÓN DE CENIZAS VOLANTES DE PLANTAS DE PRODUCCIÓN DE ENERGÍA Y RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN EN MORTEROS INDUSTRIALES.

Tesis Doctoral presentada por

Ana Isabel Torres Gómez

Córdoba, 2018

TITULO: VALORIZACIÓN DE CENIZAS VOLANTES DE PLANTAS DE
PRODUCCIÓN DE ENERGÍA Y RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y
DEMOLICION EN MORTEROS INDUSTRIALES

AUTOR: *Ana Isabel Torres Gómez*

© Edita: UCOPress. 2018
Campus de Rabanales
Ctra. Nacional IV, Km. 396 A
14071 Córdoba

<https://www.uco.es/ucopress/index.php/es/>
ucopress@uco.es



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

*Departamento de Ingeniería Rural
Área de Ingeniería de la
Construcción*

*Departamento de Química Inorgánica e
Ingeniería Química
Área de Ingeniería de Química Inorgánica*

**VALORIZACIÓN DE CENIZAS VOLANTES DE
PLANTAS DE PRODUCCIÓN DE ENERGÍA Y
RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN
EN MORTEROS INDUSTRIALES.**

Tesis doctoral presentada por

Ana Isabel Torres Gómez

para la obtención del título de

DOCTOR

POR LA UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

Directores

Dr. José Ramón Jiménez Romero

Dr. José María Fernández Rodríguez



TÍTULO DE LA TESIS:

VALORIZACIÓN DE CENIZAS VOLANTES DE PLANTAS DE PRODUCCIÓN DE ENERGÍA Y RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN EN MORTEROS INDUSTRIALES.

DOCTORANDA: Ana Isabel Torres Gómez

INFORME RAZONADO DE LOS DIRECTORES DE LA TESIS

La construcción es uno de los sectores de producción más importantes del mundo con un alto impacto ambiental, derivado del consumo de recursos naturales no renovables y la producción de residuos, así como de las elevadas emisiones de CO₂ y consumo energético de los propios procedimientos constructivos y la fabricación de materiales como el cemento. Al igual que en el resto de los sectores, el futuro del sector de la construcción pasa por desarrollar un modelo de economía circular, en el que se debe limitar el consumo de recursos naturales y se debe fomentar el uso de materiales reciclados. Este nuevo paradigma ha motivado y justifica el desarrollo de esta tesis doctoral.

La tesis doctoral se enmarca en la línea de investigación sobre construcción sostenible iniciada por el Grupo de Investigación TEP-227 “Ingeniería de la Construcción” y reforzada con la incorporación del Grupo de Investigación FQM-391 “Materiales y Aplicaciones”, lo que ha supuesto el desarrollo de una tesis doctoral con fuertes sinergias.

La presente tesis doctoral analiza la viabilidad técnica de usar la fracción fina de áridos reciclados mixtos procedentes de residuos de construcción y demolición (RCD) como material alternativo a las arenas naturales en morteros industriales base cemento, así como la influencia de incorporar estos residuos finamente triturados. Así mismo el estudio

experimental del efecto de cuatro aditivos comerciales: aireante-plastificante, aireante-retenedor, retardante-plastificante y superplastificante-reductor de agua de alta actividad en las propiedades de morteros fabricados con áridos naturales y áridos reciclados de RCD.

Por otro lado, con la intención de reducir la cantidad de cemento e incorporar residuos industriales al proceso productivo, se estudia la viabilidad técnica de utilizar cenizas volantes de plantas de biomasa y cenizas no conformes de centrales termoeléctricas de carbón en la dosificación de los morteros industriales hechos con áridos naturales y áridos reciclados de RCD.

La presente tesis doctoral cumple de forma exhaustiva los objetivos planteados, lleva a cabo una minuciosa caracterización físico-mecánica y química tanto de los materiales empleados como de los morteros fabricados. La metodología planteada es adecuada y los resultados han sido justificados desde un punto de vista científico. Las conclusiones se han establecido de manera coherente con los resultados obtenidos y abre la puerta a futuras líneas de investigación.

Como indicio de calidad, parte de los resultados han sido publicados en las prestigiosas revistas indexadas en el JCR "MATERIALS" y "JOURNAL OF ENVIRONMENTAL AND CIVIL ENGINEERING", así como en el Congreso Internacional "SECOND INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONCRETE SUSTAINABILITY" celebrado del 13-15 de junio en Madrid (España):

Torres-Gómez, A. I., Ledesma, E. F., Otero, R., Fernández, J. M., Jiménez, J. R., & de Brito, J. (2016). Combined Effects of Non-Conforming Fly Ash and Recycled Masonry Aggregates on Mortar Properties. *Materials*, 9(9), 729.

Ledesma, E. F., Torres Gómez, A. I., López, M., Ayuso, J., & Jiménez, J. R. (2016). Effect of powdered mixed recycled aggregates on bedding

mortar properties. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 20(sup1), s1-s17.

Cingolani, C., Gómez, A. T., Jiménez, J. R., Corinaldesi, V., & Ledesma, E. F. (2016, June). Study of the use of different chemical admixtures in mortars manufactured with recycled sand from CDW. In *Book of Abstracts* (p. 113).

Están previstas tres nuevas publicaciones en revistas indexadas JCR y una comunicación aceptada al Congreso Internacional "International Symposium on Inorganic and Environmental Materials 2018 (ISIEM-2018) que se celebrará en Ghent (Bélgica) los días 17-21 de Junio 2018.

Por todo ello, se autoriza la presentación de la tesis doctoral.

Córdoba, 29 de Enero de 2018



Dr. José Ramón Jiménez Romero Dr. José María Fernández Rodríguez

Agradecimientos

Después de todo el trabajo desarrollado durante estos años para elaborar esta tesis doctoral ahora es el turno de agradecer a todas las personas y entidades que me han ayudado a conseguirlo y, es en este momento, cuando te das cuenta de cuánto tienes que agradecer. Intentaré resumir en unas líneas la gratitud que siento por todas las personas que han estado presentes durante esta etapa, haciendo posible que todo mi esfuerzo por conseguir mi sueño se convierta en una realidad.

A mis directores, Dr. José Ramón Jiménez Romero y Dr. José María Fernández Rodríguez, por la confianza mostrada hacía mí para afrontar esta investigación, por vuestra ayuda y sabios consejos. Gracias por vuestra dedicación, disponibilidad y paciencia en todo momento.

A mi compañero Enrique Fernández Ledesma por haber estado desde el primer día ayudándome y enseñándome todo lo que hoy en día sé.

A todas las personas que forman parte del Departamento de Ingeniería Rural (Área de Ingeniería de la Construcción) por hacerme agradable el camino, por colaborar amablemente en mi investigación, así como el resto, de otros ámbitos que han participado como tal de manera desinteresada.

Y para finalizar, dedicar y agradecer todo a las personas más importantes de mi vida, mi familia. A mis padres Ángel y María del Carmen, por creer en mí, por apoyarme día a día y no dejar que nunca me rindiese. Porque gracias a ellos hoy soy quien soy, sin ellos nada de esto hubiese sido posible.

A Amador, por haber estado junto a mí apoyándome en toda esta etapa animándome a seguir y a no tirar jamás la toalla. Le doy las gracias

porque gracia a él he tenido mayor confianza en mí. Gracias por haberme ayudado tanto en esta etapa.

A las personas que, aunque no aparecen aquí con nombres y apellidos, han estado presentes de alguna forma durante el desarrollo de este trabajo y han hecho posible que hoy vea la luz.

A todos, mi eterno agradecimiento

Abstract

Under the new paradigm of the circular economy in the construction sector, the present Doctoral Thesis studies the viability of using mixed recycled aggregates of construction and demolition waste (RCD), fly ash from biomass power plants, non-conforming fly ash of coal thermoelectric plants and commercial additives in the manufacture of cement-based industrial mortars. With the dual objective of reducing the consumption of non-renewable natural resources such as aggregates and cement, whose manufacture involves high-energy consumption and emission of greenhouse gases.

For the development of the thesis, natural reference materials and different types of mixed recycled aggregates supplied by the Andalusian Association of Recycling Companies AGRECA have been used. Two types of biomass fly ash, one from the Puente Genil plant and the other from Linares, non-conforming fly ash from the Puente Nuevo Thermoelectric Plant and four types of commercial additives: air-plasticizer, air-retainer, retardant - High activity plasticizer and superplasticizer-water reducer.

All materials have been characterized from a physical-chemical, mineralogical and mechanical point of view to justify the effect of their incorporation into the properties of fresh and hardened mortars. The physical-chemical, mechanical and durability properties of the mortars have been studied according to standardized methods.

In a first phase the properties of fresh and hardened mortars manufactured with mixed recycled aggregates of finely ground RCD were studied. Two types of mortars were manufactured: one of low strength made with a volumetric ratio cement: aggregate of 1: 7 and one of high strength made with a volumetric ratio cement: aggregate of 1: 4. In both cases was used a cement CEM II / BL 32,5N. The replacement of

the ultrafine fraction of natural sand (less than 125mm) by the finely ground recycled aggregate improved the mechanical properties and slightly impaired the durability properties.

In a second phase, the effect of incorporating a non-conforming fly ash (Nc-FA) from a coal-fired thermoelectric power plant and a finely ground mixed recycled aggregate of RCD was evaluated as a "filler" in the dosing of masonry mortars, taking as reference a commercial siliceous filler. Three families of mortars were designed to study the combined effect in mortars made with natural siliceous sand and mixed recycled sand. A cement CEM I / B-L 52,5N was used and a volumetric dosage of cement: aggregate: filler 1: 7: 0.6. In this work it is concluded that the use of finely ground recycled aggregates in the manufacture of mortars is not feasible, while the use of non-conforming ashes improves the mechanical properties and their durability. It is proposed an optimal dosage based on 50% of natural sand, 50% of recycled sand and non-compliant ashes from a thermoelectric plant as a viable alternative.

In a third phase the effect of different types of additives on the properties of mortars made with silica sand and recycled mixed aggregates of RCD was evaluated. Two types of cement CEM II / B-L 32,5N and CEM IV / B (V) 32,5N were used, with a volumetric ratio of 1: 6 (cement: aggregate). The air-entrained-plasticizer and air-entrained-retainer additives in the doses tested are not considered valid to improve the properties of the masonry mortars made with recycled aggregates. In the tested doses it is considered a good option to improve the properties of masonry mortars made with recycled aggregates used at ambient humidity (without pre-saturation). The superplasticizer additive is shown to be the most effective in reducing the amount of mixing water.

In a fourth phase, the effect of the substitution of natural siliceous filler by two fly ashes of biomass in mortars made with natural aggregates and mixed recycled aggregates of RCD was studied. Cement

CEM-I / B-L 52,5N was used and a dosage in volume cement: aggregate: filler of 1: 6: 0.5. The use of fly ash affects the water / cement ratio of the mixtures, although both ash showed a different behaviour and a different effect on the properties of fresh and hardened mortars. The fly ash requiring a lower ratio a / c for its kneading improved the mechanical properties of the mortars made with recycled aggregates and the adhesiveness with the ceramic bricks but negatively affected the time of workability and retraction of the mortars, so the incorporation of fly ash of biomass should be limited to mortars for the manufacture of partitions in indoor environments.

The idea of waste as a resource to incorporate it back into the productive system is a key challenge and an obligation of today's society, and the main motivation for the development of this Doctoral Thesis. Therefore, the correct management and use of this industrial waste, is essential to avoid negative impacts on ecosystems, biodiversity and human health, without forgetting the economic benefit of this practice.

Resumen

Bajo el nuevo paradigma de la economía circular en el sector de la construcción, la presente Tesis Doctoral estudia la viabilidad de utilizar áridos reciclados mixtos de residuos de construcción y demolición (RCD), cenizas volantes procedentes de plantas energéticas de biomasa, cenizas volantes no conformes de centrales termoeléctricas de carbón y aditivos comerciales en la fabricación de morteros industriales base cemento. Con el doble objetivo de reducir el consumo de recursos naturales no renovables como son los áridos y de cemento, cuya fabricación supone un elevado consumo energético y emisión de gases efecto invernadero.

Para el desarrollo de la tesis se han empleado materiales naturales de referencia y diferentes tipos de áridos reciclados mixtos suministrados por la Asociación Andaluza de Empresas Recicladoras AGRECA. Dos tipos de cenizas volantes de biomasa, una procedente de la planta de Puente Genil y la otra de Linares, unas cenizas volantes no conformes de la Central Termoeléctrica de Puente Nuevo y cuatro tipos de aditivos comerciales: aireante-plastificante, aireante-retenedor, retardante-plastificante y superplastificante-reductor de agua de alta actividad.

Todos los materiales han sido caracterizados desde un punto de vista fisicoquímico, mineralógico y mecánico para justificar el efecto de su incorporación en las propiedades de los morteros frescos y endurecidos. Las propiedades fisicoquímicas, mecánicas y de durabilidad de los morteros han sido estudiadas conforme a métodos normalizados.

En una primera fase se estudiaron las propiedades de morteros frescos y endurecidos fabricados con áridos reciclados mixtos de RCD finamente triturados. donde la fracción Se fabricaron dos tipos de

morteros: uno de baja resistencia hecho con una relación volumétrica cemento:árido de 1:7 y uno de alta resistencia hecho con una relación volumétrica cemento:árido de 1:4 En ambos casos se utilizó un cemento CEM II/BL32.5N. La sustitución de la fracción ultrafina de la arena natural (menor de 125mm) por el árido reciclado finamente triturado mejoró las propiedades mecánicas y perjudicó ligeramente las propiedades de durabilidad.

En una segunda fase se evaluó el efecto de incorporar como “filler” en la dosificación de morteros de albañilería una ceniza volante no conformes (Nc-FA) de central termoeléctrica de carbón y un árido reciclado mixto de RCD finamente triturado, tomando como referencia un filler silíceo comercial. Se diseñaron tres familias de morteros para estudiar el efecto combinado en morteros hechos con arena natural silícea y arena reciclada mixta. Se utilizó un cemento CEM I/B-L 52,5N y una dosificación en volumen cemento:árido:filler 1:7:0,6. En este trabajo se concluye que no es factible el uso de áridos reciclados finamente triturados en la fabricación de morteros, mientras que el uso de las cenizas no conformes mejora las propiedades mecánicas y de durabilidad de los mismos. Se propone una dosificación óptima en base al 50% de arena natural, 50% de arena reciclada y cenizas no conformes de central termoeléctrica como alternativa viable. El aditivo retardante-plastificante

En una tercera fase se evaluó el efecto de diferentes tipos de aditivos sobre las propiedades de morteros hechos con arena silícea y áridos reciclados mixtos de RCD. Se emplearon dos tipos de cemento CEM II/B-L 32.5N y CEM IV/B (V) 32.5N, con una relación volumétrica de 1:6 (cemento: árido). Los aditivos aireante-plastificante, aditivo aireante-retenedor en las dosis ensayadas no se consideran válidos para mejorar las propiedades de los morteros de albañilería hechos con áridos reciclados. en las dosis ensayadas se considera buena opción para

mejorar las propiedades de los morteros de albañilería hechos con áridos reciclados utilizados a humedad ambiente (sin pre-saturación). El aditivo superplastificante se muestra el más eficaz para reducir la cantidad de agua de amasado.

En una cuarta fase se estudió el efecto de la sustitución de filler silíceo natural por dos cenizas volantes de biomasa en morteros hechos con áridos naturales y áridos reciclados mixtos de RCD. Se utilizó un cemento CEM-I/B-L 52,5N y una dosificación en volumen cemento:árido:filler de 1:6:0,5. El uso de cenizas volantes afecta a la relación agua/cemento de las mezclas, aunque ambas cenizas mostraron un comportamiento diferente y un efecto diferente sobre las propiedades de los morteros frescos y endurecidos. La ceniza volante que requiere menor relación a/c para su amasado mejoró las propiedades mecánicas de los morteros hechos con áridos reciclados y la adhesividad con los ladrillos cerámicos, pero afectó negativamente al tiempo de trabajabilidad y retracción de los morteros, por lo que la incorporación de cenizas volantes de biomasa debería limitarse a morteros para la fabricación de tabiquería en ambientes interiores.

La idea del residuo como recurso para incorporarlo de nuevo al sistema productivo es un reto clave y una obligación de la sociedad actual, y la principal motivación para el desarrollo de la presente Tesis Doctoral. Por ello, la correcta gestión y aprovechamiento de estos residuos industriales, es esencial para evitar los impactos negativos sobre los ecosistemas, la biodiversidad y la salud humana, sin olvidar el beneficio económico que supone esta práctica.

Tabla de contenidos

Agradecimientos	ix
Abstract	xi
Resumen.....	xv
Tabla de contenidos.....	xix
Índice de tablas	xxv
Índice de figuras.....	xxix
List of abbreviations	35
Introducción	37
Objetivos de la tesis doctoral.....	59
CAPÍTULO 1: ÁRIDO RECICLADO CERÁMICO FINAMENTE TRITURADO COMO FILLER EN MORTEROS.....	61
1.1. Introducción	61
1.2. Materiales y métodos	64
1.2.1. Materiales.....	64
1.2.2. Diseño experimental.....	67
1.2.3. Métodos.....	68
1.3. Resultados.....	71
1.3.1. Densidad aparente del mortero fresco.....	71
1.3.2. Contenido de aire ocluido	73
1.3.3. Tiempo de trabajabilidad.....	75
1.3.4. Densidad aparente seca del mortero endurecido a los 28 días	77

1.3.5. Resistencia a compresión y a flexión del mortero endurecido	79
1.3.6. Inestabilidad dimensional (retracción)	82
1.3.7. Absorción de agua por capilaridad del mortero endurecido	85
1.4. Conclusiones.....	87
1.5. Normas usadas en el trabajo experimental	88
1.6. Referencias bibliográficas	90
CAPÍTULO 2: USO COMBINADO DE CENIZAS VOLANTES NO CONFORMES Y ÁRIDOS RECICLADOS MIXTOS EN MORTERO ...	95
2.1. Introducción.....	95
2.2. Materiales y métodos.	100
2.2.1. Diseño experimental.....	100
2.2.2. Caracterización de materiales	102
2.2.3. Procedimientos de preparación y ensayo de muestras	111
2.2.4. Composición morteros	113
2.3. Resultados y discusión.....	115
2.3.1. La consistencia del mortero fresco.....	115
2.3.2. Trabajabilidad del mortero fresco.....	116
2.3.3. Densidad aparente del mortero endurecido	117
2.3.4. Resistencia a compresión del mortero endurecido	118
2.3.5. Absorción de agua por inmersión	122
2.3.6. Absorción de agua por capilaridad	124
2.3.7. Permeabilidad al vapor de agua	125

2.3.8. Retracción.....	126
2.4. Conclusiones.....	129
2.5. Normas usadas en el trabajo experimental.....	130
2.6. Referencias bibliográficas	132
CAPÍTULO 3: ADITIVOS PARA MORTEROS CON ÁRIDOS RECICLADOS	137
3.1. Introducción	137
3.1.1. Aditivos para hormigones.....	138
3.1.2. Aditivos para morteros.....	140
3.2. Características químicas de los aditivos para materiales base cemento.....	145
3.3. Objetivos	160
3.4. Materiales y métodos	161
3.4.1. Materiales.....	161
3.4.1.1. Árido natural	161
3.4.1.2. Árido reciclado de RCD - mixto	161
3.4.1.3. Cemento	162
3.4.1.4. Aditivos.....	163
3.4.1.5. Agua de amasado	165
3.4.2. Caracterización de los áridos	165
3.4.2.1. Granulometría	165
3.4.2.2. Composición del AR.....	166
3.4.2.3. Tamaño de partículas ultrafinas	168
3.4.2.4. Densidad y absorción.....	168
3.5. Diseño experimental.....	169
3.5.1. Ensayos realizados a los morteros.....	174

3.6. Resultados y discusión.....	175
3.6.1. Evolución de la consistencia del mortero	175
3.6.2. Tiempo de trabajabilidad	177
3.6.3. Densidad del mortero fresco	180
3.6.4. Densidad del mortero endurecido.....	181
3.6.5. Resistencia a compresión	183
3.6.6. Absorción de agua por inmersión	187
3.6.7. Absorción de agua por capilaridad	188
3.6.8. Retracción.....	193
3.7. Conclusiones.....	199
3.8. Normas usadas en el trabajo experimental	205
3.9. Referencias bibliográficas	208
CAPÍTULO 4: USO COMBINADO DE CENIZAS VOLANTES DE BIOMASA Y ÁRIDOS RECICLADOS MIXTOS EN MORTEROS.....	213
4.1. Introducción.....	213
4.1.1. Uso de cenizas de biomasa en materiales de construcción .	218
4.1.2. Uso de las cenizas volantes de biomasa en construcción....	224
4.2. Objetivos.....	228
4.3. Materiales y métodos	229
4.3.1. Materiales.....	229
4.3.1.1. Árido Natural	229
4.3.1.2. Árido reciclado de RCD – mixto.....	229
4.3.1.3. Cemento	229
4.3.1.4. Aditivo.....	229

4.3.1.5. Filler silíceo	230
4.3.1.6. Cenizas volantes de biomasa	231
4.3.2. Caracterización del árido natural (AN) y árido reciclado de RCD (AR)	232
4.3.2.1. Granulometría	232
4.3.2.2. Composición del AR.....	233
4.3.2.3. Densidad y absorción.....	233
4.3.2.4. Composición mineralógica de los áridos.....	233
4.3.2.5. Lixiviación de áridos	234
4.3.3. Caracterización del filler silíceo y de las cenizas de biomasa	236
4.3.3.1. Densidad	236
4.3.3.2. Granulometría	236
4.3.3.3. Caracterización superficial de las partículas mediante microscopía electrónica de barrido (SEM)	237
4.3.3.4. Distribución del tamaño de poro	238
4.3.3.5. Composición química.....	238
4.3.3.6. Composición mineralógica.....	240
4.3.3.7. Análisis de infrarrojos (FT-IR).....	241
4.3.3.8. Análisis termogravimétrico.....	241
4.3.3.9. Lixiviación de cenizas volantes de biomasa.....	243
4.4. Diseño experimental.....	244
4.4.1. Ensayos realizados a los morteros.....	246
4.5. Resultados y discusión.....	246
4.5.1. Evolución de la consistencia del mortero	246
4.5.2. Densidad del mortero fresco	248

4.5.3. Aire ocluido	250
4.5.4. Tiempo de Trabajabilidad.....	250
4.5.5. Densidad del mortero endurecido.....	251
4.5.6. Resistencia a flexión y compresión.....	252
4.5.7. Absorción de agua por capilaridad	260
4.5.8. Permeabilidad al vapor de agua	263
4.5.9. Retracción.....	264
4.5.10. Resistencia de unión entre ladrillo y mortero	265
4.6. Conclusiones.....	268
4.7. Normas usadas en el trabajo experimental	273
4.8. Referencias bibliográficas	276
CONCLUSIONES	283
Futuras líneas de investigación:.....	286
INDICIOS DE CALIDAD	289

Índice de tablas

Tabla 1.1: Composición del árido reciclado – RMA.....	65
Tabla 1.2: Distribución del tamaño de partícula de los materiales.	66
Tabla 1.3: Propiedades físico-químicas de los áridos.	66
Tabla 1.4: Características del CEM II / BL 32,5 N.	67
Tabla 1.5: Proporciones de la mezcla del mortero.....	69
Tabla 1.6: Normas usadas para caracterizar los morteros.	70
Tabla 2.1: Diseño experimental – nomenclatura.	102
Tabla 2.2: Distribución del tamaño de partícula.....	103
Tabla 2.3: Caracterización de NA y FRMA.	105
Tabla 2.4: Caracterización de Si-F, Nc-FA, R-MF.	108
Tabla 2.5: Características del CEM I/52,5R.	111
Tabla 2.6: Ensayos de caracterización de los morteros.....	112
Tabla 2.7: Composición de los morteros.....	114
Tabla 2.8: Trabajabilidad del mortero fresco.....	116
Tabla 2.9: Densidad aparente del mortero endurecido a 28 días.	117
Tabla 2.10: Resistencia a compresión del mortero endurecido.	119
Tabla 2.11: Absorción de agua por inmersión y capilaridad del mortero endurecido.	123
Tabla 2.12: Permeabilidad al vapor de agua del mortero endurecido.....	126
Tabla 2.13: Retracción a 154 días.....	127
Tabla 3.1: Diferentes tipos de aditivos comercializados en España por la empresa BASF Construction Chemical España SL.	142
Tabla 3.2: Características del CEM II/B-L 32,5N.....	162
Tabla 3.3: Características del CEM IV/B (V) 32,5N.	163
Tabla 3.4: Propiedades y características de los aditivos empleados.	165
Tabla 3.5: Propiedades físico-mecánicas de AN y AR.....	169
Tabla 3.6: Proporciones de la mezcla de mortero.....	174
Tabla 3.7: Tiempo de trabajabilidad del mortero fresco.....	180
Tabla 3.8: Tiempo de trabajabilidad del mortero fresco.....	180

Tabla 3.9: Densidad del mortero fresco.	181
Tabla 3.10: Densidad del mortero fresco.	181
Tabla 3.11: Densidad del mortero seco (CEM II).	182
Tabla 3.12: Densidad del mortero seco (CEMIV).	182
Tabla 3.13: Resistencia a compresión 28 y 180 días.	184
Tabla 3.14: Resistencia a compresión 28 y 180 días.	185
Tabla 3.15: Absorción de agua por inmersión (CEM II).	188
Tabla 3.16: Absorción de agua por inmersión (CEM IV).	188
Tabla 3.17: Absorción de agua por capilaridad 90 min.	189
Tabla 3.18: Coeficiente de absorción de agua por capilaridad 90min.	189
Tabla 3.19: Parámetros de ajuste del modelo de capilaridad de Halls.	193
Tabla 3.20: Retracción a 28 días morteros fabricados con CEMII.	194
Tabla 3.21: Retracción 28 días morteros fabricados con CEM IV.	195
Tabla 4.1: Composición del CEM I 52.5 R (Cementos Cosmos S.A.)...	230
Tabla 4.2: Concentraciones lixiviadas de AN y AR (mg / kg) y criterios de aceptación de residuos (Decisión 2003/33 / CE del Consejo).....	235
Tabla 4.3: Propiedades físico-mecánicas de SF, BL y BP.	236
Tabla 4.4: Composición de los filler SF, BL, BP.....	239
Tabla 4.5: Concentraciones lixiviadas de BL y BP (mg / kg) y criterios de aceptación de residuos (Decisión 2003/33 / CE del Consejo).....	243
Tabla 4.6: Proporciones de la mezcla de mortero (masa en gramos por cada 1600 cm ³ de mortero).	245
Tabla 4.7: Densidad del mortero fresco.	249
Tabla 4.8: Aire ocluido del mortero fresco.	250
Tabla 4.9: Tiempo de trabajabilidad del mortero fresco.	251
Tabla 4.10: Densidad del mortero seco.	252
Tabla 4.11: Resistencia a flexión y compresión a 7, 28, 90 y 180 días en los morteros hechos con AN (Familia-1).	253
Tabla 4.12: Resistencia a flexión y compresión 7, 28, 90 y 180 días en los morteros hechos con AR (Familia-2).....	257

Tabla 4.13: Parámetros de ajuste del teorema de capilaridad de Halls.
.....262

Índice de figuras

Figura 0.1 Economía circular en el sector de la construcción	38
Figura 0.2 Documentación técnica para el fomento de áridos	45
Figura 1.1: Árido reciclado mixto pulverizado (FRMA).	65
Figura 1.2: Diagrama del diseño experimental.....	68
Figura 1.3: (a) Densidad aparente del mortero fresco (promedio de tres muestras) [SD (kg/m ³): (1) Morteros de baja resistencia: 0% = 10; 50% = 10; 100% = 21 (2) Morteros de alta resistencia: 0% = 15; 50% = 8; 100% = 6]; (b) Comparación no dimensional.....	72
Figura 1.4: (a) Contenido de aire ocluido (promedio de tres muestras) [SD (%): (1) Morteros de baja resistencia: 0% = 0,9; 50% = 1,1; 100% = 0,9 (2) Morteros de alta resistencia: 0% = 1,5; 50% = 1,3; 100% = 0,5]; (b) Comparación no dimensional.....	74
Figura 1.5: (a) Tiempo de trabajabilidad (promedio de 3 muestras) [SD (min): (1) Morteros de baja resistencia: 0% = 3,2; 50% = 6,4; 100% = 6,0 (2) Morteros de alta resistencia: 0% = 3,1; 50% = 3,8; 100% = 4,0]; (b) Comparación no dimensional.....	76
Figura 1.6: (a) Densidad aparente de la primera etapa del mortero endurecido (promedio de tres muestras) [SD (kg/m ³): (1) Morteros de baja resistencia: 0% = 35; 50% = 10; 100% = 10 (2) Morteros de alta resistencia: 0% = 20; 50% = 10; 100% = 10]; (b) Comparación no dimensional.....	78
Figura 1.7: distribución de las partículas finas de FRMA en la matriz de los seis morteros fabricados.	79
Figura 1.8: Resistencia a compresión de morteros endurecidos (promedio de tres muestras).	80
Figura 1.9: Resistencia a flexión de morteros endurecidos (promedio de tres muestras).	81
Figura 1.10: Correlación entre la Resistencia a compresión y a flexión.	82

Figura 1.11: Retracción de morteros de baja Resistencia en función de la edad en días (promedio de nueve muestras) (HR = 65% y T = 20 °C). ..84

Figura 1.12: Retracción de morteros de alta resistencia en función de la edad en días (promedio de nueve muestras) (HR = 65% y T = 20 °C). .84

Figura 1.13: Pérdida de masa del mortero en función de la edad en días (HR = 65% y T = 20 °C).....85

Figura 1.14: (a) Absorción de agua de mortero endurecido (promedio de dieciocho muestras) [SD (kg/ (m²·min^{0.5}): (1) Morteros de baja resistencia: 0% = 0,00; 50% = 0,01; 100% = 0,01 (2) Morteros de alta resistencia: 0% = 0,01; 50% = 0,02; 100% = 0,00]; (b) Comparación.....86

Figura 2.1: Esquema de producción de cenizas volantes en una central termoeléctrica convencional.97

Figura 2.2: Patrón de DRX de los áridos NA y FRMA y del cemento. 106

Figura 2.3: Distribución del tamaño de partícula de Si-F, R-MF y Nc-FA.107

Figura 2.4: Patrón de DRX de Si-F, Nc-FA y R-MF.109

Figura 2.5: Imágenes SEM de Si-F, Nc-FA y R-MF.....110

Figura 2.6: Patrón de DRX de los morteros de la Familia-1.120

Figura 2-7: Patrón de DRX de los morteros de la Familia-2.....121

Figura 2.8: Absorción de agua por inmersión frente a densidad aparente del mortero endurecido.124

Figura 2.9: Retracción (Familia-1 y Familia-3).127

Figura 2.10: Retracción (Familia-2 y Familia-3).128

Figura 3.1: Proceso de repulsión entre partículas, responsable del efecto dispersante del aditivo plastificante.147

Figura 3.2: Dibujo esquemático de parte de la estructura de un lignosulfonato. Fuente: Understanding the rheology of concrete; capítulo 7.149

Figura 3.3: Esquema de la reacción para la producción del PNS. Fuente: Understanding the rheology of concrete; capítulo 7.....151

Figura 3.4: Producción de la policondensación del PMS. Fuente: Understanding the rheology of concrete; capítulo 7.....	152
Figura 3.5: Estructura molecular de dos copolímeros de vinilo. Fuente: Understanding the rheology of concrete; capítulo 7.....	154
Figura 3.6: Dibujo esquemático de un polímero de peine con un esqueleto iónico y cadenas laterales flexibles unidas. Fuente: Understanding the rheology of concrete; capítulo 7.....	155
Figura 3.7: Mecanismo de dispersión por impedimentos estéricos. Fuente: BASF.	156
Figura 3.8: Estructura del fosfonato de óxido de polietileno (PEG). Fuente: Understanding the rheology of concrete; capítulo 7.....	158
Figura 3.9 Principio de acción de los incorporadores de aire.....	159
Figura 3.10: Arena natural silíceo (AN).	161
Figura 3.11: Arena reciclada de RCD.	161
Figura 3.12: Curva granulométrica AN, AR y FAURY.	166
Figura 3.13: Composición del árido reciclado.....	167
Figura 3.14: Distribución del tamaño de partícula del AN y AR < 0,063mm.	168
Figura 3.15: Evaluación de la consistencia con el tiempo del Árido Natural.	176
Figura 3.16: Evolución de la consistencia con el tiempo del Árido Reciclado.	176
Figura 3.17: Evolución de la consistencia con el tiempo del Árido Natural.	177
Figura 3.18: Evolución de la consistencia con el tiempo del Árido Reciclado.	177
Figura 3.19: Relación entre densidad seca y resistencia a compresión a 28 días (CEM II).....	186
Figura 3.20: Relación entre densidad seca y resistencia a compresión a 28 días (CEM IV).	186
Figura 3.21: Absorción de agua por capilaridad en el tiempo de la familia MSII.....	190

Figura 3.22: Absorción de agua por capilaridad en el tiempo de la familia MRII.	191
Figura 3.23: Absorción de agua por capilaridad en el tiempo de la familia MSIV.	191
Figura 3.24: Absorción de agua por capilaridad en el tiempo de la familia MRIV.	192
Figura 3.25: Retracción 28 días morteros fabricados sin aditivo.	196
Figura 3.26: Retracción 28 días morteros fabricados con aditivo 1 (aireante-plastificante).	196
Figura 3.27: Retracción 28 días morteros fabricados con aditivo 2 (aireante-retenedor).	197
Figura 3.28: Retracción a 28 días morteros fabricados con aditivo 3 (retardante-plastificante).	198
Figura 3.29: Retracción a 28 días morteros fabricados con aditivo 4 (superplastificante).	198
Figura 4.1: Producción de energía con biomasa en la UE (CEDEX, 2014).	214
Figura 4.2: Distribución provincial del potencial de biomasa. Fuente: Agencia Andaluza de la Energía. Conserjería de Empleo, Empresas y Comerció (2015).	216
Figura 4.3: Planta de valorización energética de biomosas de Linares (Valoriza Energía, Grupo Sacyr-Vallehermoso).	231
Figura 4.4: Planta de valorización energética de biomosas de Puente Genil (Valoriza Energía, Grupo Sacyr-Vallehermoso).	232
Figura 4.5: Patrones de DRX DE AN y AR.	233
Figura 4.6: Distribución del tamaño de partículas.	237
Figura 4.7: Microfotografías de microscopio electrónico de barrido (SEM) de las muestras SF, BL y BP.	238
Figura 4.8: Distribución del tamaño de poro.	239
Figura 4.9: Patrón de DRX de BL y BP.	240
Figura 4.10: Infrarrojos SF, BL y BP.	242

Figura 4.11: ATG de SF, BL y BP.....	242
Figura 4.12: Consistencia a lo largo del tiempo AN.....	248
Figura 4.13: Consistencia a lo largo del tiempo AR.	248
Figura 4.14: Resistencia a compresión 7, 28, 90 Y 180 días AN (Familia-1).....	254
Figura 4.15 Resistencia a flexión 7, 28, 90 Y 180 días AN (Familia-1)..	254
Figura 4.16: Patrón de DRX AN-SF, AN-BL, AN-BP.....	255
Figura 4.17: Resistencia a flexión 7, 28, 90 y 180 días AR (Familia-2)..	258
Figura 4.18: Resistencia a compresión 7, 28, 90 y 180 días AR (Familia-2).	258
Figura 4.19: Patrón de DRX AR-SF, AR-BL, AR-BP.....	259
Figura 4.20: Relación entre densidad seca y resistencia a compresión a 28 días.....	260
Figura 4.21: Absorción de agua por capilaridad en el tiempo AN.	261
Figura 4.22: Absorción de agua por capilaridad en el tiempo AN.	261
Figura 4.23: Absorción de agua por capilaridad en el tiempo AN.	263
Figura 4.24: Retracción 160 días AN.	265
Figura 4.25: Retracción 160 días AR.....	265
Figura 4.26: Unión entre ladrillo y mortero.	266
Figura 4.27: Resistencia de unión entre mortero y ladrillo para la AN.	267
Figura 4.28: Resistencia de unión entre mortero y ladrillo para la AR.	267

List of abbreviations

a/c: relación agua/cemento

AN- NA: Árido natural- Natural aggregate

AR: Árido reciclado

BA: Cenizas de fondo

BL: Cenizas volantes de biomasa de Linares

BP: Cenizas volantes de biomasa de Puente Genil

EHE: Instrucción Española del Hormigón Estructural

FA: Cenizas volantes

FBC: Cenizas de combustión de lecho fluido

FDG: Yeso de desulfuración de gases del carbón

FNA: Fracción fina de arena

FRMA: árido reciclado mixto pulverizado

FS - Si-F: Filler silíceo

HSM: Morteros de alta resistencia

IDAE: Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía

LS: Lignosulfonatos

LSM: Morteros de baja resistencia

MMt: Millones de toneladas

Nc- FA: Cenizas volantes no conformes

PCE: éter policarboxílico

PEG: Fosfonatos de óxido de polietileno

PG-3: Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes

PMS: Polimelamina sulfonatos

PNIR: Plan Nacional Integrado de Residuos para el período

PNRCD: Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición

PNS: Polinaftalenos sulfonatos

PDRX: Patrones de difracción de rayos x

RCD: Residuos de construcción y demolición

REACH: Registro, evaluación, autorización y restricción de sustancias químicas

RMA: Áridos reciclados mixtos.

RM-F: Filler reciclado de mampostería

SCAI: Servicio Centralizado de Apoyo a la Investigación

SDA: Producto de absorción semiseca

SP: Superplastificantes

SSA: Superficie específica de los materiales

UE-28: Estados miembros de la Unión Europea

Introducción

La construcción es uno de los sectores de producción más importantes del mundo, lo que conlleva a generar un gran impacto en la producción de residuos (Solís-Guzman y col., 2009). El consumo de recursos naturales no renovables como son los áridos (zahorras, gravas, arenas) es muy elevado a nivel mundial, siendo la segunda materia prima más consumida por el hombre después del agua. En el mundo se extraen cada año 50.000 millones de toneladas (MMt) de áridos. China, India y el resto de Asia consumen más de la mitad de los áridos a nivel mundial. China rebasa el consumo de 10 toneladas por habitante y año, mientras que en Europa (UE + EFTA) la producción ronda los 2.700MMt al año, lo que representa un consumo de 5,4 toneladas por habitante y año. España consume actualmente 4,8 toneladas por habitante y año y Estados Unidos 6,7 toneladas por habitante y año. La comunidad científica viene alertando desde hace más de una década que el consumo actual de arena es insostenible, siendo el ritmo de extracción de arena más de dos veces superior al ritmo al que se depositan nuevos sedimentos, siendo el reciclado de materiales una medida necesaria para mitigar esta situación (Torres y col., 2017).

Por otro lado, el consumo de cemento a nivel mundial supera los 2.300 millones de toneladas anuales, siendo China el primer consumidor mundial, con más de 1.800 toneladas anuales. La producción de cemento tiene un gran impacto ambiental por las emisiones de CO₂ a la atmósfera y su efecto en el calentamiento global (Namarak y col., 2017). Estudios recientes alertan de la necesidad urgente de buscar materiales alternativos para la sustitución parcial o total de cemento portland, ya que la producción de una tonelada de cemento portland genera casi una tonelada de dióxido de carbono (Ismail y col., 2014).

En el sector de la construcción, al igual que en el resto de los sectores, se ha pasado de un modelo de economía lineal basado en producir, consumir y tirar, donde los residuos eran depositados en vertederos de inertes, escombreras o simplemente se vertían ilegalmente, a un modelo de economía circular, en el cual se pretende limitar el consumo de nuevos recursos naturales y fomentar el uso de materiales reciclados, de manera que los residuos se reincorporan al proceso productivo. (Fig. 0.1)



Figura 0.1 Economía circular en el sector de la construcción

Los áridos reciclados de Residuos de Construcción y demolición (RCD), son sustancia u objetos generados en una obra de construcción o demolición y que su poseedor desecha o tenga la intención o la obligación de desechar. Proceden mayoritariamente de derribos de edificios o de rechazos de los materiales de construcción en obras de

infraestructuras, obras de nueva planta y de pequeñas obras de reformas en viviendas y urbanizaciones.

Los RCD están compuestos principalmente por hormigón, cerámicos, asfalto, pétreos y tierras de excavación, que son considerados residuos inertes, no peligrosos y que tienen un alto potencial de ser reciclados como áridos. Además, están compuestos por otros residuos, como son el yeso y sus derivados, maderas, plásticos, aceros, papel, que, aunque son inertes y no peligrosos, son considerados impurezas, ya que su presencia puede limitar la producción de áridos reciclados (Ayuso y col., 2015).

La gestión de los RCD constituye una parte esencial de la construcción sostenible, en la que se pretende minimizar los costes ecológicos que supone tanto la extracción de recursos minerales, como el vertido incontrolado de los residuos. A partir de los RCD convenientemente tratados en plantas de reciclaje se pueden obtener áridos reciclados de RCD. El reciclaje y la reutilización de los RCD es una solución para disminuir el impacto ambiental del sector de la construcción.

Los datos más recientes de la oficina de estadística de la Unión Europea (Eurostat, 2016), estiman la producción de RCD en Europa (UE-28) durante el año 2012 en 821 MMt, lo que supuso el 33% del total de residuos generados en la UE-28. España se encuentra en la sexta posición de países más productores con un total de 26 MMt. No obstante, en el año 2007 la tasa de producción de RCD generada en España superó los 42 MMt coincidiendo con el periodo de mayor intensidad del sector de la construcción, según los datos oficiales aportados por el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (2010), con un ritmo de crecimiento anual del 8,7% desde el año 2001, aunque esta tendencia de crecimiento cambió drásticamente a partir de 2008 debido a la crisis económica y el fuerte receso del sector de la construcción.

La principal normativa a nivel europeo en materia de gestión de los RCD es la Directiva Marco de Residuos 2008/98/CE del Parlamento Europeo, la cual establece que los países de la Unión Europea (UE) en el año 2020 deben alcanzar una tasa mínima de recuperación del 70% en peso para los RCD, y ser destinados a operaciones de reutilización, reciclado u otras operaciones de valorización. La Directiva europea se basa en el principio de jerarquía: prevención, reutilización, reciclado, recuperación con otros fines (como la valorización energética) y eliminación o depósito en vertedero.

En España la producción y gestión de los RCD está regulada por el Real Decreto 105/2008 del Ministerio de la Presidencia. Asimismo, en España se han elaborado dos Planes Nacionales de Residuos de Construcción y demolición hasta la fecha: el primer PNRCD (2001-2006) y el segundo PNRCD (2007-2015) incluido en el Plan Nacional Integrado de Residuos para el periodo 2008-2015 (PNIR). Este último Plan Nacional estableció como objetivo conseguir una tasa de reciclaje del 40% de los RCD en el año 2015 y que el 100% de todos los materiales peligrosos contenidos en los RCD sean gestionados correctamente (Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino, 2009). Al amparo del RD 105/2008 y de la Directiva Europea se ha desarrollado el Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos (PEMAR) vigente para el periodo 2016-2020 y que establece unos objetivos cuantitativos para cumplir la Directiva, reciclar el 70% de los RCD para el año 2020.

Más de la mitad de los residuos generados mundialmente son RCD (Tam y col., 2009). En España, a pesar del aumento en la concienciación de la sociedad sobre la protección al medio ambiente y la necesidad del reciclaje, y a pesar de las iniciativas y la regulación jurídica llevada a cabo para promover estos principios, los RCD todavía encuentran una vía de escape fácil en los vertederos, siendo España uno de los países con menor tasa de reciclaje de la UE. Según la Asociación Española de reciclaje de RCD, actualmente en España el 39% de los RCD se están

valorizando, un 24% se está depositando en vertedero y un 30% se está gestionando de manera incontrolada, el resto se encuentra en stock en las plantas de reciclaje. En algunos países del norte, como Holanda, Dinamarca, Países Bajos o Bélgica, se está fomentando el reciclaje de este tipo de residuos y llegan a alcanzar porcentajes de reciclaje superiores al 75 %.

En los últimos años se han venido dando en España algunos pasos importantes para el fomento del uso de áridos reciclados de RCD. La Orden FOM/891/2004 por la que se actualizaban determinados artículos del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3) permitía el uso de áridos reciclados de RCD como zahorras, materiales tratados con cemento (suelo-cemento y grava-cemento) y hormigón magro vibrado, sin embargo, los límites exigidos para los áridos reciclados eran prácticamente iguales que los exigidos a los áridos naturales. Debido a que los áridos reciclados tienen unas propiedades físico-mecánicas y químicas diferentes a los áridos naturales, muchos áridos reciclados no cumplían las prescripciones técnicas para ser utilizados conforme al PG-3, por lo que eran rechazados por los Ingenieros Directores de obra. Las principales propiedades identificadas como limitantes para ser utilizados en obras de la Red de Carreteras del Estado eran los sulfatos, sales solubles y la resistencia a la fragmentación (Jiménez, 2013).

La Instrucción sobre Hormigón Estructural (EHE-08) incorpora el anejo 15 con las recomendaciones para el uso de áridos reciclado, el cual permite sustituir parte de la fracción gruesa del árido natural por árido reciclado de hormigón, recomendando un máximo del 20% de sustitución y con contenido de material cerámico menor del 5%, y no permite utilizar la fracción fina. El impacto sobre el reciclado de RCD de la EHE-08 ha sido insignificante, ya que la mayor parte de los RCD contiene más del 5% de partículas cerámicas.

A pesar de que la mayor parte de las investigaciones a nivel internacional se han centrado en el uso de áridos reciclados de hormigón para la fabricación de hormigón estructural (Pacheco-Torgal y col., 2013), el uso de áridos reciclados afecta negativamente a las resistencias mecánicas, de durabilidad y reológicas de los hormigones estructurales, por lo que, desde un punto de vista práctico, esta solución no es la más idónea para fomentar el uso de áridos reciclados de RCD (Ayuso y col., 2015). Los factores que más influyen en las propiedades del hormigón elaborado con áridos reciclados de hormigón son la calidad del árido reciclado y el porcentaje de sustitución. (López-Gayarre y col., 2009)

Las normas de la mayoría de los países no permiten el uso de la fracción fina de los áridos reciclados en la elaboración de hormigón. Esto se debe a que la sustitución parcial de arena natural por la fracción fina de áridos reciclados de hormigón proporciona una menor resistencia mecánica, durabilidad, y mayor retracción (khatib, 2005). Como consecuencia, es necesario buscar una aplicación alternativa de la fracción fina de los áridos reciclados de hormigón y mixtos que permita su valorización.

Si queremos aumentar la tasa de reciclado de los RCD, es necesario establecer Pliegos de Prescripciones Técnicas específicos para AR de RCD, así como establecer nuevos usos.

Las dos únicas comunidades autónomas que han desarrollado normativa específica para el uso de áridos reciclados han sido la Comunidad Autónoma Andaluza y el País Vasco:

- Recomendaciones para la redacción de Pliegos de Especificaciones Técnicas para el uso de materiales reciclados de residuos de construcción y demolición (RCD) del año 2010. GIASA.

- Usos de áridos reciclados mixtos procedentes de residuos de construcción y demolición (RCD). 2011. Publicado por IHOBE-CEDEX.

Y a nivel nacional, la antigua Asociación de Recicladores de España que publicó en 2012 la “Guía Española de Áridos Reciclados procedentes de RCD” (Proyecto GEAR) con el objetivo de caracterizar técnicamente y estandarizar los áridos reciclados obtenidos a partir del reciclaje de los residuos de construcción y demolición. Dicha guía establece cuatro tipos o categorías de áridos reciclados en función de la composición: ARH (Áridos Reciclados de Hormigón), ARMh (Áridos Reciclados Mixtos de Hormigón), ARMc (Áridos Reciclados Mixtos cerámicos), ARC (Áridos Reciclados Cerámicos). Además, incluye a los ARMa (Áridos Reciclados Mixto con asfalto). La Asociación GERD ya no existe hoy en día.

A pesar de que estos documentos han supuesto un avance, siguen tomando como referencia las propiedades de los áridos naturales para evaluar la calidad de los áridos reciclados. Los áridos reciclados, por su propia naturaleza, no cumplen algunas especificaciones técnicas contempladas en esta normativa. La opinión de recicladores y empresas constructoras es que estas normativas no son suficientes para alcanzar la tasa de reciclado del 70% exigida por la Directiva Europea.

En este contexto, se desarrolla por parte de la Universidad de Córdoba, la Consejería de Fomento y Vivienda de la Junta de Andalucía a través de la Agencia de Obra Pública, la Asociación Andaluza de empresas recicladoras (AGRECA) y otras empresas del sector, la Guía de áridos reciclados de Andalucía, donde se contemplan nuevos usos para los áridos reciclados, como carreteras de baja intensidad de tráfico, vías urbanas y peatonales, vías ciclistas, caminos rurales, rellenos de zanja, material drenante, donde los requerimientos físico-mecánicos y químicos son menores que en la Red de Carreteras del Estado y más acordes con las propiedades de los áridos reciclados. La Guía establece las prescripciones técnicas que deben cumplir los áridos reciclados para

cada uno de estos usos. La hipótesis de partida es que los áridos reciclados son materiales alternativos a los áridos naturales (Ayuso y col., 2015).

Las prescripciones técnicas incluidas en la Guía se han establecido a partir de una extensa campaña experimental de ensayos de laboratorio, y de la construcción de diversos tramos experimentales para evaluar el comportamiento in-situ y a largo plazo de los materiales reciclados.

Entre los usos como materiales no ligados con cemento, se han establecido los siguientes:

- Zahorras recicladas
- Suelos reciclados
- Material drenante reciclado
- Árido fino reciclado para camas de tubería

Entre los usos como materiales ligados con cemento, se han establecido los siguientes:

- Suelo-cemento y Grava-cemento para firmes de carreteras
- Gravas recicladas para hormigón estructural y no estructural
- Gravas recicladas para hormigón compactado con rodillo

Los usos ligados con cemento dan a los áridos reciclados un mayor valor añadido.

Para fomentar el uso de los áridos reciclados de RCD, junto a la guía de áridos reciclados de Andalucía se han publicado una guía de buenas prácticas en la gestión y tratamiento de RCD y un catálogo de unidades de obra de áridos reciclados de RCD, que sin duda están suponiendo un avance muy significativo en el fomento del uso de áridos reciclados de RCD en Andalucía y resto de España. (Fig. 0.2)



Figura 0.2 Documentación técnica para el fomento de áridos

Sin embargo, toda esta documentación técnica no contempla el uso de arenas recicladas para la fabricación de morteros, siendo esta una aplicación poco investigada a nivel nacional e internacional y que de los estudios previos supone una alternativa viable (Jiménez y col., 2013; Ledesma y col., 2014; Ledesma y col., 2015, Fernández-Ledesma y col., 2016).

La fracción fina por lo general presenta una menor densidad y mayor absorción de agua que la fracción gruesa (Debied y col., 2009; Jiménez y col., 2013). En el árido reciclado de hormigón es debido al mortero adherido que otorga una superficie rugosa y mayor número de poros (Geng y Sun, 2013). La absorción de agua aumenta con el menor tamaño de partícula (Evangelista y Brito, 2014). Además, el árido reciclado muestra una forma irregular y mayor angulosidad que el árido natural (Evangelista y col., 2013). Asimismo, la fracción fina posee un mayor contenido en impurezas y concentración de cloruros y sulfatos (Rodríguez y col., 2013).

Hay estudios que manifiestan la viabilidad de utilizar la fracción fina de áridos reciclados de hormigón (FRCA) en la fabricación de hormigones con el uso de aditivos (Evangelista y de Brito, 2007; Evangelista y de Brito, 2010; Cartuxo y col., 2015; Cartuxo y col., 2016). El empleo de superplastificantes ayuda a disminuir la relación efectiva de agua/cemento, aumentar la densidad y resistencia mecánica, reducir la absorción de agua por capilaridad y la profundidad de carbonatación

(Cartuxo y col., 2016). Sin embargo, el comportamiento de las propiedades reológicas tales como la retracción y la fluencia no han sido del todo satisfactorias, lo que puede limitar su uso en hormigones estructurales (Cartuxo y col., 2015). Una alternativa viable para el uso de la fracción fina de los RCD sería la fabricación de morteros de albañilería cuyos requerimientos mecánicos son inferiores a los materiales estructurales.

Hoy existe un escaso conocimiento científico y técnico sobre el uso de áridos reciclados de RCD en la fabricación de morteros. La mayoría de los estudios publicados se limitan al empleo de áridos reciclados de hormigón. En España, como trabajos previos a esta tesis doctoral cabe destacar el trabajo de Jiménez y col. (2013), Fernández-Ledesma y col. (2016), Ledesma y col. (2015), Ledesma y col. (2014). Estos autores han llegado a la conclusión de que se puede sustituir hasta un 50% de arena natural por arena reciclada de RCD, de hormigón y mixta, sin que se vean significativamente afectadas las propiedades de los morteros en estado endurecido. La incorporación de áridos reciclados de RCD disminuye el tiempo de trabajabilidad de los morteros, debido a que los áridos se emplearon sin humectación previa, y a pesar de que el agua de absorción de los áridos fue compensada con el agua de amasado, no fue suficiente para conseguir un tiempo de trabajabilidad equivalente a los morteros de referencia. A la vista de los resultados obtenidos, estos autores proponen el uso de morteros hechos con áridos reciclados como morteros de albañilería en ambientes interiores, ya que la sensibilidad a los ciclos de hielo-deshielo es mayor en los morteros hechos con áridos reciclados, desaconsejando su uso en morteros de revestimiento exteriores.

A parte de los residuos ya mencionados, hay otros residuos industriales que se pueden incorporarse en la formulación de los morteros de albañilería, como son las cenizas no conformes de centrales termoeléctricas, las cenizas de biomasa, o los áridos reciclados finamente

triturados (pulverizados). Además, otra de las cuestiones poco estudiadas es la influencia del uso de aditivos plastificantes, superplastificantes, aireantes y retardadores de fraguado en las propiedades de los morteros hechos con residuos industriales.

Las cenizas no conformes de centrales termoeléctricas y las cenizas volantes de biomasa pueden sustituir total o parcialmente al cemento Portland en la fabricación de morteros (Ismail y col., 2014), lo cual contribuirá a mitigar el calentamiento global. Además, la producción de cemento también genera polvo químicamente activo que afecta negativamente al entorno cercano (Namarak y col., 2017) que podría minimizarse.

Las cenizas volantes se definen, según la norma española UNE-EN 450-1:2006+ A1:2008, como un polvo fino con partículas principalmente esféricas, cristalinas, originadas por la combustión del carbón pulverizado, con o sin materiales de combustión, que tiene propiedades puzolánicas y que está compuesto fundamentalmente de SiO_2 y Al_2O_3 , el contenido de SiO_2 reactivo, tal y como se define y describe en la norma EN 197-1:2011, es de, al menos, el 25% en masa. Dependiendo de la temperatura de combustión, el tipo de carbón y algunos otros factores, las cenizas volantes muestran diferentes propiedades en diferentes fracciones de tamaño (Erdogdu y col., 1998)

Son muchas y diversas las aplicaciones de las cenizas volantes, fundamentalmente se emplean para producir cemento, como rellenos en obras de infraestructuras y en otros usos.

La ceniza volante (FA) representa el 75 - 80% de la ceniza de carbón, la cual se usa como aditivo o adición al cemento y al hormigón. Por el contrario, la ceniza de fondo (BA) no suele ser utilizada por lo que continua almacenada en vertederos con el consiguiente impacto ambiental (Kim y col., 2012). En Europa las cantidades de FA y BA en el año 2007 fueron 61,2 mil toneladas, 5,7 mil toneladas respectivamente (Kim y col., 2012). El efecto combinado de la ceniza volante de central

termoeléctrica y árido reciclado de hormigón mejora las propiedades del hormigón (Kim y col., 2013). Esto es debido a las reacciones puzolánicas entre las cenizas volantes y el Ca(OH)_2 de los áridos reciclados de hormigón. La creciente producción de energía a partir de la combustión de biomasa exige dar salida a los residuos procedentes de esta combustión, principalmente cenizas volantes y cenizas de fondo (Cabrera-Montenegro 2016). Uno de los puntos que se tratan en la presente Tesis Doctoral es la viabilidad técnica de las cenizas volantes de biomasa para ser empleadas en morteros.

La biomasa es la fracción biodegradable de los productos, desechos y residuos de origen biológico procedentes de actividades agrarias, de la silvicultura y de las industrias afines.

España cuenta con más de 60 plantas de producción de energía eléctrica a partir de biomasa sólida con una producción superior a los 600 MW de potencia. Según datos del Ministerio de Industria, Energía y Turismo, el potencial de biomasa detectado en España representa el 15% de las necesidades energéticas. En España bajo hipótesis conservadoras, el potencial de biomasa disponible se sitúa en torno a 89 millones de toneladas de biomasa primaria en verde a los que habría que añadir los 12 millones de toneladas de biomasa secundaria seca obtenida de residuos de industrias agroforestales (IDEA).

La biomasa, ha sido tradicionalmente una importante fuente de energía y hoy en día es particularmente atractiva debido a su naturaleza inherente de ser respetuosa con el medio ambiente y renovable, se considera la fuente de energía renovable más prometedora (Ericsson, 2007). Se considera también que la biomasa es una fuente de energía renovable porque su valor proviene del sol. A través del proceso de fotosíntesis, las plantas capturan la energía solar y transforman el dióxido de carbono y el agua en carbohidratos para formar materia

orgánica. Toda esta materia es el origen de la biomasa que cuando se descompone o degrada libera la energía contenida en ella.

Las diferencias más significativas entre la biomasa y los combustibles fósiles son que, por un lado, ambos emiten CO₂ a la atmósfera, pero la biomasa equilibra estas emisiones con el CO₂ que absorbe en su período de fotosíntesis. Absorbe aproximadamente 1,3 t CO₂ por cada tonelada de biomasa (Sala y López, 2002), otra diferencia es que la biomasa no tiene tantos sulfuros.

El Plan de Energía Renovables (PER 2011-2020) resume claramente la cuestión de la situación de la biomasa en el mundo, exponiendo lo siguiente: La Agencia Internacional de la Energía en una de sus publicaciones, se hacía eco del Fondo de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura FAO.

Una de las principales aplicaciones de las cenizas de biomasa es la enmienda y fertilización de suelos (Vassilev y col.,2013-b), sin embargo, las cenizas de biomasa generalmente contienen trazas de elementos peligrosos lo que conlleva a una creciente preocupación por sus efectos sobre la salud y el medioambiente. La segunda aplicación de las cenizas de biomasa es como material de construcción (Vassilev y col.,2013-b).

No existen muchas investigaciones acerca de la idoneidad de las cenizas volantes de biomasa para su incorporación al hormigón y mortero. Algunos estudios como el de Wang y Baxter (2007) obtuvieron que al mezclar 20% de ceniza de biomasa y 80% de ceniza volante de carbón tipo C no afectaba significativamente a las propiedades mecánicas ni durabilidad de los hormigones convencionales. Por otro lado, Barbosa y col. (2013) observan que la resistencia a compresión disminuye cuando aumenta la incorporación de ceniza de biomasa. Actualmente, la mayor parte de las cenizas de biomasa producida en centrales térmicas se desecha en vertederos o se recicla en campos agrícolas o forestales, la mayoría de las veces esto sucede sin ningún tipo de control.

Debido a su alto nivel contaminante, las cenizas volantes no deben reciclarse en el medio ambiente sin un control previo, y deben eliminarse o tratarse como un residuo industrial si no tienen aprovechamiento. (Koppejan y Van Loo, 2012). Una posibilidad sería la incorporación de estas cenizas en materiales de construcción (Wang, S. y col., 2008). Cabrera-Montenegro (2016) estudió la viabilidad de aplicación de materiales reciclados y cenizas de biomasa en la fabricación de materiales tratados con cemento concluyendo que las cenizas de fondo de biomasa son subproductos industriales con un alto potencial de utilización en el ámbito de la construcción sostenible. Desde un punto de vista ambiental, estos materiales pueden ser utilizados en obras de infraestructura.

Otro de los materiales que tienen una gran importancia en la construcción son los aditivos, en la actualidad gracias al progreso de la industria química y recientemente la nanotecnología, los aditivos se han convertido en uno de los componentes esenciales en la construcción (Roussel, 2011), cada vez se emplean en mayor escala en la fabricación de morteros y hormigones de calidad. El aditivo no se limita a actuar sobre el cemento, sino que su acción se ejerce sobre los tres componentes de la mezcla: el árido, el cemento y el agua. En esta acción influye la naturaleza y la dosificación de cada uno de estos componentes.

El uso de aditivos nos va a permitir controlar propiedades tales como la trabajabilidad, exudación del estado fresco, tiempo de fraguado, resistencia inicial de la pasta de cemento, resistencia, impermeabilidad y durabilidad en estado fresco.

Tan pronto como las moléculas de los superplastificantes entran en contacto con las partículas de cemento, algunas de ellas se adsorben en las partículas de cemento creando partículas cargadas negativamente que se rechazan mutuamente, de modo que las partículas de cemento ya no floculan (Yamada y col., 2000). Es ampliamente conocido que

mediante la adición de superplastificantes (SP) se consigue una mejor fluidez. Por lo tanto, el papel de los superplastificantes en el hormigón y mortero es cada vez más importante.

Los superplastificantes deben usarse a una dosis apropiada si se deben evitar los efectos secundarios no deseados (Yamada y col., 2000). En algunos casos, estos efectos secundarios resultan en una pérdida de asentamiento rápida e irrecuperable, en otros casos en un retraso muy fuerte, en otros casos en una segregación severa o sangrado excesivo.

Las moléculas superfluidificantes no solo se adsorben en las partículas de cemento, sino que se convierten en parte de las fases hidratadas de aluminato de calcio (Yamada y col., 2000).

Con este trabajo se pretende estudiar la posible valorización de residuos industriales, tales como residuos mixtos de construcción y demolición, cenizas volantes no conformes de centrales termoeléctricas y cenizas volantes de biomasa con el fin de satisfacer las necesidades técnicas y constructivas dentro de un marco de desarrollo sostenible y economía circular. Durante el desarrollo experimental de la misma se ha tratado de abordar desde el punto de vista de la ingeniería, tres pilares que permiten alcanzar el concepto de construcción sostenible: viabilidad técnica, conservación de medioambiente y reutilización de recursos.

Referencias

Aitcin, P. C., Jolicoeur, C., & MacGregor, J. G. (1994). Superplasticizers: how they work and why they occasionally don't. *Concrete International*, 16(5), 45-52.

Ayuso Muñoz, J., Barbudo Muñoz, M. A., Jiménez Romero, J. R., Agrela Sainz, F., Pérez Galvín, A., López Aguilar, M., & José, M. (2015). Guía de áridos reciclados de residuos de construcción y demolición (RCD) de Andalucía Central. Disponible en:

<http://www.aridosrcdandalucia.es/rcd/guia-tecnica/>

Barbosa R, Lapa N, Dias D, Mendes B, 2013, Concretes containing biomass ashes: Mechanical, chemical, and ecotoxic performances, *Construction and Building Materials*, 40:1207-1214.

Cabrera Montenegro, M. (2016). Viabilidad de la aplicación de materiales reciclados y cenizas de biomasa en la fabricación de materiales tratados con cemento.

Cartuxo, F., de Brito, J., Evangelista, L., Jiménez, J. R., & Ledesma, E. F. (2015). Rheological behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates—Influence of the superplasticizer. *Construction and Building Materials*, 89, 36-47.

Cartuxo, F., de Brito, J., Evangelista, L., Jiménez, J. R., & Ledesma, E. F. (2016). Increased Durability of Concrete Made with Fine Recycled Concrete Aggregates Using Superplasticizers. *Materials*, 9(2), 98.

Debieb, F., Courard, L., Kenai, S., & Degeimbre, R. (2009). Roller compacted concrete with contaminated recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, 23(11), 3382-3387.

DIRECTIVA 2008/98/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 19 de noviembre de 2008 sobre los residuos y por la que se derogan determinadas Directivas.

<https://www.boe.es/doue/2008/312/L00003-00030.pdf>

Erdogdu, K., & Türker, P. (1998). Effects of fly ash particle size on strength of Portland cement fly ash mortars. *Cement and Concrete Research*, 28(9), 1217-1222

Ericsson, K. (2007). Co-firing—A strategy for bioenergy in Poland *Energy*, 32(10), 1838-1847.

Eurostat. Estadísticas explicadas. Producción e importación de energía. Disponible online:

http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Energy_production_and_imports

Evangelista, L., & De Brito, J. (2007). Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 29(5), 397-401.

Evangelista, L., & De Brito, J. (2010). Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 32(1), 9-14.

Evangelista, L., & De Brito, J. (2014). Concrete with fine recycled aggregates: a review. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 18(2), 129-172.

Evangelista, L., Guedes, M., Ferro, A. C., & de Brito, J. (2013). Microstructure of concrete prepared with construction recycled aggregates. *Microscopy and Microanalysis*, 19(S4), 147-148.

Fernández-Ledesma, E., Jiménez, J. R., Ayuso, J., Corinaldesi, V., & Iglesias-Godino, F. J. (2016). A proposal for the maximum use of recycled concrete sand in masonry mortar design. *Materiales de Construcción*, 66(321), 075.

Geng, J., & Sun, J. (2013). Characteristics of the carbonation resistance of recycled fine aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 49, 814-820.

Guía Española de áridos reciclados procedentes de RCD, (Proyecto GEAR 2007-2010).

[http://www.rcdasociacion.es/images/documents/guia%20\(1\).pdf](http://www.rcdasociacion.es/images/documents/guia%20(1).pdf)

I Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición (PNRCD) 2001-2006.

<https://www.boe.es/boe/dias/2001/07/12/pdfs/A25305-25313.pdf>

Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE) (2011). Situación y potencial de valoración energética directa de residuos. Estudio Técnico PER 2011-2020

http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_11227_e15_residuos_c3ead071.pdf

Ismail, I., Bernal, S.A., Provis, J.L., San Nicolas, R., Hamdan, S., & van Deventer, J.S. (2014). Modification of phase evolution in alkali-activated blast furnace slag by the incorporation of fly ash. *Cement and Concrete Composites*, 45, 125-135.

Jiménez, J. R., Ayuso, J., López, M., Fernández, J. M., & De Brito, J. (2013). Use of fine recycled aggregates from ceramic waste in masonry mortar manufacturing. *Construction and Building Materials*, 40, 679-690.

Khatib, J. M. (2005). Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate. *Cement and Concrete Research*, 35(4), 763-769.

Kim, H.K., Jeon, J.H., & Lee, H.K. (2012). Flow, water absorption, and mechanical characteristics of normal- and high- strength mortar incorporating fine bottom ash aggregates. *Construction and Building Materials*, 26 (1), 249-256.

Kim K, Shin M, Cha S, 2013, Combined effects of recycled aggregate and fly ash towards concrete sustainability. *Construction and Building Materials.*, 48:499-507

Koppejan, J., & Van Loo, S. (Eds.). (2012) *The handbook of biomass combustion and co-firing*. Routledge.

Ledesma, E. F., Jiménez, J. R., Fernández, J. M., Galvín, A. P., Agrela, F., & Barbudo, A. (2014). Properties of masonry mortars manufactured with fine recycled concrete aggregates. *Construction and building materials*, 71, 289-298.

Ledesma, E. F., Jiménez, J. R., Ayuso, J., Fernández, J. M., & de Brito, J. (2015). Maximum feasible use of recycled sand from construction and demolition waste for eco-mortar production–Part-I: ceramic masonry waste. *Journal of Cleaner Production*, 87, 692-706.

López-Gayarre, F., Serna, P., Domingo-Cabo, A., Serrano-López, M. A., & López-Colina, C. (2009). Influence of recycled aggregate quality and proportioning criteria on recycled concrete properties. *Waste management*, 29(12), 3022-3028.

Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (2010).

http://www.magrama.gob.es/es/ministerio/servicios/publicaciones/7-CAP-II-Gesti%C3%B3n_de_residuos_tcm7-128465.pdf

Ministerio de Obras Públicas, 2008. Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08. BOE 2008; 203:258-266.

http://www.fomento.gob.es/MFOM/LANG_CASTELLANO/ORGANOS_COLEGIADOS/MASORGANOS/CPH/instrucciones/EHE_es/

Namarak, C., Satching, P., Tangchirapat, W., & Jaturapitakkul, C. (2017). Improving the compressive strength of mortar from a binder of fly ash-calcium carbide residue. *Construction and Building Materials*, 147, 713-719.

ORDEN FOM/891/2004, de 1 de marzo, por la que se actualizan determinados artículos del pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes, relativos a firmes y pavimentos.

<http://www.boe.es/boe/dias/2004/04/06/pdfs/A14446-14509.pdf>

Pacheco-Torgal, F., Tam, V., Labrincha, J., Ding, Y., & de Brito, J. (Eds.). (2013). *Handbook of recycled concrete and demolition waste*. Elsevier.

Plan de Energías Renovables 2011-2020, IDEA, Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, 2011.

Plan Nacional Integrado de Residuos para el período 2008-2015.

<https://www.boe.es/boe/dias/2009/02/26/pdfs/BOE-A-2009-3243.pdf>

Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes PG-3.

http://www.fomento.gob.es/MFOM/LANG_CASTELLANO/DIRECCIONES_GENERALES/CARRETERAS/NORMATIVA_TECNICA/PPTG/P3/

REAL DECRETO 105/2008, de 1 de febrero, por el que se regula la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición.

<https://www.boe.es/boe/dias/2008/02/13/pdfs/A07724-07730.pdf>

Rodrigues, F., Carvalho, M. T., Evangelista, L., & de Brito, J. (2013). Physical–chemical and mineralogical characterization of fine aggregates from construction and demolition waste recycling plants. *Journal of Cleaner Production*, 52, 438-445.

Roussel, N. (Ed.). (2011). *Understanding the rheology of concrete*. Elsevier.

Sala, J.M., & López, L.M. (2002). *Plantas de Valorización Energética de Biomasa*. EDITORIAL OCHOA, Logroño (La Rioja).

Solís-Guzmán, J., Marrero, M., Montes-Delgado, M. V., & Ramírez-de-Arellano, A. (2009). A Spanish model for quantification and management of construction waste. *Waste Management*, 29(9), 2542-2548.

Tam, V. W., Gao, X. F., Tam, C. M., & Ng, K. M. (2009). Physio-chemical reactions in recycle aggregate concrete. *Journal of hazardous materials*, 163(2), 823-828.

Torres, A., Brandt, J., Lear, K., & Liu, J. (2017). A looming tragedy of the sand commons. *Science*, 357(6355), 970-971.

Vassilev SV, Baxter D, Andersen LK, Vassileva CG, 2013-b, An overview of the composition and application of biomass ash. Part 2. Potential

utilisation, technological and ecological advantages and challenges, *Fuel*, 105:19-39.

Wang, S., Miller, A., Llamazos, E., Fonseca, F., & Baxter, L. (2008). Biomass fly ash in concrete: mixture proportioning and mechanical properties. *Fuel*, 87 (3), 365-371

Wang S, Baxter L, 2007, Comprehensive study of biomass fly ash in concrete: strength, microscopy, kinetics and durability, *Fuel*, 88(11-12):1165–1170.

Yamada, K., Takahashi, T., Hanehara, S., & Matsuhisa, M. (2000). Effects of the chemical structure on the properties of polycarboxylate-type superplasticizer. *Cement and concrete research*, 30(2), 197-2

Objetivos de la tesis doctoral

El objetivo principal de la presente tesis doctoral es estudiar la viabilidad técnica del uso de diferentes residuos industriales, tales como áridos reciclados mixtos procedentes de construcción y demolición, cenizas volantes no conformes de centrales termoeléctricas de carbón, cenizas volantes procedentes de la combustión de biomasa y aditivos de última generación, para su aplicación en morteros de albañilería más amigables con el medioambiente compatibles con el fomento de la economía circular en el sector de la construcción.

Para la consecución del objetivo principal, la investigación se centrará en los siguientes objetivos específicos:

1. Estudiar el efecto de sustituir la fracción ultrafina de la arena natural ($<0,125\text{mm}$) por un árido reciclado mixto con alto contenido en partículas cerámicas finamente trituradas y utilizado como filler sobre las propiedades de los morteros, así como su evolución con el tiempo.

2. Estudiar el efecto de incorporar residuos de tabiquería con un alto porcentaje de partículas cerámicas con tamaño de arena y finamente trituradas (tamaño filler), así como de cenizas volantes no conformes de centrales termoeléctricas de carbón en las propiedades de los morteros frescos y endurecidos, así como su evolución con el tiempo.

3. Estudiar el efecto de diferentes tipos de aditivos plastificantes, superplastificantes, aireantes y retardadores de fraguado comerciales de última generación en las propiedades de morteros base cemento hechos con áridos naturales y áridos reciclados mixtos de residuos de construcción y demolición.

4. Estudiar el efecto de sustituir filler silíceo comercial por ceniza volante de biomasa en las propiedades de morteros industriales de

albañilería hechos con áridos naturales y áridos reciclados mixtos de residuos de construcción y demolición.

El conocimiento generado permitirá establecer tasas máximas de sustitución de áridos naturales por áridos reciclados y cenizas para disminuir la cantidad de cemento empleado en el diseño de morteros de albañilería.

El cuerpo principal de la tesis se estructura en cuatro capítulos donde se desarrollan cada uno de los objetivos específicos planteados.

CAPÍTULO 1: ÁRIDO RECICLADO CERÁMICO FINAMENTE TRITURADO COMO FILLER EN MORTEROS

1.1. Introducción

Los residuos de Construcción y Demolición (RCD) son generados como consecuencia de la actividad del sector de la construcción y se producen a lo largo de todo el ciclo de vida de la obra. Proceden mayoritariamente de derribos de edificios o de rechazos de los materiales de construcción en obras de infraestructuras, obras de nueva planta y de pequeñas obras de reformas en viviendas y urbanizaciones.

El aumento de la producción de este tipo de residuos, generados principalmente en los países desarrollados, ha desencadenado el desarrollo de numerosos estudios científico-técnicos para evitar su depósito en vertederos y fomentar su reciclado. Esto contribuiría notablemente a evitar la extracción de materias primas y el agotamiento de un recurso natural no renovable como son los áridos empleados en construcción (Topcu y Guncan, 1995; Debieb y col., 2009). A su vez, se han promulgado Directivas Europeas, Leyes, Decretos, Reales Decretos, Planes, Programas y Guías con el fin de gestionar adecuadamente los RCD y fomentar la reutilización, reciclaje y otras formas de valorización de los mismos. La implantación de un plan de gestión de RCD supone una mejora en la eficacia ambiental del área donde se implantan (Del Río Merino y col. 2009).

El fuerte crecimiento del sector de la construcción está generando a nivel global un agotamiento de los recursos naturales y un aumento de la producción de residuos de construcción y demolición (RCD). Este

hecho ha dado lugar a la publicación de numerosos estudios centrados en el uso de áridos reciclados de RCD en obras de edificación e ingeniería civil. El reciclado de los RCD permite aumentar el ciclo de vida de los materiales y minimizar el impacto ambiental adverso del sector de la construcción (Ortiz y col., 2009).

La fracción gruesa de los áridos reciclados (> 4mm) ha sido utilizada con buenos resultados en la construcción de carreteras y caminos rurales (Jiménez y col., 2012-a; Jiménez y col., 2012-b; Agrela y col., 2012) y en la fabricación de hormigones estructurales (Corinaldesi, 2010; Fonseca y col., 2011) y no estructurales (López-Uceda y col., 2016-a; López-Uceda y col., 2016-b).

La fracción fina de los áridos reciclados (0/4 mm) se ha utilizado en la fabricación de morteros de albañilería (Corinaldesi, 2009; Corinaldesi y Moriconi, 2009-a; Jiménez y col., 2013; Ledesma y col., 2014; Ledesma y col., 2015; Fernández- Ledesma y col., 2016; Neno y col., 2014) y en la fabricación de hormigones (Evangelista y Brito, 2007; Evangelista y Brito, 2010; Cartuxo y col., 2015; Cartuxo y col., 2016; Corinaldesi y Moriconi 2009-b).

Algunos autores han puesto de manifiesto que la fracción fina de los áridos reciclados de RCD tienen una ligera actividad cementante, lo cual se atribuye a cierta actividad puzolánica de los materiales cerámicos o a la hidraulicidad latente de los cementos de hormigones y morteros presente en los áridos reciclados (Arm, 2001; Sánchez de Rojas y col., 2001; Lin y col., 2010; Vegas y col., 2011).

Diversos autores han estudiado la posibilidad de incorporar la fracción más fina de los áridos reciclados o áridos reciclados pulverizados en la fabricación de morteros. Corinaldesi y col. (2002) obtuvieron unos resultados muy satisfactorios incorporando polvo de ladrillo procedente de demoliciones de edificios en la fabricación de morteros aditivados con fibras de acero y polipropileno. En otro estudio

más reciente Corinaldesi y col. (2010) sustituyó un 10% de arena por filler de mármol ($<75 \mu\text{m}$) y obtuvieron mayores resistencias a compresión que con el mortero de referencia después de 28 días de curado y muy buenos resultados de cohesión del mortero debido a la alta finura del filler de mármol.

Miranda y Selmo (2006-a) estudiaron el efecto de áridos reciclados de RCD de diferente composición y molidos en seco hasta un tamaño de partícula inferior a $75 \mu\text{m}$ en las propiedades mecánicas de los morteros. Estos autores obtuvieron mayores resistencias mecánicas a medida que aumentaba el porcentaje de áridos reciclados finos en la mezcla. Uno de los parámetros más importantes que hay que controlar en la dosificación es la relación de efectiva de agua/cemento [(a/c) ef.], ya que de ella dependerán las resistencias mecánicas finales y el tiempo de trabajabilidad del mortero fresco. Posteriormente, Miranda y Selmo (2006-b) sometieron las muestras de mortero a 10 ciclos de humedecimiento-secado, los ensayos se realizaron a diferentes temperaturas, y analizaron la resistencia a tracción y las grietas producidas. Estos autores concluyeron que la resistencia a tracción no se vio afectada por los cambios térmicos, pero si se produjo un mayor número de grietas en los morteros hechos con mayor contenido de finos e indicaron que éste debe limitarse al 25% para evitar la susceptibilidad a la aparición de grietas.

Silva y col. (2008) obtuvieron unos buenos resultados en morteros hechos con diferentes relaciones volumétricas de cemento: árido (1:5 y 1:6) y porcentajes de sustitución de hasta el 10% de árido natural por polvo cerámico. En un trabajo posterior, Silva y col. (2009) manteniendo una relación en volumen 1:4 (cemento: arena silíceo), incorporaron como filler un material cerámico finamente triturado, utilizaron distintos porcentajes: 0%, 5% y 10% en la fabricación de morteros. Encontraron una mejora general en las propiedades para el mortero con un 10% de incorporación de filler cerámico respecto del mortero de referencia.

Solamente se vieron afectadas la retracción y la permeabilidad al vapor que fueron un 13% y un 25% superiores respectivamente.

Otros autores usaron árido reciclado fino de hormigón en sus trabajos. Braga y col. (2012) añadieron árido fino procedente de residuos de hormigón (<0,150mm). Partiendo de una relación volumétrica 1:4 (cemento: árido) incorporaron en la arena el fino reciclado en un 0%, 5%, 10% y 15% en el mortero. Observaron una mejora de las propiedades mecánicas, así como un aumento de la densidad del mortero fresco y endurecido. La retracción del mortero fue la única propiedad que se vio afectada, con un incremento del 44% con respecto al mortero de referencia. En un trabajo más reciente, Braga y col. (2014) estudiaron el efecto de la incorporación de árido fino de hormigón reciclado (<0,150mm). Para ello fabricaron morteros con diferentes relaciones volumétricas de cemento: árido (1:4, 1:5, y 1:6) con una incorporación del 0% y del 15% de árido reciclado fino de hormigón. Encontraron incrementos de resistencia a compresión de un 30% en el mortero 1:5 hecho con 15% de finos y una reducción del 14% de resistencia a flexión.

En esta investigación se estudia el efecto de sustituir la fracción fina de la arena natural (<0,125mm) por un árido reciclado mixto finamente pulverizado y utilizado como filler sobre las propiedades físicas y mecánicas del mortero de albañilería base cemento, así como su evolución a largo plazo.

1.2. Materiales y métodos

1.2.1. Materiales

Una arena comercial silíceo (NA) fue usada como referencia. La fracción fina de la arena (FNA) fue obtenida en laboratorio como el material pasante por el tamiz 0,125mm.

El árido reciclado mixto pulverizado utilizado como filler (FRMA) fue obtenido en laboratorio triturando la fracción 0-4 mm de un árido reciclado mixto procedentes de la demolición de tabiquería de ladrillos cerámicos, recogido de una planta de reciclaje ubicada en Belmez (Córdoba, España). La trituración se realizó introduciendo 5 kg de árido reciclado mixto (RMA) en un molino de bolas, dando 3000 vueltas con 23 bolas de acero de 445 gr cada bola. El material triturado (Fig. 1.1) fue tamizado por el tamiz de 0,125mm para conseguir un tamaño máximo de partícula similar al FNA y las condiciones granulométricas exigidas a un material para ser empleado como filler por la Norma UNE-EN 13139:2003, es decir, el 100% del material debe pasar por el tamiz de 2 mm, del 85 al 100% por el tamiz de 0,125 mm y del 70 al 100% por el tamiz de 0,063 mm.

La Tabla 1.1 muestra la composición del material reciclado (RMA) calculada de acuerdo con la Norma UNE EN 933-11:2009.

Tabla 1.1: Composición del árido reciclado – RMA.

Clase	Tipo	Peso (%) RMA
R _A	Asfalto	0,00
R _B	Cerámica	53,9
R _C	Mortero de mampostería	40,2
R _L	Partículas ligeras	0,00
R _U	Áridos sin consolidar	5,70
X	Yeso	0,20



Figura 1.1: Árido reciclado mixto pulverizado (FRMA).

La Tabla 1.2 muestra la distribución del tamaño de partícula de los materiales empleados calculada conforme a la norma UNE-EN 933-1:2012. Se observa que el FNA no cumple la granulometría para ser considerado filler, ya que tiene menos del 70% de material pasante por el tamiz 0,063 mm. La Tabla 1.3 muestra las propiedades físico-químicas de los áridos usados. La superficie específica (SSA) de los materiales, calculado por el método BET, se determinó por adsorción de nitrógeno en un equipo Micromeritics ASAP 2010. El cemento utilizado fue un CEM II / B-L 32,5N cuyas especificaciones se detallan en Tabla 1.4.

Tabla 1.2: Distribución del tamaño de partícula de los materiales.

Tamaño del tamiz (mm)	Porcentaje pasante (%)		
	NA	FNA	FRMA
4	100,00	--	--
2	99,95	--	--
1	94,11	--	--
0,5	75,81	--	--
0,25	26,12	--	--
0,125	5,51	100	100
0,063	1,81	32,83	73,81

Tabla 1.3: Propiedades físico-químicas de los áridos.

Característica	Norma	NA	FNA	FRMA
Equivalente de arena (%)	UNE-EN 933-8/2012	94	--	--
Densidad de la muestra seca (b) ord (g/cm ³)	UNE-EN 1097-6/2014	2,60	--	--
Absorción de agua (b)(%)	UNE-EN 1097-6/2014	0,95	--	--
Coefficiente de friabilidad (%)	UNE 83115/1989	15	--	--
Sulfatos solubles en ácido (% SO ₃)	UNE-EN 1744-1/2010	< 0,01	< 0,01	1,04
Sulfuros totales (% SO ₃)	UNE-EN 1744-1/2010	< 0,01	< 0,01	1,04
Contenido húmico (%)	UNE-EN 1744-1/2010	ND(c)	ND(c)	ND(c)
Ácido fúlvico (%)	UNE-EN 1744-1/2010	ND(c)	ND(c)	ND(c)
Cloruros solubles en agua (% Cl)	UNE-EN 1744-1/2010	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Densidad aparente (g/cm ³)	UNE-EN 1097-3/1999	-	0,74	0,95
Densidad por el voluménometro real Le Chatelier (g/cm ³)	UNE 80103/2013	--	2,61	2,52
Superficie específica (m ² /g)	--	--	3,47	7,06

(a) Más fino que 0,063 mm; (b) Fracción 0,063/4 mm; (c) No detectado

Tabla 1.4: Características del CEM II / BL 32,5 N.

Constituyentes	
Clinker (%)	≥65
Caliza (%)	≤35
Minoritarios (%)	≤5
Características químicas	
Sulfatos (%)	<3,5
Cloruros (%)	<0,04
Cromo VI en agua soluble (UNE-EN 196-10) (%)	<0,0002
SiO ₂ (%)	15,58
CaO (%)	61,65
Al ₂ O ₃ (%)	3,64
Fe ₂ O ₃ (%)	2,01
MgO (%)	0,91
SO ₃ (%)	2,65
K ₂ O (%)	0,83
LOI (%)	14,16
Características físicas	
Densidad (g/cm ³)	2,89
Superficie Blaine (cm ² /g)	5360
Expansión (Le Châtelier) (mm)	<2,5
Fase inicial (min)	>75
Fase final (min)	<275
Características mecánicas	
Resistencia a compresión a 7 días (MPa)	>24,0
Resistencia a compresión a 28 días (MPa)	>34,0 y <52,5

1.2.2. Diseño experimental

El estudio fue realizado para dos clases de morteros, uno de baja resistencia (Mortero de baja resistencia- LSM) y otro de alta resistencia (Mortero de alta resistencia - HSM). Se utilizó una relación en volumen cemento: árido de 1:7 y 1:4 para HSM y LSM respectivamente. Para cada uno de los dos tipos de morteros ensayados, la fracción ultrafina de la arena (0-0,125 mm) fue sustituida en peso por FRMA a tres niveles: 0%, 50% y 100%. La Fig. 1.2 muestra un esquema del diseño experimental. Las dosificaciones para fabricar 1,6 litros de cada uno de los seis tipos de morteros estudiados se indican en la Tabla 1.5. Para cada clase de

mortero, la cantidad de agua añadida se mantuvo constante, obteniéndose como la necesaria para conseguir una consistencia plástica del mortero, que esté dentro de los límites de 175 ± 10 mm en mesa de sacudidas (UNE-EN 1015-3:2000). Para reducir el agua de amasado, se utilizó un aditivo plastificante (Neoplast) en todas las mezclas de morteros con una dosificación de $0,1 \text{ cm}^3$. Se puede observar, que el valor medio de escurrimiento es mayor al aumentar el porcentaje de sustitución del FRMA. Esto puede ser debido a la mayor cantidad de partículas inferiores a $0,063 \text{ mm}$ y a la mayor densidad aparente de FRMA. Al realizar la sustitución en peso, el volumen de mortero con 100% de FRMA es menor y la cantidad de agua por volumen de mortero amasado es mayor.

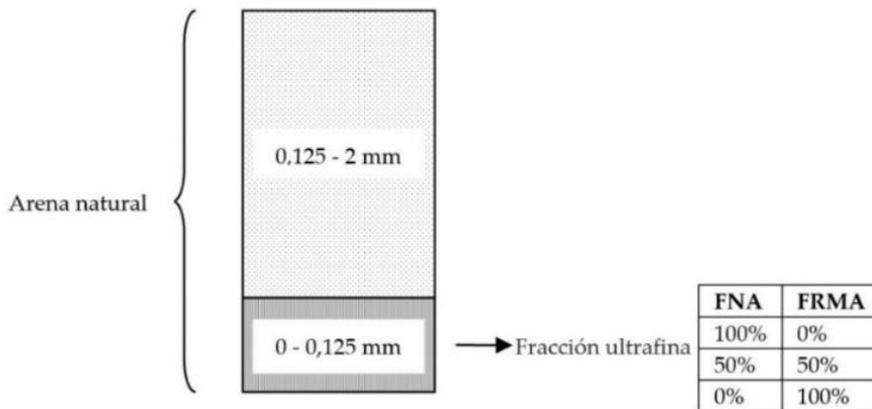


Figura 1.2: Diagrama del diseño experimental.

1.2.3. Métodos

Las propiedades del mortero fresco y endurecido estudiadas son mostradas en la Tabla 1.6, donde se especifica la normativa utilizada, el número de repeticiones, las condiciones de curado y las edades de realización de los ensayos.

Tabla 1.5: Proporciones de la mezcla del mortero.

Tipo de mortero	Proporciones de la mezcla – masa seca							a/c total
	NA (g)	FNA (g)	FRMA (g)	CEM (g)	Agua (g)	Aditivos (cm ³)	consistencia ± SD (mm)	
	Morteros de baja resistencia - LSM (Proporción volumétrica 1:7)							
RM-1:7	3435,29	200,51	0	578	761,23	0,1	167,70 ± 2,51	1,32
M50-1:7	3435,29	100,26	100,26	578	761,23	0,1	175,10 ± 5,15	1,32
M100-1:7	3435,29	0	200,51	578	761,23	0,1	181,53 ± 3,20	1,32
	Morteros de alta resistencia- HSM (Proporción volumétrica 1:4)							
RM-1:4	3140,83	183,33	0	924,8	696,37	0,1	173 ± 3,67	0,75
M50-1:4	3140,83	91,66	91,66	924,8	696,37	0,1	177,60 ± 6,02	0,75
M100-1:4	3140,83	0	183,33	924,8	696,37	0,1	183,00 ± 2,46	0,75

Tabla 1.6: Normas usadas para caracterizar los morteros.

Propiedades del mortero fresco	Norma	Muestras y dimensiones	Cámara climática	Tiempo de curado
Densidad aparente del mortero fresco	EN 1015-6:1999	3	--	--
Aire ocluido	EN 1015-7:1999	3	--	--
Tiempo de trabajabilidad	EN 1015-9:2000	3	--	--
Propiedades del mortero endurecido				
Densidad aparente seca	EN 1015-10:2000	3 Prismática 40 x 40 x 160 mm	Cámara-1 (7 días) Cámara-2 (resto del tiempo de curado)	28 días
Resistencia a flexión	EN 1015-11:2000	3 Prismática 40 x 40 x 160 mm	Cámara-1 (7 días) Cámara-2 (resto del tiempo de curado)	7, 28, 90, 180 días
Resistencia a compresión	EN 1015-11:2000	3 Prismática 40 x 40 x 80 mm	Cámara-1 (7 días) Cámara-2 (resto del tiempo de curado)	7, 28, 90, 180 días
Retracción	UNE 83831:2010	3 Prismática 40 x 40 x 160 mm	Cámara-1 (7 días) Cámara-2 (resto del tiempo de curado)	Hasta 203 días
Absorción de agua por capilaridad	EN 1015-18:2003	18 Prismática 40 x 40 x 80 mm	Cámara-1 (7 días) Cámara-2 (resto del tiempo de curado)	28 días

(1) Condiciones climáticas: Cámara-1: T_a = 20±2 °C HR = 95±5 %; Cámara-2: T_a = 20±2 °C HR = 65±5 %

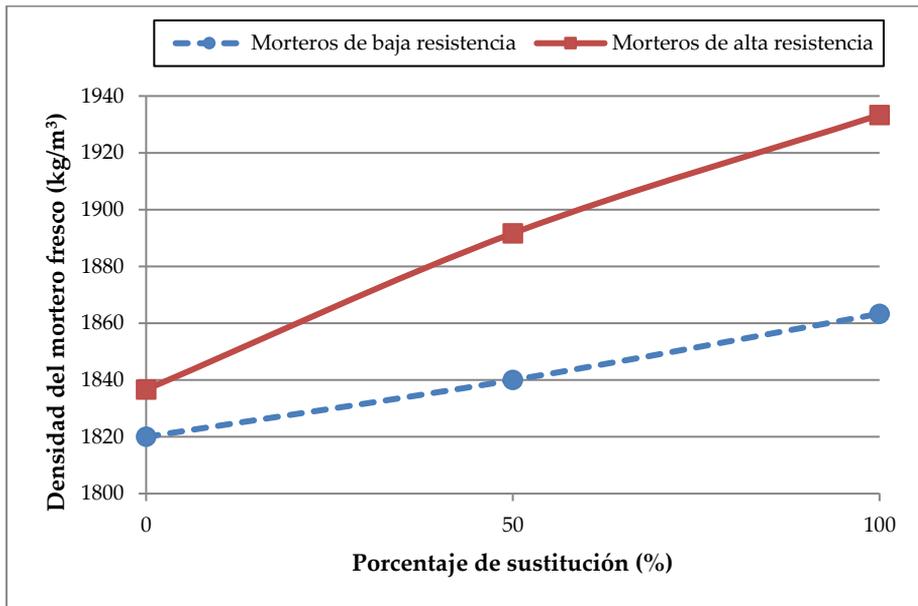
1.3. Resultados

1.3.1. Densidad aparente del mortero fresco

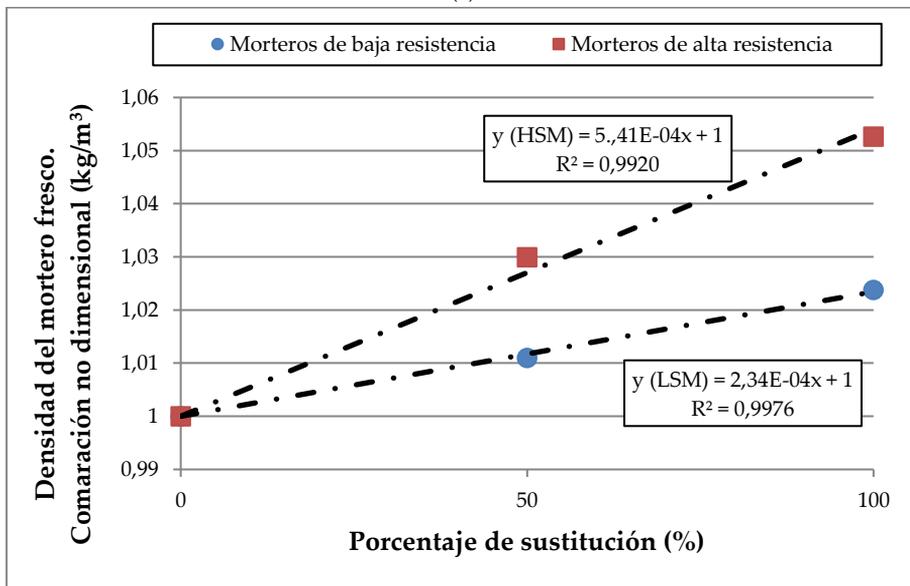
La densidad del mortero fresco aumentó proporcionalmente con el porcentaje de sustitución de FRMA. La Fig. 1.3-a muestra los valores medios obtenidos para cada uno de los morteros fabricados y la desviación estándar de las 3 repeticiones realizadas. Los morteros hechos con FRMA muestran una mayor densidad debido a la mayor densidad aparente del FRMA (Tabla 1.3). El FRMA tiene una granulometría más continua y mayor porcentaje de finos ($<0,063\text{mm}$) que el FNA, por tanto, con el uso de FRMA se consigue una mezcla más compacta. También se observan unos valores más altos para la clase HSM, esto es debido a que los morteros de alta resistencia poseen mayor contenido de cemento, el cual tiene una mayor densidad que el resto de los materiales. Los incrementos de HSM con respecto a LSM son del 0,91%, 2,81% y 3,76% para sustituciones de 0%, 50% y 100% respectivamente.

En la Fig. 1.3-b, se representa para cada clase de mortero el porcentaje de variación de la densidad fresca con relación a cada uno de los morteros de referencia (RM-1:7 y RM-1:4). Se observan unas excelentes correlaciones entre el grado de sustitución y la densidad fresca del mortero. El incremento de la densidad con el grado de sustitución de FRMA fue mayor para la clase HSM, esto puede estar justificado por la menor cantidad de agua empleada en los morteros HSM con respecto a los LSM.

Por contra Silva y col. (2009) obtuvieron una tendencia contraria. Estos autores incorporaron hasta un 10% de un filler cerámico con una densidad aparente más baja que la del FRMA utilizado en este estudio. Braga y col. (2012) y Braga y col. (2014) obtuvieron una tendencia similar incorporando árido reciclado fino de hormigón.



(a)



(b)

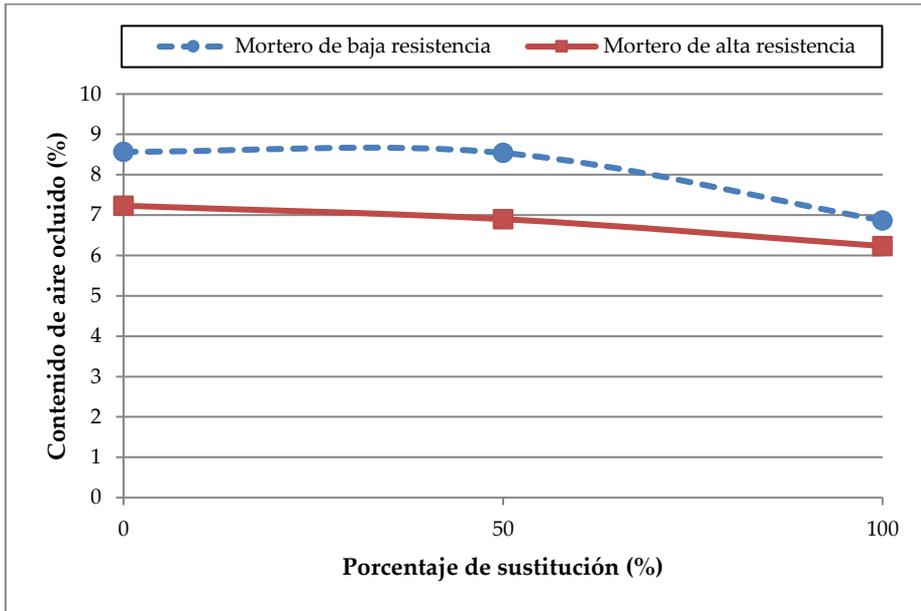
Figura 1.3: (a) Densidad aparente del mortero fresco (promedio de tres muestras) [SD (kg/m³): (1) Morteros de baja resistencia: 0% = 10; 50% = 10; 100% = 21 (2) Morteros de alta resistencia: 0% = 15; 50% = 8; 100% = 6]; (b) Comparación no dimensional.

1.3.2. Contenido de aire ocluido

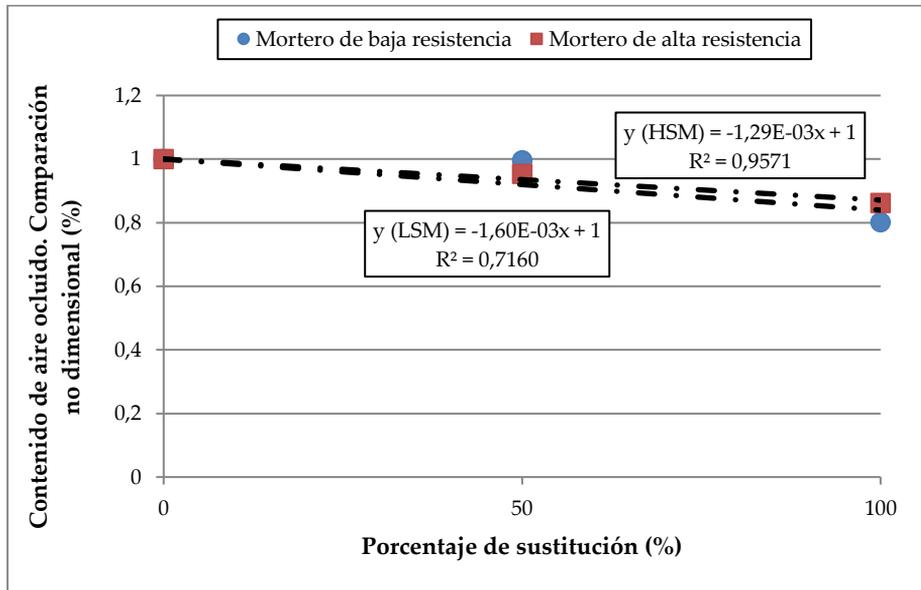
El contenido de aire ocluido disminuyó con el porcentaje de sustitución de FNA por FRMA (Fig. 1.4). El mayor contenido de partículas de tamaño inferior a 0,063 mm del FRMA (Tabla 1.2) hace que el porcentaje y el tamaño de los huecos disminuya, y por consiguiente se reduzca el porcentaje de aire ocluido. En los morteros LSM se obtienen valores más altos de contenido de aire ocluido que en los HSM, lo cual está justificado por la mayor relación a/c del LSM en relación al HSM. Como puede observarse en la Fig. 1.4-a, en los morteros LSM se produce un descenso más acusado del contenido de aire ocluido al aumentar la tasa de sustitución (-24,74%) frente a los morteros HSM de alta resistencia (-16,05%).

En la Fig. 1.4-b se aprecia que existe una buena correlación lineal entre la variación en el contenido de aire ocluido respecto al mortero de referencia y la tasa de sustitución para las dos clases de morteros estudiadas. Los morteros LSM presentan ligeramente una mayor pendiente, siendo estos los más susceptibles al sustituir FNA por FRMA.

Hay pocos estudios previos sobre la influencia de la fracción ultrafina de áridos reciclados en los resultados de contenido de aire ocluido, sólo hay referencias relativas al uso de la fracción fina (0/4 mm) de áridos reciclados. Así, Jiménez y col. (2013) no encontraron diferencias en esta propiedad en morteros con sustitución de arena natural por arena reciclada cerámica (0%, 5%, 10%, 20% y 40%) con una relación volumétrica de 1:7 y usando un cemento CEM IV/A (V) 32,5N. Tampoco se hallaron diferencias significativas de esta propiedad en otros trabajos donde se sustituyó hasta el 100% una arena natural (<4mm) por una arena reciclada mixta (Ledesma y col., 2015) y una arena reciclada de hormigón (Fernández-Ledesma y col., 2016).



(a)



(b)

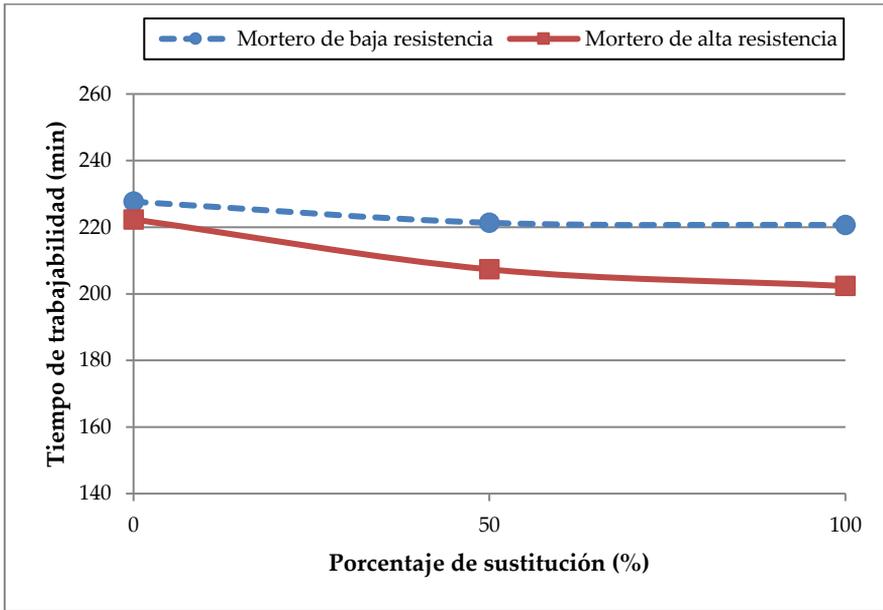
Figura 1.4: (a) Contenido de aire ocluido (promedio de tres muestras) [SD (%): (1) Morteros de baja resistencia: 0% = 0,9; 50% = 1,1; 100% = 0,9 (2) Morteros de alta resistencia: 0% = 1,5; 50% = 1,3; 100% = 0,5]; (b) Comparación no dimensional.

1.3.3. Tiempo de trabajabilidad

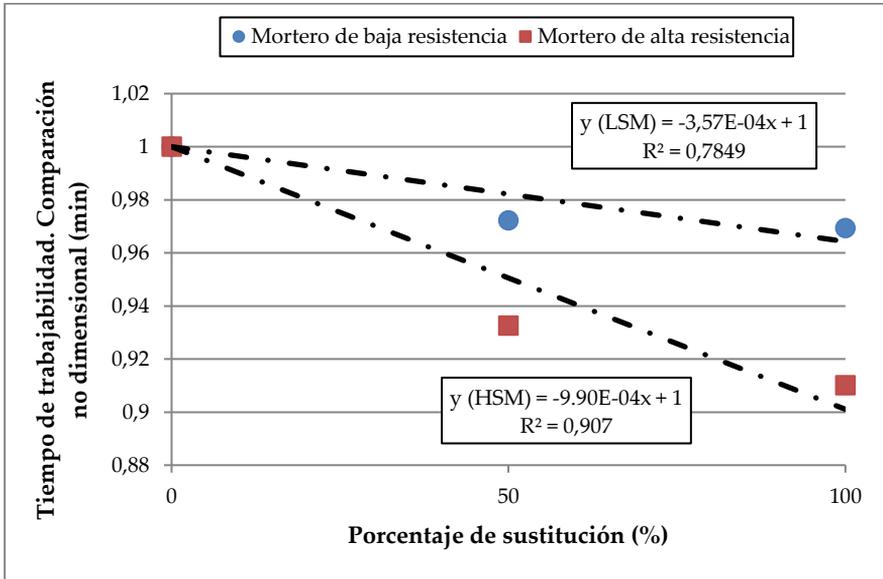
La Fig. 1.5-a muestra el tiempo de trabajabilidad para las diferentes tasas de sustitución y tipo de mortero. El tiempo disminuye con la incorporación de FRMA, no encontrándose diferencias significativas entre los tiempos correspondientes al 50% y 100% de sustitución para las dos tipos de mortero. El mortero HSM presenta valores más bajos de trabajabilidad, aunque estas diferencias no son significativas a efectos prácticos.

En los morteros LSM se produce un descenso del tiempo de trabajabilidad del 3,17% entre el mortero de referencia RM-1:7 y el M100-1:7, mientras que para los morteros HSM este descenso es del 9,88%. En la Fig. 1.5-b se observa que existe una buena correlación lineal entre la variación del tiempo de trabajabilidad y la tasa de sustitución para los dos tipos de morteros estudiados. Así mismo, se aprecia que la sustitución de FRMA produce unos mayores descensos en los morteros de alta resistencia HSM, lo cual está justificado por la menor relación a/c de los morteros HSM frente a los LSM.

Estos resultados son similares a los obtenidos por otros autores (Jiménez y col., 2013, Ledesma y col., 2014, Ledesma y col., 2015 y Fernández- Ledesma y col., 2016), quienes atribuyen la pérdida de trabajabilidad a la mayor absorción de agua de los áridos reciclados.



(a)



(b)

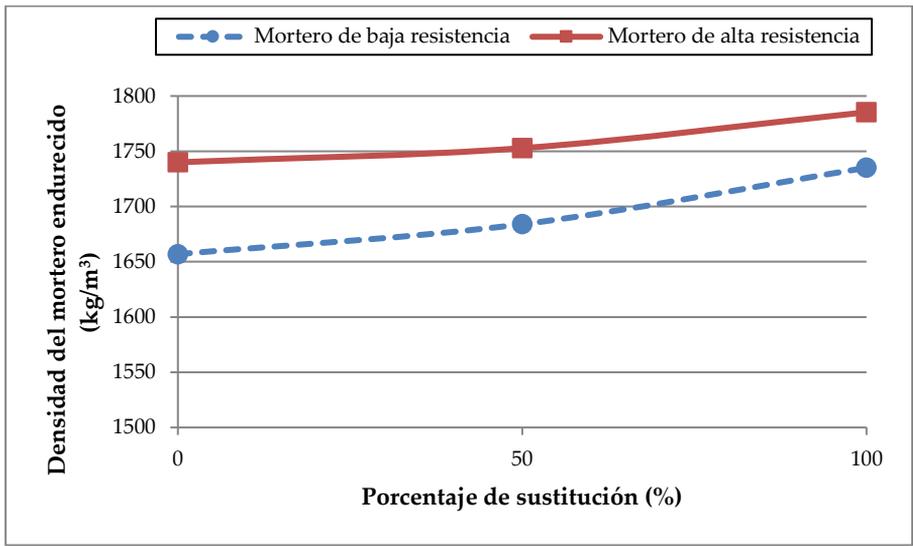
Figura 1.5: (a) Tiempo de trabajabilidad (promedio de 3 muestras) [SD (min)]: (1) Morteros de baja resistencia: 0% = 3,2; 50% = 6,4; 100% = 6,0 (2) Morteros de alta resistencia: 0% = 3,1; 50% = 3,8; 100% = 4,0]; (b) Comparación no dimensional.

1.3.4. Densidad aparente seca del mortero endurecido a los 28 días

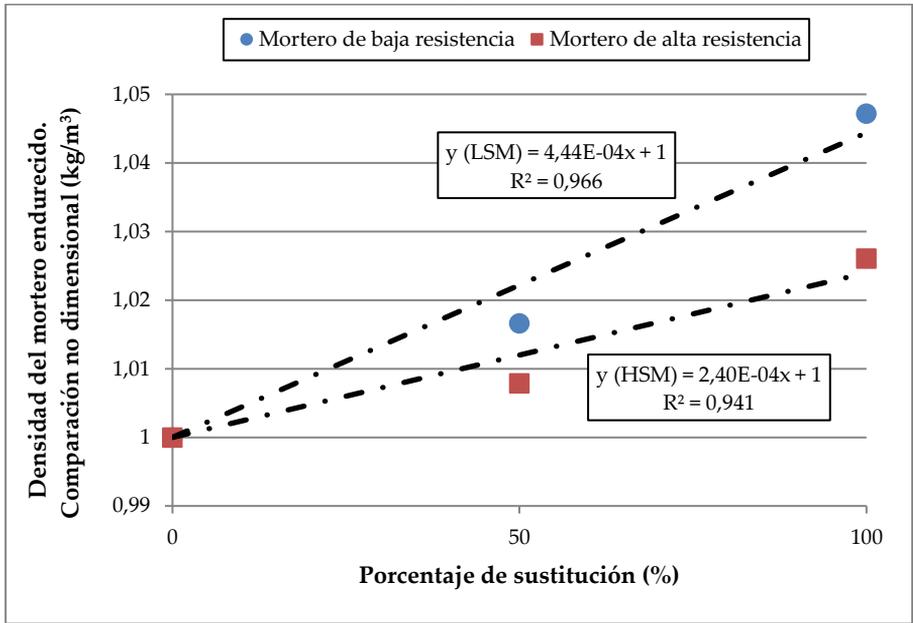
En la densidad aparente seca del mortero endurecido ocurre igual que en la densidad aparente del mortero fresco, la densidad aumenta al aumentar la tasa de sustitución de FRMA tanto para los morteros LSM como para los HSM (Fig. 1.6). Esto es debido, a que los poros de los morteros son rellenados por el FRMA en mayor medida que por el FNA, originando un aumento de la densidad (Fig. 1.6-a). Así mismo se aprecia que los morteros HSM tienen mayores densidades que los equivalentes LSM debido a la mayor cantidad de cemento de estos últimos.

En la Fig. 1.6-b se muestra que existe una buena correlación lineal entre la variación de densidad respecto a los morteros de referencia (RM-1:7 y RM-1:4) y la tasa de sustitución. Así mismo, se aprecia que los aumentos de densidad son mayores en los morteros LSM de baja resistencia. La distribución de las partículas finas de FRMA en la matriz de los seis morteros fabricados se muestra en la Fig. 1.7, donde se observa que en los morteros LSM el efecto del FRMA rellenando huecos es más notable, lo que coincide con la correlación obtenida en el gráfico de la Fig. 1.6-b.

Estos resultados son coherentes con los obtenidos por Silva y col. (2009), Jiménez y col. (2013) y Ledesma y col. (2014), quienes concluyeron que con sustituciones de 5% y 10% de arena natural por arena reciclada de RCD se producen aumentos de densidad en el mortero debido al mayor porcentaje de finos de las arenas recicladas que rellenan los poros del mortero.



(a)



(b)

Figura 1.6: (a) Densidad aparente de la primera etapa del mortero endurecido (promedio de tres muestras) [SD (kg/m3): (1) Morteros de baja resistencia: 0% = 35; 50% = 10; 100% = 10 (2) Morteros de alta resistencia: 0% = 20; 50% = 10; 100% = 10]; (b) Comparación no dimensional.

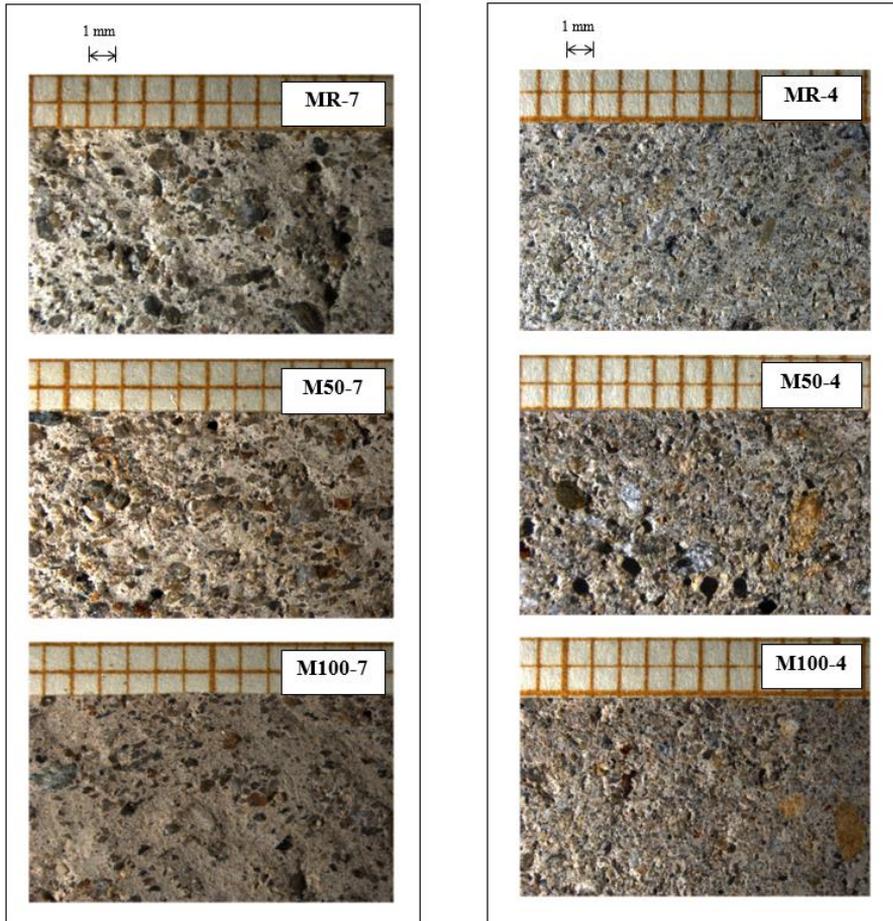


Figura 1.7: distribución de las partículas finas de FRMA en la matriz de los seis morteros fabricados.

1.3.5. Resistencia a compresión y a flexión del mortero endurecido

La Fig. 1.8 muestra los resultados de resistencia a compresión de los morteros fabricados para las edades de 7, 28, 180 y 360 días. En los morteros LSM no se aprecia de manera significativa el efecto del FRMA, ya que las resistencias obtenidas para los diferentes tiempos de curado son muy similares para las tres tasas de sustitución. A los 360 días de curación se obtiene un incremento de resistencia del 2,1% y de 5,3% para

tasas de sustitución del 50% y 100% respectivamente con relación al mortero de referencia. Sin embargo, en los morteros de alta resistencia (HSM) el efecto del filler cerámico es más apreciable ya que a los 360 días los incrementos de resistencia son del 4,4% y del 6,9% respectivamente. Desde un punto de vista práctico, la incorporación de FRMA podría ahorrar cemento en la fabricación de mortero de albañilería sin reducir sus resistencias mecánicas, lo que tendría dos efectos beneficiosos para el medio ambiente: (i) aumentar la tasa de reciclado de RCD y (ii) disminuir el consumo de cemento y las emisiones de CO₂ derivadas de la producción del mismo.

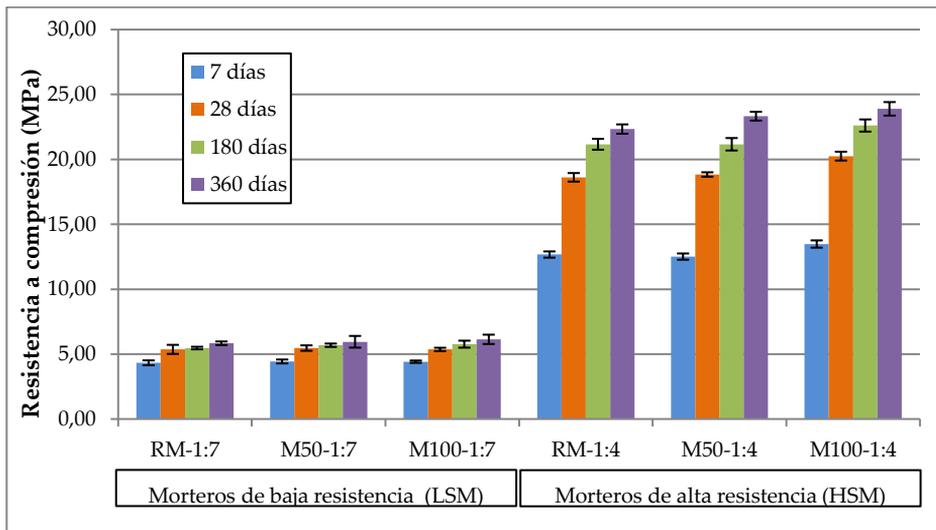


Figura 1.8: Resistencia a compresión de morteros endurecidos (promedio de tres muestras).

En todos los morteros se observó un incremento de resistencias a compresión a lo largo del tiempo. Para el 100% de sustitución de FNA por FRMA se produjo un incremento de resistencia a los 360 días en relación a la obtenida a los 7 días del 39,2% para el mortero de baja resistencia (LSM) y del 77,2% para el de alta resistencia (HSM). El efecto del FRMA fue mayor en los morteros de alta resistencia.

La Fig. 1.9 muestra los resultados de resistencia a flexión. En las dos clases de mortero (LSM y HSM), la resistencia a flexión aumenta con el tiempo en todos los morteros realizados. En los morteros de baja resistencia LSM para el 100% de sustitución y a 28 días de curado se produce un aumento del 9,0% en la resistencia a flexión en relación al mortero de referencia, mientras que en los morteros HSM este incremento es del 11,5%. Sin embargo, a 360 días estos valores son del -4,4% y del 0,3% para el LSM y el HSM respectivamente, por lo que a largo plazo no se aprecia el efecto del FRMA.

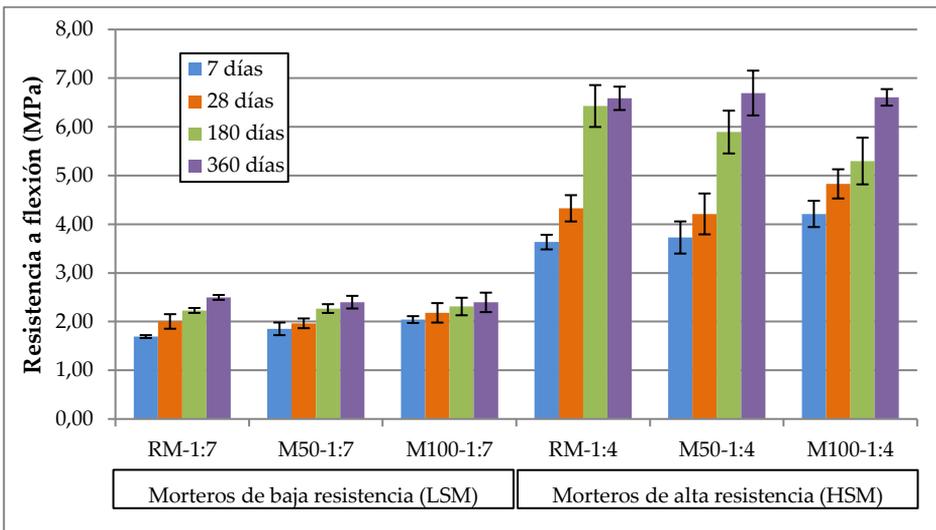


Figura 1.9: Resistencia a flexión de morteros endurecidos (promedio de tres muestras).

Silva y col. (2009), también observaron un aumento casi lineal de las resistencias de flexión y compresión con la adición de finos cerámicos, siendo la resistencia a compresión en el mortero con un 10% de incorporación de filler cerámico un 77,5% superior respecto del mortero con 0% de incorporación de filler cerámico. De igual forma, Corinaldesi y col. (2002) observaron un incremento de la resistencia a flexión y compresión a lo largo del tiempo, siendo un 27 % superior la resistencia

a compresión a 90 días del mortero con polvo de ladrillo cerámico respecto a la obtenida a los 28 días de curación.

La Fig. 1.10 muestra una excelente correlación entre la resistencia a flexión y compresión considerando los resultados obtenidos para las seis amasadas y los cuatro tiempos de curado.

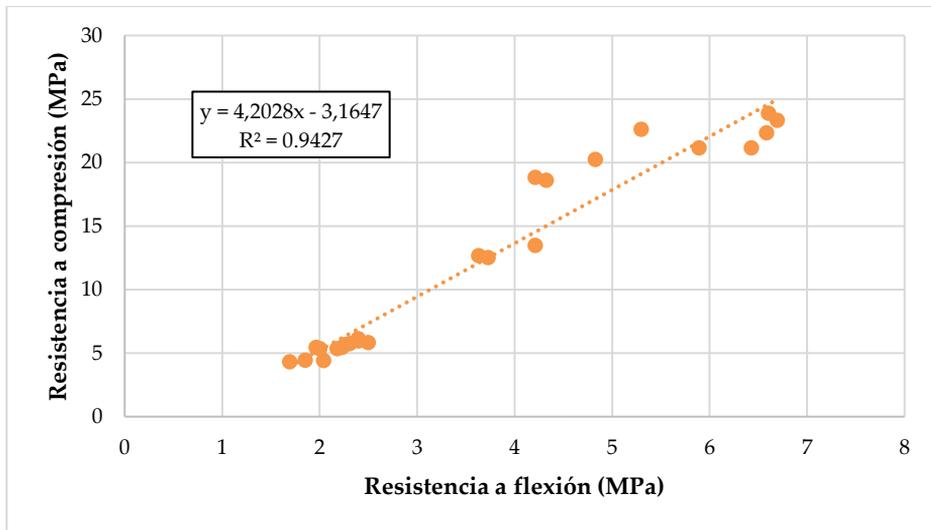


Figura 1.10: Correlación entre la Resistencia a compresión y a flexión.

1.3.6. Inestabilidad dimensional (retracción)

Las Fig. 1.11 y 1.12 muestran la evolución de la retracción con el tiempo para los morteros de baja y alta resistencia respectivamente. La retracción es ligeramente mayor en los morteros fabricados con FRMA y en los morteros HSM, aunque este incremento no es significativo a efectos prácticos. Para tasas de sustitución del 100% se obtuvieron a los 28 días unos incrementos de retracción del 7,55% y del 5,17% para los morteros LSM y HSM respectivamente. A pesar del mayor contenido de cemento de los morteros HSM, la menor relación a/c puede influir en que el incremento de retracción de estos morteros sea menor en comparación con los morteros LSM.

Miranda y Selmo (2006-a) encontraron las mayores diferencias de retracción a los 21 días con valores de $-1,8$ mm/m en morteros con contenido superior al 40% de material fino menor de $75\mu\text{m}$. En este estudio el contenido de filler ($<0,125\text{mm}$) representa un 5,51% por lo que la retracción obtenida es 2,25 veces inferior en el mortero con mayor retracción (M100-4) que la encontrada por los autores citados. Silva y col. (2009) también obtuvieron mayores retracciones en los morteros fabricados con filler cerámico, aunque el valor que obtuvieron a los 28 días era de $-0,38$ mm/m en el mortero de un 10% de incorporación. Sin embargo, aquí usando una misma proporción 1:4 (cemento:árido) hemos obtenido $-0,61$ mm/m de retracción con el M100-4, esto puede ser debido a la distinta composición del filler y método de amasado utilizado.

La Fig. 1.13 muestra la pérdida de masa de los morteros con el tiempo, observándose disminuciones drásticas de peso hasta los 14 días, debido a la pérdida de agua del mortero. A esta edad se producen las mayores diferencias de retracción de los morteros con FRMA en relación a los morteros de referencia, lo que pone de manifiesto que se trata de una retracción por secado de la probeta. Los morteros HSM pierden menos cantidad de agua que los LSM, debido a la menor cantidad de agua necesaria para su amasado.

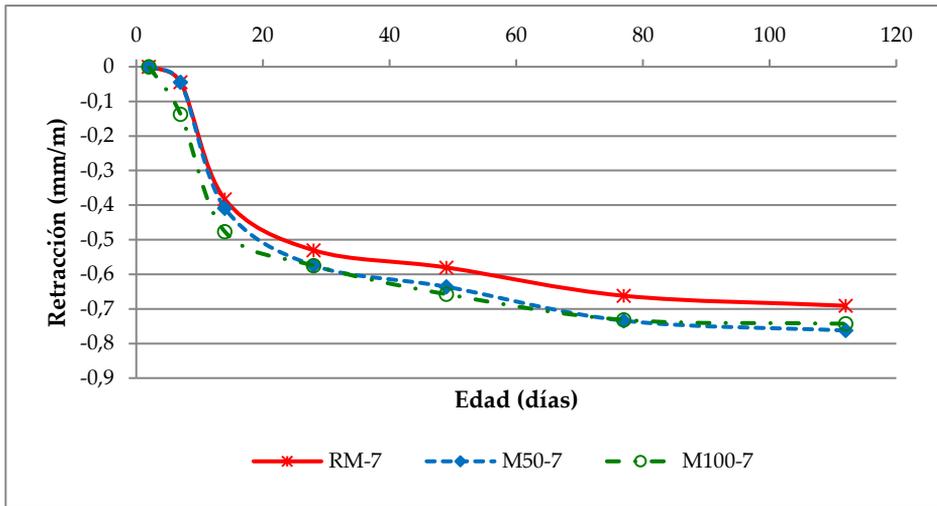


Figura 1.11: Retracción de morteros de baja Resistencia en función de la edad en días (promedio de nueve muestras) (HR = 65% y T = 20 °C).

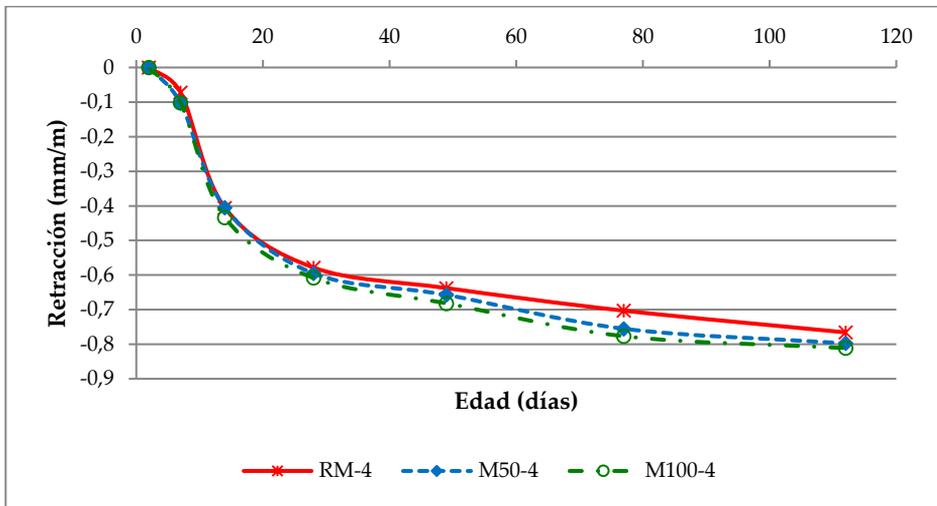


Figura 1.12: Retracción de morteros de alta resistencia en función de la edad en días (promedio de nueve muestras) (HR = 65% y T = 20 °C).

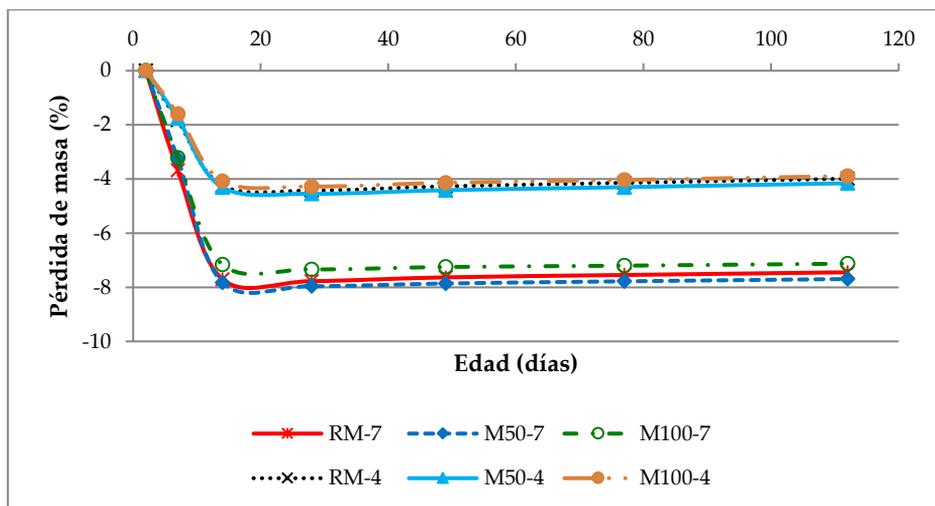
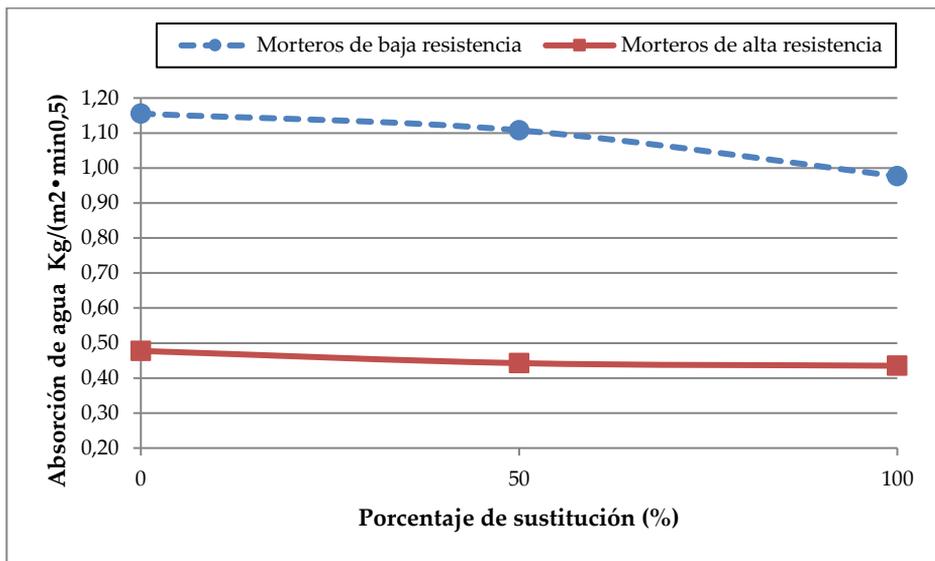


Figura 1.13: Pérdida de masa del mortero en función de la edad en días (HR = 65% y T = 20 °C).

1.3.7. Absorción de agua por capilaridad del mortero endurecido

La Fig. 1.14-a muestra los resultados de absorción de agua por capilaridad obtenidos. Se aprecia un efecto positivo del FRMA, ya que se produce un descenso en la absorción de agua por capilaridad para las dos clases de morteros (HSM y LSM) que es mayor a medida que aumenta la tasa de sustitución. Esto es debido a las mayores densidades de los morteros hechos con FRMA con relación a los morteros de referencia. Para el 100% de tasa de sustitución el descenso con relación al mortero de referencia es de un 15,52% y de un 8,33% para los morteros LSM y HSM respectivamente. El efecto del FRMA es mayor en los morteros LSM ya que produce mayores descensos en la absorción por capilaridad tal y como se aprecia en la Fig. 1.14-b. Estos resultados concuerdan con los obtenidos por Braga y col. (2012, 2014) en morteros fabricados con árido fino reciclado de hormigón y con Silva y col. (2009) que obtiene un descenso lineal de la absorción por capilaridad.



(a)

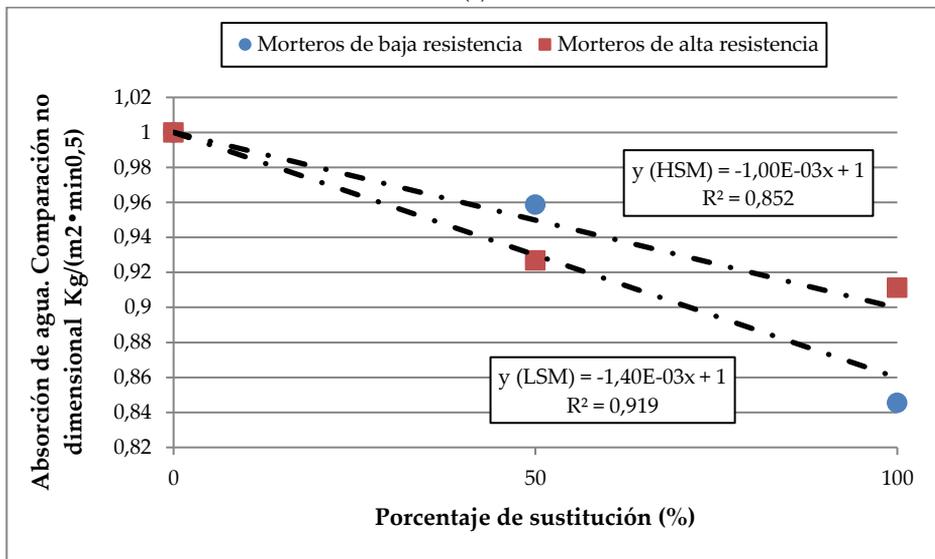


Figura 1.14: (a) Absorción de agua de mortero endurecido (promedio de dieciocho muestras) [SD (kg/ (m²•min^{0.5})): (1) Morteros de baja resistencia: 0% = 0,00; 50% = 0,01; 100% = 0,01 (2) Morteros de alta resistencia: 0% = 0,01; 50% = 0,02; 100% = 0,00]; (b) Comparación.

1.4. Conclusiones

Este trabajo estudia el efecto de sustituir la fracción ultrafina (< 0,125 mm) de una arena silícea por un árido reciclado mixto procedente de la demolición de una tabiquería de ladrillo cerámico finamente triturado (FRMA) en las propiedades de dos tipos de morteros de albañilería: mortero de baja resistencia (LSM) hecho con una relación volumétrica cemento:árido de 1:7 y un mortero de alta resistencia (HSM) hecho con una relación volumétrica cemento:árido de 1:4. A continuación se detallan las conclusiones más relevantes obtenidas en este capítulo.

1) Propiedades del mortero fresco:

La densidad del mortero fresco aumentó linealmente a medida que aumentó el porcentaje de sustitución de FRMA. Este incremento fue mayor en los morteros HSM. El porcentaje de aire ocluido disminuyó al sustituir el FRMA, aunque no significativamente. Estos resultados se deben a la mayor cantidad de finos del FRMA con respecto a la arena natural. La sustitución de FRMA disminuyó ligeramente el período de trabajabilidad, aunque todos los morteros se mantuvieron por encima de los 200 minutos, lo cual, es factible para su uso como morteros de albañilería.

2) Propiedades del mortero endurecido:

La densidad del mortero endurecido aumentó con el uso de FRMA debido a la mayor cantidad de finos del FRMA. En los morteros de LSM se consigue obtener un M-5 a 28 días mientras que en los HSM llega a conseguirse un M-15, excepto en el caso del motero M100:1:4 con el que se obtiene un M-20. El uso de FRMA incrementó las resistencias mecánicas en los dos tipos de morteros. Las resistencias mecánicas de los morteros hechos con FRMA se incrementaron significativamente con el tiempo.

La retracción fue ligeramente mayor con el uso de FRMA, aunque desde un punto de vista práctico estos incrementos no son significativos para morteros a emplear en obras de fábrica para la unión de ladrillos. El porcentaje de absorción por capilaridad disminuyó linealmente con el uso de FRMA, debido al efecto filler del mismo.

1.5. Normas usadas en el trabajo experimental

UNE 80103. Métodos de ensayos de cementos. Ensayos físicos. Determinación de la densidad real por la norma de Chatelier. CEN; 2013

UNE 83115. Áridos para hormigones. Medida del coeficiente de friabilidad de las arenas. CEN; 1989 EX

UNE 83831. Métodos de ensayo de los morteros para albañilería endurecidos- Determinación de la estabilidad dimensional de los morteros para albañilería endurecidos. CEN; 2010 EX.

UNE-EN 13139. Áridos para morteros. CEN; 2003.

UNE-EN 1097-3. Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 3: Determinación de la densidad aparente y la porosidad. CEN; 1999.

UNE-EN 1097-6. Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos- Parte 6: Determinación de la densidad de partículas y la absorción de agua. CEN; 2014.

UNE-EN 1744-1. Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos. Parte 1: Análisis químico. CEN; 2010.

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. CEN; 2012.

UNE-EN 933-8. Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 8: Evaluación de los finos. Ensayo del equivalente de arena. CEN; 2012.

UNE-EN 933-11. Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos - Parte 11: Ensayo de clasificación de los componentes de los áridos gruesos reciclados. CEN; 2009.

UNE-EN 1015-3. Métodos de ensayo para morteros de albañilería. Parte 3: Determinación de la consistencia del mortero fresco (por la mesa de sacudidas). CEN; 2000.

UNE-EN 1015-6. Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 6: Determinación de la densidad aparente del mortero fresco. CEN; 1999.

UNE-EN 1015-7. Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 7: Determinación del contenido en aire en el mortero fresco. CEN; 1999.

UNE-EN 1015-9. Métodos de ensayo de los morteros para albañilería - Parte 9: Determinación del período de trabajabilidad y del tiempo abierto del mortero fresco. CEN; 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. CEN; 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. CEN; 2000.

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. CEN; 2003.

1.6. Referencias bibliográficas

Agrela, F., Barbudo, A., Ramírez, A., Ayuso, J., Carvajal, M. D., & Jiménez, J. R. (2012). Construction of road sections using mixed recycled aggregates treated with cement in Malaga, Spain. *Resources, Conservation and Recycling*, 58, 98–106.

Arm, M. (2001). Self-cementing properties of crushed demolished concrete in unbound layers: Results from triaxial tests and field tests. *Waste Management*, 21, 235–239.

Braga, M., de Brito, J., & Veiga, R. (2012). Incorporation of fine concrete aggregates in mortars. *Construction and Building Materials*, 36, 960–968.

Braga, M., de Brito, J., & Veiga, R. (2014). Reduction of the cement content in mortars made with fine concrete aggregates. *Materials and Structures*, 47(1–2), 171–182.

Cartuxo, F., de Brito, J., Evangelista, L., Jiménez, J. R., & Ledesma, E. F. (2015). Rheological behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates – Influence of the superplasticizer. *Construction and Building Materials*, 89, 36–47.

Cartuxo, F., de Brito, J., Evangelista, L., Jiménez, J. R., & Ledesma, E. F. (2016). Increased durability of concrete made with fine recycled concrete aggregates using superplasticizers. *Materials*, 9, 98.

Corinaldesi, V. (2009). Mechanical behavior of masonry assemblages manufactured with recycled-aggregate mortars. *Cement and Concrete Composites*, 31, 505–510.

Corinaldesi, V. (2010). Mechanical and elastic behaviour of concretes made of recycled-concrete coarse aggregates. *Construction and Building Materials*, 24, 1616–1620.

Corinaldesi, V., Giuggiolini, M., & Moriconi, G. (2002). Use of rubble from building demolition in mortars. *Waste Management*, 22, 893–899.

Corinaldesi, V., & Moriconi, G. (2009a). Behaviour of cementitious mortars containing different kinds of recycled aggregate. *Construction and Building Materials*, 23, 289–294.

Corinaldesi, V., & Moriconi, G. (2009b). Influence of mineral additions on the performance of 100% recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 23, 2869–2876.

Corinaldesi, V., Moriconi, G., & Naik, T. R. (2010). Characterization of marble powder for its use in mortar and concrete. *Construction and Building Materials*, 24, 113–117.

Corinaldesi, V., & Moriconi, G. (2011). The role of industrial by-products in self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 25, 3181–3186.

Corinaldesi, V. (2012). Environmentally-friendly bedding mortars for repair of historical buildings. *Construction and Building Materials*, 35, 778–784.

Evangelista, L., & de Brito, J. (2007). Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 29, 397–401.

Evangelista, L., & de Brito, J. (2010). Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 32, 9–14.

Fernández- Ledesma, E., Jiménez, J.R., Ayuso, J., Corinaldesi, V., & Iglesias-Godino, F. J. (2016). A proposal for the maximum use of recycled concrete sand in masonry mortar design. *Materiales de Construcción*, 66, e075.

Fonseca, N., de Brito, J., & Evangelista, L. (2011). The influence of curing conditions on the mechanical performance of concrete made with recycled concrete waste. *Cement and Concrete Composites*, 33, 637–643.

Jiménez, J.R., Ayuso, J., Agrela, F., López, M., & Galvín, A.P. (2012). Utilisation of unbound recycled aggregates from selected CDW in unpaved rural roads. *Resources, Conservation and Recycling*, 58, 88–97.

Jiménez, J.R., Ayuso, J., Galvín, A.P., López, M., & Agrela, F. (2012). Use of mixed recycled aggregates with a low embodied energy from non-selected CDW in unpaved rural roads. *Construction and Building Materials*, 34, 34–43.

Jiménez, J.R., Ayuso, J., López, M., Fernández, J.M., & de Brito, J. (2013). Use of fine recycled aggregates from ceramic waste in masonry mortar manufacturing. *Construction and Building Materials*, 40, 679–690.

Kirgiz, M. S. (2011). Chemical of blended cement pastes. *Journal of Construction Engineering and Management*, 137, 1036–1042

Kirgiz, M.S. (2014). Effects of blended-cement paste chemical composition changes on some strength gains of blended-mortars. *The Scientific World Journal*, 2014.

Kirgiz, M. S. (2015a). Use of ultrafine marble and brick particles as raw materials in cement manufacturing. *Materials and Structures*, 48, 2929–2941.

Kirgiz, M. S. (2015b). Strength gain mechanisms of blended-cements containing marble powder and brick powder. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 19, 165–172.

Kirgiz, M. S. (2016). Advancements in mechanical and physical properties for marble powder–cement composites strengthened by nanostructured graphite particles. *Mechanics of Materials*, 92, 223–234.

Ledesma, E. F., Jiménez, J. R., Fernández, J. M., Galvín, A. P., Agrela, F., & Barbudo, A. (2014). Properties of masonry mortars manufactured with fine recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, 71, 289–298.

- Ledesma, E. F., Jiménez, J. R., Ayuso, J., Fernández, J. M., & de Brito, J. (2015). Maximum feasible use of recycled sand from construction and demolition waste for eco-mortar production–Part-I: ceramic masonry waste. *Journal of Cleaner Production*, 87, 692-706.
- Lin, K. L., Wu, H. H., Shie, J. L., Hwang, C. L., & Cheng, A. (2010). Recycling waste brick from construction and demolition of buildings as pozzolanic materials. *Waste Management & Research*, 28(7), 653-659.
- López-Uceda, A., Ayuso, J., López, M., Jimenez, J.R., Agrela, F., & Sierra, M.J. (2016). Properties of non-structural concrete made with mixed recycled aggregates and low cement content. *Materials*, 9,74.
- López-Uceda, A., Ayuso, J., Jiménez, J. R., Agrela, F., Barbudo, A., & de Brito, J. (2016). Upscaling the use of mixed recycled aggregates in non-structural low cement concrete. *Materials*, 9,91.
- Miranda, L.F., & Selmo, S.M. (2006a). CDW recycled aggregate renderings: Part I – Analysis of the effect of materials finer than 75 μm on mortar properties. *Construction and Building Materials*, 20,615–624.
- Miranda, L. F., & Selmo, S. M. (2006b). CDW recycled aggregate renderings: Part II – Analysis of the effect of materials finer than 75 μm under accelerated aging performance. *Construction and Building Materials*, 20,625–633.
- Neno, C., Brito, J. D., & Veiga, R. (2014). Using fine recycled concrete aggregate for mortar production. *Materials Research*, 17,168–177.
- Ortiz, O., Castells, F., & Sonnemann, G. (2009). Sustainability in the construction industry: A review of recent developments based on LCA. *Construction and Building Materials*, 23,28–39.
- De Rojas, M. S., Frías, F., Rivera, J., Escorihuela, M. J., & Marin, F. P. (2001). Research about the pozzolanic activity of waste materials from calcined clay. *Materiales de Construcción*, 51(261), 45-52.

Silva,J., de Brito,J., & Veiga,R.(2008).Fine ceramics replacing cement in mortars partial replacement of cement with fine ceramics in rendering mortars. *Materials and Structures*, 41, 1333–1344.

Silva,J., de Brito,J., & Veiga,R.(2009).Incorporation of fine ceramics in mortars.*Construction and Building Materials*, 23, 556–564.

Vegas,I., Ibañez,J.A., Lisbona,A., deCortazar,A.S., & Frías,M.(2011).Pre-normative research on the use of mixed recycled aggregates in unbound road sections.*Construction and Building Materials*,25,2674–2682.

CAPÍTULO 2: USO COMBINADO DE CENIZAS VOLANTES NO CONFORMES Y ÁRIDOS RECICLADOS MIXTOS EN MORTERO

2.1. Introducción

El carbón sigue siendo un combustible importante para la producción de energía en Europa (UE-28). De acuerdo con el sitio web de Eurostat, los estados miembros de la UE-28 consumieron 308 millones de toneladas (MMT) de hulla y 432 MMt de lignito en 2013. El carbón pulverizado se quema en las centrales termoeléctricas, donde se genera una gran cantidad de productos de la combustión del carbón (CCPs). Dependiendo de los componentes minerales del carbón y de la técnica de combustión, se identifican hasta seis productos CCPs diferentes: cenizas volantes (FA), cenizas de fondo (BA), escoria de la caldera (BS), cenizas de combustión de lecho fluidizado (FBC), producto de absorción semi-seca (SDA) y el yeso de desulfuración de gases de combustión (FGD). De acuerdo con la Asociación Europea de productos de la combustión del carbón (ECOBA), se 2015 se produjeron aproximadamente 105 MMt de productos de la combustión del carbón (CCPs) en Europa (UE-28). Las cenizas volantes fueron el producto CCP más importante, representando el 68% del total (Bech and Feuerborn, 2011).

En España, hay 22 plantas termoeléctricas que producen 10 MMt de cenizas por año, aunque con una clara tendencia descendente. Sin embargo, de acuerdo con los informes anuales publicados por las empresas eléctricas españolas, aproximadamente el 60% de las cenizas

volantes (FA) se utiliza como materia prima en la fabricación del cemento, adición de hormigón, estabilización de suelos arcillosos para la construcción de carreteras o rellenos, quedando el material restante depositado en vertederos o almacenado sin uso en las propias centrales termoeléctricas. Estos datos son comparables con los de otros países, como el Reino Unido (Carroll, 2015).

De acuerdo con la decisión de la Unión Europea 2014/955/UE, las cenizas de la combustión del carbón están catalogadas como residuo con el código 10 01 02. La Directiva Europea Marco de Residuos (Directiva 2008/98/CE) especifica que cualquier material considerado residuo debe reutilizarse o reciclarse y de esta manera dejar de ser considerado un residuo. Las cenizas de la combustión del carbón están sujetas a la normativa REACH (registro, evaluación, autorización y restricción de sustancias químicas).

La composición química y mineralogía de la FA está determinada por la fuente de carbón y la tipología de la central termoeléctrica. En España, la mayoría de las plantas son plantas termoeléctricas convencionales. La Fig. 2.1 muestra el diagrama de flujo de la producción de cenizas volantes en una planta de energía termoeléctrica convencional. La ceniza volante está contenida en los gases de combustión de los hornos de quemado de hulla o lignito a 1100 °C - 1400 °C. Cinco puntos de recogida están situados a través de la corriente de gas de combustión desde la salida de la caldera a la chimenea: CP-1 (protector), CP-2 (calentador de aire secundario), CP-3 (calentador de aire primario), CP-4 (precalentadores de aire) y CP-5 (precipitador electrostático). La recogida de cenizas en los puntos CP-1 a CP-4 se realiza por sedimentación por gravedad en las tolvas instaladas en la parte inferior. La ceniza recogida se transporta a un silo donde se almacena (Silo 1). Antes de salir de la chimenea, los gases de combustión son conducidos a un precipitador electrostático (CP-5), donde las partículas suspendidas son ionizadas y atraídas por las placas

colectoras, un sistema de martillos golpean las placas colectoras para conseguir que la ceniza caiga a un sistema de tolvas situado en el fondo. Esta ceniza se transporta y se almacena en un silo diferente.

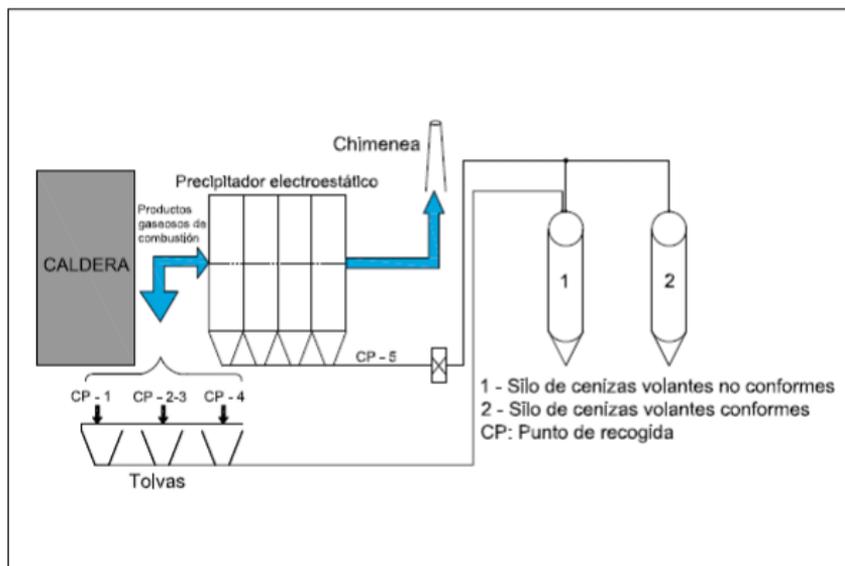


Figura 2.1: Esquema de producción de cenizas volantes en una central termoeléctrica convencional.

Sólo la ceniza volante recogida del precipitador electrostático (CP-5) se utiliza como FA conformes de acuerdo con la norma europea UNE-EN 450-1: 2013 y UNE-EN 450-2: 2006. Esta ceniza volante contiene una mezcla heterogénea de SiO_2 , Al_2O_3 y Fe_2O_3 y cumple con las especificaciones y criterios de conformidad para ser utilizada como adición mineral en la fabricación de hormigón (Ahmaruzzaman, 2010). La ceniza volante conforme es ampliamente demandado por la industria de la construcción, y su producción no es un problema para las plantas termoeléctricas.

Las cenizas recogidas en los puntos CP-1 a CP-4 no cumple con las especificaciones y criterios de conformidad requeridos por las citadas normas europeas, especialmente debido a que exceden la especificación de finura. Si la masa retenida por el tamiz de 0,045 mm es más del 40%

según la UNE-EN 933-10: 2010, la ceniza se considera ceniza volante no conforme (Nc-FA). Esta ceniza no conforme ha sido utilizada como materia prima en la fabricación del cemento por las empresas cementeras de España. Desde el comienzo de la crisis de la industria de la construcción en 2008, la Nc-FA ya no se demanda o tiene grandes dificultades para su puesta en el mercado. Por esta razón, en España, la mayor parte de la ceniza no conforme se almacena en las plantas termoeléctricas o se deposita en vertederos autorizados, con el consiguiente despilfarro de un material reciclable. La FA no conforme representa entre el 30% y el 40% del total de ceniza volante producida, lo que revela la magnitud del problema ambiental.

La acumulación o el depósito en vertederos de FA no conforme se opone a la jerarquía de gestión de residuos establecida por la Directiva Marco de Residuos (Directiva 2008/98 / CE), según la cual el depósito en vertedero es la última y la peor opción. Esto justifica la necesidad de estudiar alternativas viables para el uso de las cenizas no conformes. El uso de estas cenizas no conformes sin tratamiento previo como filler en la fabricación de morteros es una alternativa poco estudiada que puede resultar técnica, económicamente y medioambientalmente factible.

El mortero de albañilería es una mezcla de arena, cemento y agua, adición de minerales (relleno) y aditivos. La arena es un recurso natural no renovable extraído de ríos, orillas de la costa o trituración de roca, y su consumo conlleva un alto impacto ambiental (Saviour, 2012). Una forma de reducir el consumo de arena natural es utilizar áridos finos reciclados obtenidos de residuos de construcción y demolición (RCD) como arena reciclada (Jiménez y col., 2013; Neno y col., 2014; Ledesma y col., 2014; Ledesma y col., 2015; Fernández-Ledesma y col., 2016). Los RCD son un flujo prioritario de residuos en la Unión Europea. Estos residuos se componen principalmente de residuos hormigón y mampostería (Comisión Europea, Dirección General del Medio Ambiente (DG ENV), 2011). En los países mediterráneos, los principales

componentes de los residuos de mampostería son los ladrillos cerámicos y el mortero (Jiménez y col., 2013). La Directiva Marco de Residuos 2008/98/CE establece una tasa mínima de reciclaje del 70% para el año 2020. Actualmente, en España, la fracción fina obtenida del proceso de reciclaje de los residuos de mampostería está infrautilizada y, en la mayoría de los casos, se deposita en vertederos o se almacena en las plantas de reciclaje. El uso de arena reciclada es una alternativa viable que ayuda a aumentar la tasa de reciclaje de RCD.

Ledesma y col. (2015) demostraron que se puede sustituir hasta un 50% de arena natural por arena reciclada de mampostería en la fabricación de morteros de albañilería tipo M-10. Estos autores utilizaron un CEM-II / BL 32,5 N en una proporción volumétrica de cemento:árido de 1:5. Se obtuvieron mejores resultados en un trabajo previo de Jiménez y col. (2013), donde se utilizó la misma arena reciclada y un cemento puzolánico CEM-IV / A (V) 32,5 N. Estos mejores resultados se atribuyeron al tipo de cemento, cuya composición tenía un 29% de FA conformes.

Otros autores han demostrado que el efecto combinado de las cenizas volantes de carbón y áridos reciclados de hormigón (RCA) mejora las propiedades del hormigón (Kim y col., 2013). Estos resultados se explican por las reacciones puzolánicas entre la ceniza volante y $\text{Ca}(\text{OH})_2$ contenidos en los RCA. Kou y Poon (2013) encontraron mejoras a largo plazo usando una porcentaje de sustitución del 50% de grava natural por la fracción gruesa de un RCA y una proporción de sustitución de hasta el 25% de cemento por FA conforme. No hay estudios previos sobre el efecto combinado de los áridos reciclados de residuos de mampostería y cenizas volantes no conformes.

La adición de filler mineral en la fabricación de morteros se obtiene moliendo rocas silíceas o calizas. Según la ley Von Rittinger, la energía requerida para llevar a cabo la molienda de las partículas es proporcional a la raíz cuadrada del tamaño de partícula, lo que explica

por qué estos materiales tienen mucha energía incorporada. Silva y col. (2009) y Braga y col. (2012) utilizaron partículas ultrafinas de ladrillo de arcilla roja y de residuos de hormigón, respectivamente, en la producción de mortero. El uso de residuos de FA no conforme sin tratar o residuos de mampostería en polvo como material de relleno en la producción de mortero es una alternativa poco estudiada.

En este capítulo se investiga los efectos del uso de cenizas volantes no conformes, generadas en una central termoeléctrica convencional, como filler en morteros hechos con arena natural y arena reciclada de residuos mixtos de mampostería. La incorporación de los áridos reciclados mixtos de mampostería finamente triturados (pulverizados) también se ensaya como una alternativa al filler natural.

La emergente recuperación económica del sector de la construcción en España es una oportunidad para incorporar estos residuos en la fabricación de morteros de albañilería. Desde un punto de vista medioambiental, el uso combinado de cenizas volantes no conformes acopiadas en las plantas termoeléctricas y áridos reciclados mixtos con alto porcentaje de partículas cerámicas procedentes de mampostería, es una gran oportunidad para reducir el consumo de arena natural y promover un mayor valor añadido para algunos residuos actualmente infrutilizados en España.

2.2. Materiales y métodos.

2.2.1. Diseño experimental

Se diseñaron tres familias de morteros para evaluar el efecto combinado de las cenizas volantes no conformes y de los áridos reciclados a partir de residuos de mampostería con alto porcentaje de partículas cerámicas en las propiedades del mortero.

- Familia-1: dedicada a evaluar el efecto de la sustitución de filler silíceo (Si-F) por cenizas volantes no conformes (Nc-FA) en morteros hechos con arena natural (NA). Se ensayaron tres tasas de sustitución de Si-F por Nc-FA: 0% (mortero de referencia), 50% y 100%. Una proporción constante de masa seca de 1: 7: 0,6 (cemento: arena natural: filler silíceo) se utilizó en el mortero de referencia.
- Familia-2: dedicada a evaluar el efecto de la sustitución de Si-F por Nc-FA en mortero hecho con un 50% de NA y 50% de arena reciclada obtenida a partir de residuos de mampostería con alto porcentaje de partículas cerámica (FRMA). El NA se sustituyó por FRMA en volumen. Este porcentaje fue seleccionado teniendo en cuenta los trabajos previos de Ledesma y col. (2015) y Fernández-Ledesma y col. (2016), ambos trabajos concluyendo que un reemplazo máximo de hasta el 50% de arena natural por arena reciclada de RCD puede ser admitido sin que las propiedades del mortero endurecido que se vean afectadas. Se ensayaron tres tasas de sustitución de Si-F por Nc-FA: 0% (mortero de referencia), 50% y 100%. En esta etapa, también se puede analizar el efecto del FRMA sobre las propiedades del mortero.
- Familia-3: dedicada a evaluar el efecto de la sustitución de Si-F por partículas ultrafinas de residuos de mampostería (filler reciclado de mampostería: R-MF) en morteros hechos con 100% NA y morteros hechos con un 50% de NA y 50% de FRMA. Se probó una relación de sustitución del 100% de Si-F por R-MR.

En todas las familias, la sustitución de Si-F por Nc-FA y R-MF se hizo en masa. Tabla muestra la nomenclatura de las mezclas, la proporción relativa de NA / FRMA y el porcentaje de utilización de Si-F, Nc-FA y R-MF para cada mortero.

Tabla 2.1: Diseño experimental – nomenclatura.

Familia	Tipo de mortero	NA/FRMA (% en volumen)	Filler (% en peso)		
			Si-F	Nc-FA	R-MF
Familia-1	M1	100/0	100	0	0
	M2	100/0	50	50	0
	M3	100/0	0	100	0
Familia-2	M4	50/50	100	0	0
	M5	50/50	50	50	0
	M6	50/50	0	100	0
Familia-3	M7	100/0	0	0	100
	M8	50/50	0	0	100

2.2.2. Caracterización de materiales

Se seleccionaron cinco tipologías de áridos naturales y reciclados:

- Arena natural silíceo extraída de cantera del río Guadalquivir (Posadas, Córdoba) (NA);
- Arena reciclada mixta-cerámica obtenida de trituración y cribado de residuos de mampostería (FRMA). Los componentes de acuerdo con la norma UNE-EN 933-11: 2009 fueron los siguientes: cerámica 53,9%; mortero 39,8%; árido natural 5,7%; hormigón 0,4%; yesos 0,2%. Esta arena reciclada se utiliza en trabajos anteriores (Jiménez y col., 2013; Ledesma y col., 2015);
- Filler silíceo (Si-F) obtenido triturando roca silíceo, comercializada por Roig y Lorda SA; y utilizado también en otros trabajos de investigación (Esquinas y col., 2017; Esquinas y col., 2018).
- Partículas ultrafinas de los residuos de mampostería finamente triturados (R-MF). Este material fue producido en el laboratorio mediante la introducción de 5,0 kg de FRMA en la "máquina de Los Ángeles" utilizando la Norma UNE 1097-2: 2010. El material se sometió a 3000 revoluciones con 23 bolas de 0,445 g según lo descrito en Ledesma y col. (2016).

- Cenizas volantes no conformes (Nc-FA) obtenido a partir de la combustión de la hulla y antracita almacenada en la central termoeléctrica de Puente Nuevo, situado en el norte de Córdoba (España).

La Tabla 2.2 muestra la distribución de tamaño de partícula UNE-EN 933-1: 2012 de los áridos utilizados en nuestro estudio. Las arenas NA y FRMA tienen una distribución de tamaño de partícula continua (0/4 mm) y cumplen con las especificaciones de la norma UNE-EN-13139: 2003. La arena reciclada FRMA mostró un coeficiente de uniformidad superior, que da una mayor compacidad (Jiménez y col., 2012-a; Jiménez y col., 2012-b).

Tabla 2.2: Distribución del tamaño de partícula.

Tamaño del tamiz (mm)	Material pasante (%)				
	NA	FRMA	Si-F	Nc-FA	R-MF
4	100,00	100,00	--	--	--
2	87,00	85,00	--	--	--
1	73,00	59,00	--	--	100,00
0,5	53,00	39,00	--	100,00	98,65
0,25	23,00	21,00	--	96,63	77,50
0,125	8,00	12,00	100,00	90,36	76,76
0,063	3,20	9,00	87,33	82,01	75,22
Cu	4	10	--	--	--

La Tabla 2.3 muestra las propiedades fisicoquímicas y mecánicas de las arenas NA y FRMA. Ambos tipos de arenas tenían un porcentaje similar de equivalente de arena. La arena reciclada FRMA mostró un mayor contenido de finos, mayor absorción de agua, baja densidad y una menor resistencia a la fragmentación. Estos valores son típicos de los áridos reciclados finos de RCD (Rodríguez y col., 2013). En cuanto a las propiedades químicas, la arena FRMA mostró valores ligeramente más altos que los exigidos por la norma UNE-EN 13139: 2003 para las siguientes propiedades: sulfatos solubles en ácido, compuestos totales de azufre y sales solubles. Sin embargo, este árido ha sido utilizado en estudios previos por otros autores con resultados satisfactorios (Jiménez

y col., 2013; Ledesma y col., 2015). De acuerdo con la Norma UNE-EN 1744-1: 2010, no se detectaron compuestos orgánicos que pudieran alterar el fraguado del cemento. No se detectó reactividad de álcali-sílice ni de silicato alcalino de acuerdo con la norma UNE 146507-1: 1999 EX.

Los patrones de difracción de rayos-X (PDRX) del cemento y los áridos se muestran en la Fig. 2.2. La fase cristalina principal fue cuarzo (33-1161) (JCPDS, 1995) para ambos áridos (NA y FRMA), y el grado de presencia de calcita (05-0586) (JCPDS, 1995) fue bajo. La muestra NA presentó una pequeña cantidad de dolomita (36-0426) (JCPDS, 1995) y el FRMA mostró una pequeña cantidad de yeso (42 a 0551) (JCPDS, 1995). Las otras fases fueron illita (02-0056) (JCPDS, 1995), albita (10-0393) (JCPDS, 1995) y sanidina (10-0357) (JCPDS, 1995). La fase dominante en la muestra de cemento fue C_3S (Ca_3SiO_5), y había pequeñas cantidades de otras fases, como el yeso (33-0311) (JCPDS, 1995) y $Ca_3Al_2O_6$ (32-0150) (JCPDS, 1995).

Tabla 2.3: Caracterización de NA y FRMA.

Características	Norma	NA	FRMA	Límite establecido por UNE-EN 13139:2003
Contenido de finos (%) (a)	UNE-EN 933-1:2012	3,2	9,0	≤8
Equivalente de arena (%)	UNE-EN 933-8:2012	83	86	Sin límite
Densidad de la muestra seca ^(b) ρ_{rd} (g/cm ³)	UNE-EN 1097-6:2014	2,63	2,14	Sin límite
Absorción de agua ^(b) (%)	UNE-EN 1097-6:2014	0,79	9,00	Sin límite
Coficiente de friabilidad (%)	UNE 83115:1989	15	32	Sin límite
Sulfatos solubles en ácido (% SO ₃)	UNE-EN 1744-1:2010	< 0,01	1,04	≤0,8
Sulfuros totales (% SO ₃)	UNE-EN 1744-1:2010	< 0,01	1,04	≤1
Cloruros solubles en agua (%CL ⁻)	UNE-EN 1744-1:2010	< 0,01	< 0,01	≤0,15
Salas solubles 1:2 (%)	Gravimétrico	0,128	1,159	≤1

(a) Más fino que 0,063 mm

(b) Fracción 0,063/4 mm

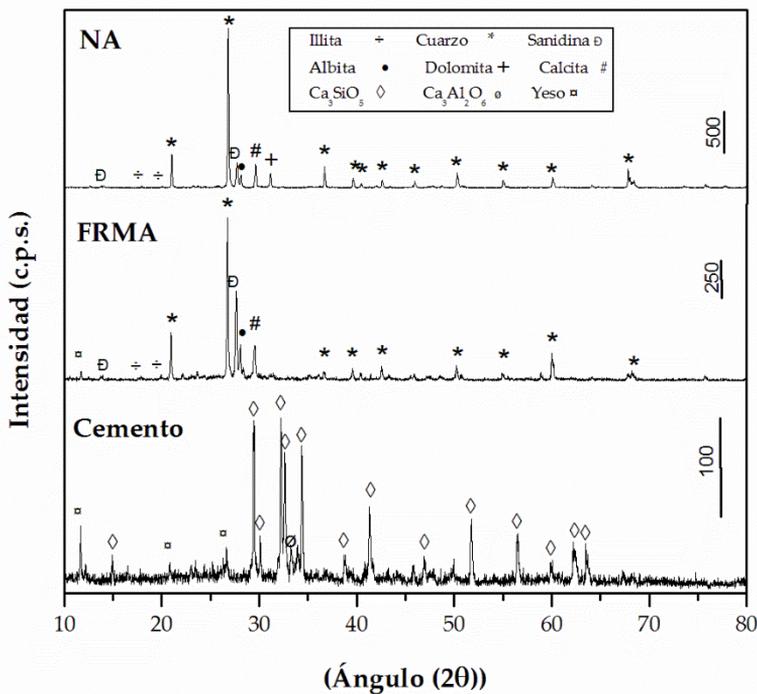


Figura 2.2: Patrón de DRX de los áridos NA y FRMA y del cemento.

Para que los materiales se utilicen como filler, deben cumplir la siguiente condición: más del 85% en peso debe pasar a través del tamiz 0,125 mm y más del 70% a través del tamiz 0,063 mm según la UNE-EN-13139: 2003. El Si-F y Nc-FA cumplieron ambos criterios, pero el R-MF mostró un mayor tamaño de partícula (Tabla 2.2). Para un análisis más detallado de la distribución de tamaño de partícula en estos materiales, se utilizó un analizador de tamaño de partículas de difracción láser Mastersizer-S equipado con una unidad de dispersión de pequeño volumen (Malvern Instruments). Antes de la medición, las muestras se dispersaron en etanol durante 10 min. En la Fig. 2.3 se muestran las curvas de distribución de tamaño de partícula de los filler empleados. En general, se observaron amplias distribuciones de tamaño de partícula en todas las muestras, aunque el Si-F presentó una distribución de tamaño más estrecha que R-MF y Nc-FA. El Si-F tenía un tamaño de

partícula más pequeño con una distribución máxima alrededor de 30 micras y un tamaño de partícula muy uniforme. El Nc-FA tenía un tamaño de partícula más grande, con una distribución máxima alrededor de 70 micras. La elevada cantidad de partículas cuyo tamaño es superior a 45 micras impide su uso como adición mineral para la fabricación de hormigón según la norma UNE-EN 450-1: 2013 y justifica su no conformidad. El R-MF tiene el tamaño más grande, con un máximo alrededor de 90 micras. Estos resultados son consistentes con los mostrados en la Tabla 2.2.

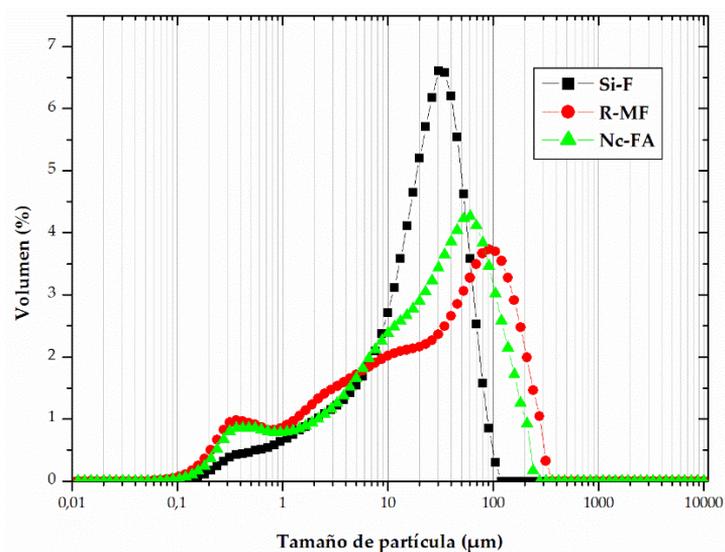


Figura 2.3: Distribución del tamaño de partícula de Si-F, R-MF y Nc-FA.

La Tabla 2.4 muestra la densidad seca de partículas y la densidad aparente de todos los filler (materiales de relleno). El Si-F tenía una mayor densidad de partículas, seguido por el R-MF y Nc-FA. Sin embargo, el NC-FA presentó la mayor densidad aparente; esto puede explicarse porque su distribución de tamaño de partícula es más continua que la del Si-F (Fig. 2.3), y por lo tanto, rellenan mejor los huecos entre las partículas.

Tabla 2.4: Caracterización de Si-F, Nc-FA, R-MF.

Características	Norma	Si-F	Nc-FA	R-MF	Límite establecido por UNE-EN 13139-2993
% SO ³	UNE-EN 196-2	0,2001	0,1220	1,3797	≤ 0,8
%CL	UNE-EN 196-2	0,0144	0,0462	0,0319	≤ 0,15
Densidad aparente (g/cm ³)	NLT 176:1992	0,6890	0,9100	0,8340	---
Densidad de partículas (g/cm ³)	UNE 80103:1986	2,4190	1,9400	2,3430	---

Las principales fases minerales en Si-F, Nc-FA y R-MF se identificaron utilizando un instrumento Siemens D-5000 con radiación Cu Ka. La Fig. 2.4 muestra los resultados de los patrones de difracción

de rayos X (PDRX) del Si-F, Nc-FA y R-MF. El principal compuesto del Si-F fue cuarzo (33 a 1161) (JCPDS, 1995), mientras que el R-MF mostró cuarzo (33-1161) (JCPDS, 1995), calcita (05-0586) (JCPDS, 1995) y una pequeña cantidad de albita (10-0393) (JCPDS, 1995) y sanidina (10-0337) (JCPDS, 1995). El Nc-FA presentó cuarzo (33-1161) (JCPDS, 1995), mullita (15-0776) (JCPDS, 1995) y una pequeña cantidad de calcita (05 a 0586) (JCPDS, 1995) y hematita (33-0664) (JCPDS, 1995). El Cuarzo (33-1161) (JCPDS, 1995) y mullita (15-0776) (JCPDS, 1995) son los principales constituyentes cristalinos de las cenizas de bajo contenido de calcio (Ahmaruzzaman, 2010). Las cenizas volantes con bajo contenido de calcio reaccionan químicamente con la piedra caliza, que es una reacción puzolánica lenta que lleva tiempo (Ahmaruzzaman, 2010). La forma de las partículas se analizó usando un microscopio electrónico de barrido. La Fig. 3.5 muestra la gran cantidad de partículas esféricas contenidas en Nc-FA. Por el contrario, el Si-F y R-MF se componen de partículas angulares.

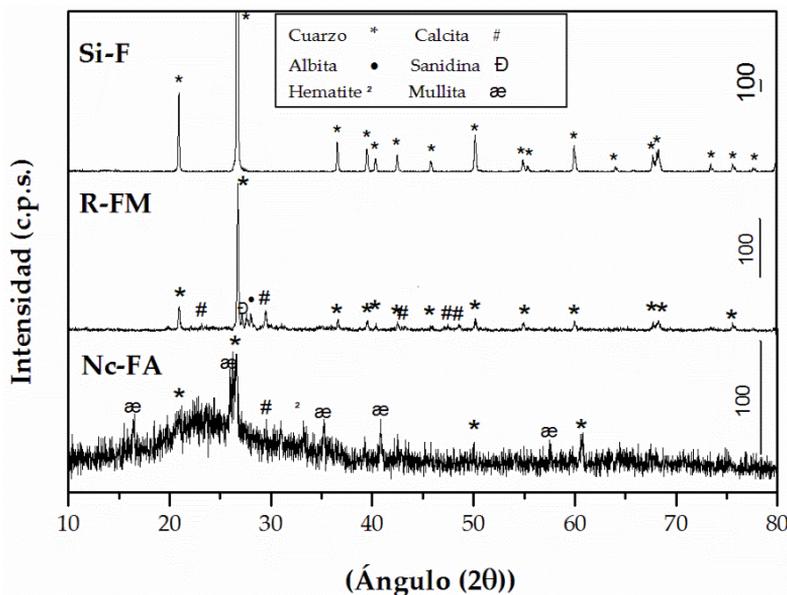


Figura 2.4: Patrón de DRX de Si-F, Nc-FA y R-MF.

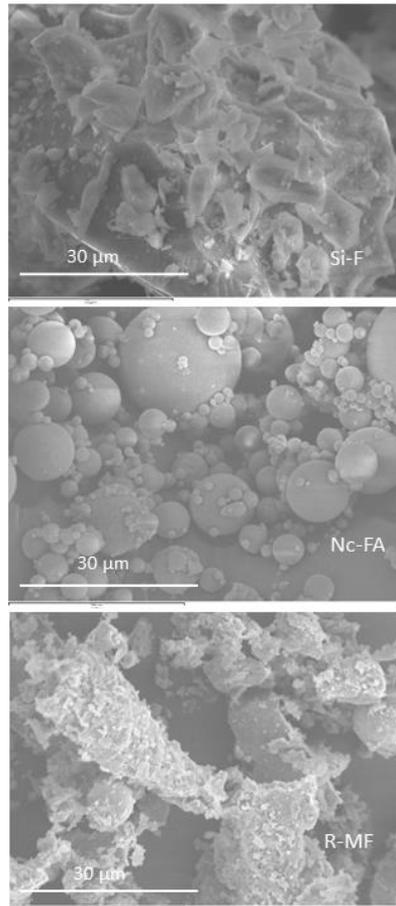


Figura 2.5: Imágenes SEM de Si-F, Nc-FA y R-MF.

La Tabla 2.5 muestra la composición del cemento tipo CEM I / 52,5R utilizado para fabricar los morteros. Un plastificante comercial (NEOPLAST) se mezcló directamente en el agua con un contenido de 0,1 ml. Esta mezcla es un plastificante convencional para morteros, y se utiliza para mejorar su capacidad de trabajo y reducir la cantidad de agua de amasado. El fabricante recomienda la adición de 10 ml de mezcla por cada 50 kg de cemento, que se diluyen previamente en el agua de mezcla.

Tabla 2.5: Características del CEM I/52,5R.

Componentes del cemento	
Clinker (%)	97
Minoritarios (%)	3
Características químicas	
SiO ₂ (%)	20,16
CaO (%)	61,58
Al ₂ O ₃ (%)	4,52
Fe ₂ O ₃ (%)	2,59
MgO (%)	0,98
SO ₃ (%)	3,46
K ₂ O (%)	1,00
LOI (%)	2,83
Características físicas	
Densidad (g/cm ³)	3,11
Superficie Blaine (cm ² /g)	4619
Expansión (Le Châtelier) (mm)	≤10
Fase inicial (min)	≥45
Fase final (min)	≤720
Características mecánicas	
Resistencia a compresión a 7 días (MPa)	≥30
Resistencia a compresión a 28 días (MPa)	≥52,5

2.2.3. Procedimientos de preparación y ensayo de muestras

Se ensayaron dos propiedades para evaluar el mortero fresco: el índice de consistencia y la trabajabilidad. El mortero endurecido se caracterizó mediante el estudio de las siguientes propiedades a corto y largo plazo: densidad aparente en seco, resistencia a la compresión, adherencia, absorción de agua por inmersión, absorción de agua por capilaridad, permeabilidad al vapor de agua y retracción. Se hicieron cuatro mezclas por tipo de mortero. La Tabla 2.6 muestra las normas de los ensayos y las condiciones climáticas de las tres cámaras climáticas utilizadas en este trabajo. Los métodos de ensayo se describen en las normas correspondientes.

Tabla 2.6: Ensayos de caracterización de los morteros.

Propiedades del mortero fresco	Norma	Muestra y dimensiones	Cámara climáticas	Tiempo de curado
Consistencia	UNE-EN 1015-3:2000	--	--	--
Trabajabilidad	UNE-EN 1015-9:2000	4	--	--
Propiedades del mortero endurecido	Norma	Muestra y dimensiones	Cámara climática	Tiempo de curado
Densidad seca aparente	UNE-EN 1015-10:2000	4 Prismática 40 x 40 x 160 mm	Cámara-1 (7 días) Cámara-2 (resto del tiempo de curado)	28 días
Resistencia a compresión	UNE-EN 1015-11:2000	8 Prismática 40 x 40 x 80 mm	Cámara-1 (7 días) Cámara-2 (resto del tiempo de curado)	7, 28, 90, 180 días
Adherencia	UNE-EN 1015-12:2000	4 Circular de 50 mm de diámetro, 10 mm de espesor	Cámara-1 (7 días) Cámara-2 (resto del tiempo de curado)	28 días
Absorción de agua por inmersión	UNE-EN 83980-2014	12 Prismática 40 x 40 x 80 mm	Cámara-1 (7 días) Cámara-2 (resto del tiempo de curado)	28 días
Absorción de agua por capilaridad	UNE-EN 1015-18:2003	12 Prismática 40 x 40 x 80 mm	Cámara-1 (7 días) Cámara-2 (resto del tiempo de curado)	28 días
Permeabilidad al vapor de agua	UNE-EN 1015-19:1999	4 Circular - 160 mm (0,02 m ² superficie) diámetro, 15 mm de espesor	Cámara-1 (2 días) Cámara-3 (resto del tiempo de curado)	28 días
Retracción	UNE 83831:2010 EX	6 Prismática 40 x 40 x 160 mm	Cámara-1 (7 días) Cámara-2 (resto del tiempo de curado)	Hasta 154 días

(1) Condiciones climáticas: Cámara-1: T₃ = 20 ± 2 °C HR= 95 ± 5 %; Cámara-2: T₃ = 20 ± 2 °C HR= 65 ± 5 %; Cámara-3: T₃ = 20 ± 2 °C HR= 50 ± 5 %.

2.2.4. Composición morteros

El procedimiento de mezclado fue similar al descrito por Jiménez y col. (2013). Los áridos se utilizaron con su humedad natural, que fue de 0,41% en NA y 0,98% para FRMA. Los áridos reciclados no fueron pre-saturados. La masa seca de cada componente se calculó como se muestra en la Tabla 2.7.

- El mortero de referencia (M-1) se realizó utilizando una proporción de masa seca constante cemento:árido:filler de 1:7:0,6 (CEM-I:NA:Si-F). Dado que la sustitución de Si-F por Nc-FA se hizo en peso (Tabla 1), el resto de los morteros de la Familia-1 (M-2 y M-3) también satisfacen la proporción de masa seca 1:7:0,6.

- En la Familia-2 y Familia-3, el NA fue sustituido por FRMA en volumen siguiendo la metodología de los trabajos previos de Ledesma y col. (2015) y Fernández-Ledesma y col. (2016). La masa seca de FRMA en (M-4, M-5, M-6 y M-8) fue calculada teniendo en cuenta la densidad de partículas secas de NA y FRMA utilizando la siguiente expresión (Ec.1):

$$Masa\ seca\ de\ FRMA(g) = Masa\ seca\ de\ NA\ (g) \frac{Densidad\ de\ partículas\ seca\ de\ FRMA\ \left(\frac{g}{cm^3}\right)}{Densidad\ de\ partículas\ seca\ de\ NA\ \left(\frac{g}{cm^3}\right)}$$

Tabla 2.7: Composición de los morteros.

Familia	Tipo de mortero	Proporciones de la mezcla - masa seca									
		NA (g)	FRMA (g)	Si-F (g)	Nc-FA (g)	R-MF (g)	CEM-I (g)	Agua(g)	Aditivo (cm³)	Consistencia (mm)	(a/c)total
Familia-1	M1	3500	0	300	0	0	500	605	0.1	176	1,21
	M2	3500	0	150	150	0	500	587	0.1	177	1,17
	M3	3500	0	0	300	0	500	579	0.1	172	1,16
Familia-2	M4	1754	1427	300	0	0	500	709	0.1	176	1,42
	M5	1754	1427	150	150	0	500	683	0.1	174	1,37
	M6	1754	1427	0	300	0	500	681	0.1	173	1,36
Familia-3	M7	3500	0	0	0	300	500	648	0.1	179	1,30
	M8	1754	1427	0	0	300	500	754	0.1	181	1,51

2.3. Resultados y discusión

2.3.1. La consistencia del mortero fresco

La cantidad de agua se ajustó de forma experimental para lograr una consistencia de 175 ± 10 mm según la Norma UNE-EN 1015-3: 2000. La cantidad de agua para mantener la consistencia se redujo aproximadamente en un 4% con la incorporación de Nc-FA en la Familia-1 y Familia-2 (Tabla 2.7). Esto se justifica por dos razones: (i) la forma esférica de las partículas de Nc-FA que actúan como lubricantes, en oposición a las partículas de Si-F, que tienen más caras de fractura que impiden el flujo del mortero (Fig. 2.5); y (ii) el mayor efecto de relleno de la ceniza Nc-FA como resultado de una distribución más continua del tamaño de partícula (Fig. 2.3) que rellena mejor los huecos vacíos entre las partículas de arena, generando así menos poros libres que están disponibles en el agua. Khatib (2008) mostró que la viscosidad mejora gracias a la incorporación de FA, mientras que la cantidad de superplastificante necesaria disminuye. Bilir y col. (2015) concluyen que la sustitución total de la arena por Nc-FA disminuyó la consistencia de la mezcla en un 13,4%, pero en todos los casos, la trabajabilidad se mantuvo entre 198 mm (0% de sustitución) y 168 mm (100% de sustitución).

El uso de FRMA aumentó la relación agua/cemento (a/c) en un 13,2% (M-1 en comparación a M-4), 16,2% (M-2 en comparación a M-5) y 17,2% (M-3 en comparación M-6). Estos resultados concuerdan con los presentados por Ledesma y col. (2015), quienes encontraron aumentos del 17,6% en un mortero M-10 hecho con 50% de arena natural y 50% de áridos reciclados a partir de residuos de mampostería.

El uso de R-MF (Familia-3) incrementó la relación a/c en un 7,4% (M-1 en comparación a M-7) y 6,3% (M-4 en comparación a M-8). Esto es debido a la mayor absorción de agua de los áridos reciclados en polvo y

al hecho de haber utilizado los áridos reciclados (Silva y col., 2009, Braga y col., 2012) sin saturarse previamente.

2.3.2. Trabajabilidad del mortero fresco

La Tabla 2.8 muestra el valor medio del tiempo de trabajabilidad del mortero fresco y el efecto de la incorporación de Nc-FA, FRMA y R-MF expresado en porcentaje de variación.

Tabla 2.8: Trabajabilidad del mortero fresco.

Familia	Mortero	Media(min)	SD	$\Delta(\%)$ Nc-FA	$\Delta(\%)$ FRMA	$\Delta(\%)$ R-MF
Familia-1	M1	163	11	0,00	0,00	0,00
	M2	179	15	9,82	0,00	--
	M3	181	7	11,04	0,00	--
Familia-2	M4	78	4	0,00	-52,15	0,00
	M5	84	5	7,69	-53,07	--
	M6	92	5	17,95	-49,17	--
Familia-3	M7	155	4	--	0,00	-4,91
	M8	76	5	--	-50,97	-2,56

La sustitución de Si-F por Nc-FA mejora la trabajabilidad del mortero en un 11,04% en la Familia-1 y un 17,95% en la Familia-2. Al igual que ocurría en la consistencia, esto puede ser atribuible a la forma esférica de las partículas del Nc-FA (Fig. 2.5). Los morteros hechos con FRMA disminuyen significativamente el tiempo de trabajabilidad, así el porcentaje de variación en el M4 es del -52,15% con respecto al M-1, en el M-5 es de -53,07% con respecto al M-2, y en el M-6 es de -49,17% con respecto al M3. En el M8 es -50,97% con respecto al M-7. Ledesma y col. (2015) mostraron una pérdida de trabajabilidad del 25% con porcentajes de sustitución de arena natural por arena reciclada del 50%; mientras que Jiménez y col. (2013) mostraron una pérdida del 55% con un porcentaje de sustitución del 40%, por lo tanto estos últimos valores son más similares a los encontrados en los morteros de este trabajo.

Cuando sustituimos Si-F por R-MF se observa que la trabajabilidad disminuye. Si comparamos el M-7 con el M-1, se observa una

disminución del 4,91%, y si comparamos el M-8 con el M-4 la disminución es del 2,56%. Los resultados anteriores están justificados por la mayor absorción de agua de los materiales reciclados y a su uso en estado seco sin saturación previa (Jiménez y col., 2013; Ledesma y col., 2014; Ledesma y col., 2015; Fernández-Ledesma y col., 2016).

2.3.3. Densidad aparente del mortero endurecido

La Tabla 2.9 muestra la densidad aparente del mortero endurecido a 28 días. En la Familia-1 y la Familia-2 se observa que la sustitución de Si-F por Nc-FA aumenta la densidad de los morteros, lo cual está justificado por la mayor densidad aparente del Nc-FA (Tabla 2.4) y a su capacidad para rellenar los huecos de los morteros.

Tabla 2.9: Densidad aparente del mortero endurecido a 28 días.

Familia	Mortero	Media (kg/m ³)	SD	Δ (%)Nc-FA	Δ (%)FRMA	Δ (%)R-MF
Familia-1	M1	1910	8	0,00	0,00	0,00
	M2	1920	15	0,52	0,00	--
	M3	1930	13	1,05	0,00	--
Familia-2	M4	1800	11	0,00	-5,76	0,00
	M5	1810	10	0,56	-5,73	--
	M6	1815	7	0,83	-5,96	--
Familia-3	M7	1850	12	--	0,00	-3,14
	M8	1750	11	--	-5,41	-2,78

La sustitución de NA por FRMA disminuye la densidad aparente un 6% aproximadamente (M-4 frente a M-1; M-5 frente a M-2; M-6 frente a M-3 y M-8 frente a M-7), lo cual está justificado por la menor densidad de las partículas de FRMA con respecto a las partículas de NA.

Cuando el Si-F se sustituye por R-MF (M-7 frente a M-1 y M-8 frente a M-4), la densidad aparente disminuye aproximadamente en un 3%.

2.3.4. Resistencia a compresión del mortero endurecido

La Tabla 2.10 muestra la resistencia a compresión a cuatro edades: 7, 28, 90 y 180 días. Analizando los datos a 28 días, la sustitución de Si-F por Nc-FA aumenta la resistencia a compresión más de un 12% en la Familia-1 (M-3 en comparación con M-1) y más del 10% en la Familia-2 (M-6 en comparación con M-4). Este aumento de resistencia a 28 días de edad está justificada, en primer lugar, por la mayor densidad de los morteros que incorporan Nc-FA y la menor relación a/c necesaria para conseguir la consistencia de referencia, y en segundo lugar, por la reacción puzolánica del FA con el Ca(OH)_2 producido por la hidratación del cemento.

La Fig. 2.6 y la Fig. 2.7 muestran que después de 90 días, la fase principal es de cuarzo (33 a 1161) (JCPDS, 1995), seguido de la calcita (05-0586) (JCPDS, 1995). La cantidad de calcita crece en comparación con otras fases menores al aumentar la cantidad de Nc-FA utilizado como relleno. Al aumentar el porcentaje de Nc-FA, también se observa un aumento de portlandita (04-0.733) (JCPDS, 1995). También se observan las fases correspondientes de los áridos. En la Familia-1, la presencia de dolomita (36-0426) (JCPDS, 1995) se debe a la presencia de NA (Fig. 2.2) y, en la Familia-2, la presencia de yeso (42 a 0551) (JCPDS, 1995) se debe a FRMA (Fig. 2.2). En la Familia-2, se detectó una pequeña cantidad de etringita. Las fases restantes de menor importancia son idénticas en ambas familias: Ca_3SiO_5 (42 a 0551) (JCPDS, 1995), albita (10 a 0393) (JCPDS, 1995), illita (02-0056) (JCPDS, 1995) y sanidina (10-0357) (JCPDS, 1995). El efecto positivo de la incorporación de FA es mayor con el paso del tiempo.

Tabla 2.10: Resistencia a compresión del mortero endurecido.

Familia	Mortero	7 días		28 días				90 días		180 días					
		Media (MPa)	SD	Media (MPa)	SD	Δ (%)	Nc-FA	Δ (%)	FRMA	Δ (%)	R-MF	Media (MPa)	SD	Media (MPa)	SD
Familia-1	M1	14,28	0,23	15,76	0,96	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	16,34	0,71	16,48	0,75
	M2	14,84	0,35	16,37	0,56	3,87	0,00	0,00	0,00	--	--	17,88	0,83	17,97	1,01
	M3	15,57	0,53	17,74	0,5	12,56	0,00	0,00	0,00	0,00	--	18,91	0,84	19,38	1,02
Familia-2	M4	12,85	0,88	13,68	0,72	0,00	0,00	-13,20	0,00	0,00	0,00	14,53	0,65	14,76	0,63
	M5	13,20	1,14	14,2	1,59	3,80	0,00	-13,26	--	--	15,05	1,06	15,32	1,80	
	M6	14,10	0,63	15,11	0,81	10,45	0,00	-14,83	--	--	15,52	0,49	15,96	0,89	
Familia-3	M7	11,32	0,51	11,98	0,58	--	--	0,00	0,00	-23,98	13,2	0,48	12,94	0,43	
	M8	9,88	0,37	10,68	0,38	--	--	-10,85	-21,93	11,23	1,1	10,82	0,87		

En la Familia-1, el uso de Nc-FA aumenta la resistencia a compresión un 15,7% (M-3 frente a M-1) y un 17,6% (M-3 frente a M-1) a los 90 y 180 días de curación respectivamente. Esta tendencia se confirma en la Familia-2, aunque los incrementos de resistencia son menores, un 6.8% (M6 frente a M4) y 8,1% (M6 frente a M4) a los 90 y 180 días de curación respectivamente. Por lo tanto, el uso de Nc-FA puede ser beneficioso en la medida en que permite el ahorro de cemento y la producción de un mortero más amigable con el medio ambiente.

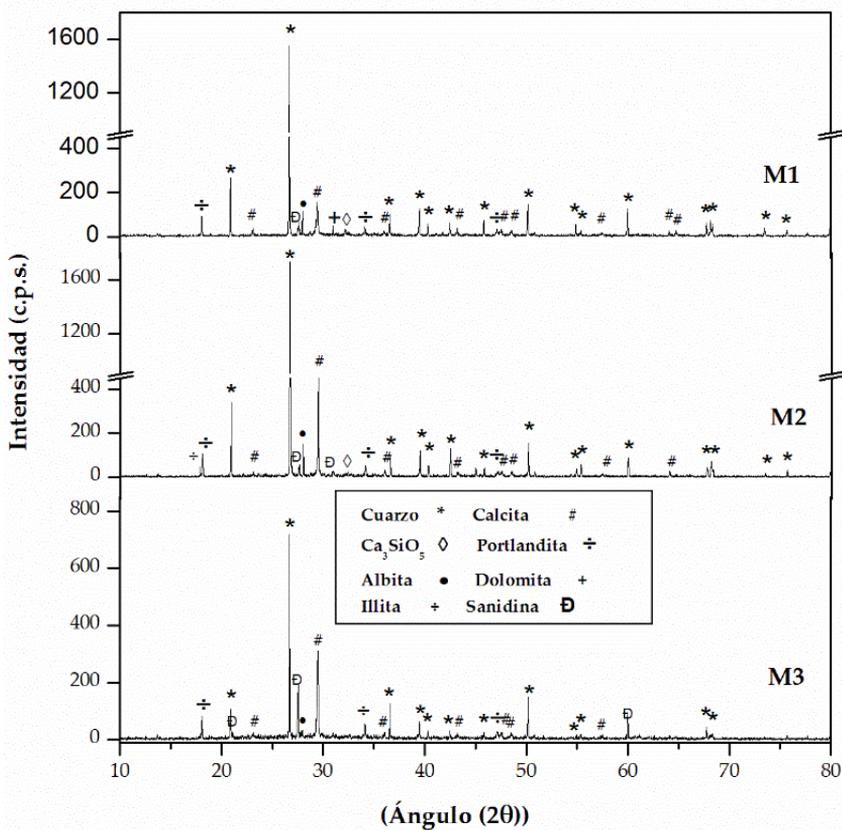


Figura 2.6: Patrón de DRX de los morteros de la Familia-1.

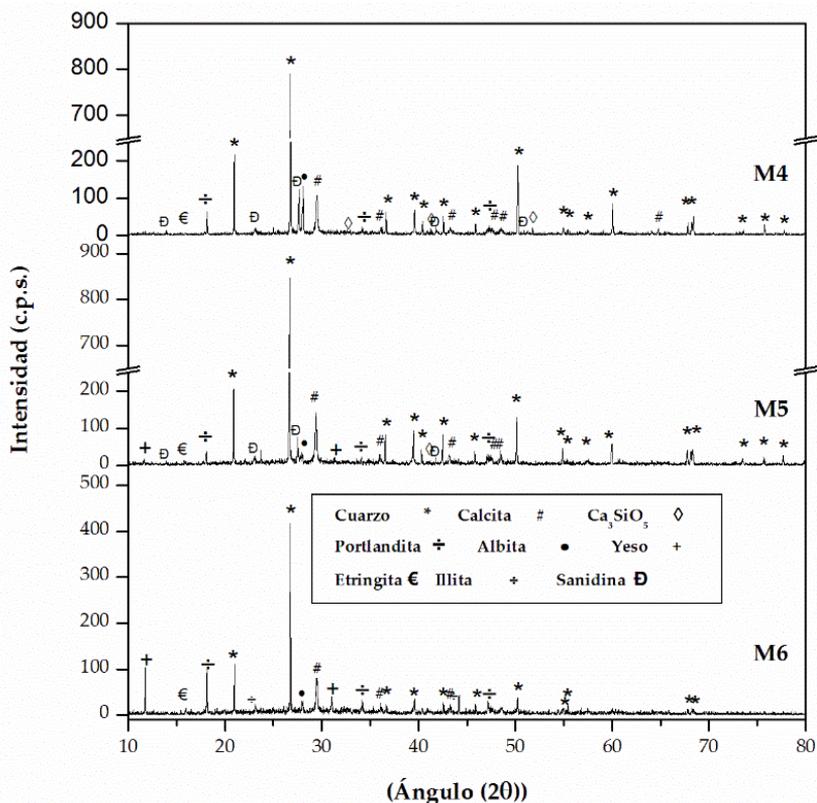


Figura 2-7: Patrón de DRX de los morteros de la Familia-2.

Bilir y col. (2015) estudiaron el efecto del FA como filler en morteros. Estos autores demostraron que una relación de sustitución del 30% de FA con arena natural implicaba un aumento de resistencia a la compresión. Cuando el FA fue reemplazado por arena en una proporción de 100%, la resistencia a la compresión se redujo un 73,1% a los 28 días. Fanghui y col. (2015) fabricaron morteros mediante la sustitución de cemento por FA a niveles de 20% y 40% en masa. Un aumento del contenido de cenizas volantes disminuyó la resistencia a la compresión de morteros a edades tempranas. Sin embargo, a edades posteriores, la resistencia a la compresión fue mayor que la del mortero hecho solamente con cemento.

La sustitución de NA por FRMA disminuye la resistencia a la compresión de entre un 10,8% y un 14,8% a los 28 días de edad (M-4 frente a M-1; M-5 frente a M-2; M-6 frente a M-3; M-8 frente a M-7), lo cual es atribuible a la menor resistencia mecánica de los áridos reciclados y la mayor relación a/c. Ledesma y col. (2015) observaron una disminución de la resistencia mecánica del 11,3% con porcentajes de sustitución de arena natural por arena reciclada del 50%. No obstante, el uso de FRMA y Nc-FA sólo disminuye la resistencia mecánica del mortero de referencia (M-1) un 3% a los 180 días de edad, por lo que esta alternativa también puede considerarse viable para la producción de un mortero amigable con el medio ambiente.

Los peores resultados en términos de resistencia mecánica se obtuvieron en los morteros hechos con FRMA y R-MF. La sustitución de Si-F por R-MF no es una buena alternativa ya que la resistencia mecánica disminuye más de un 20% a 28 días de edad, lo que supondría aumentar la cantidad de cemento en la fabricación del mortero para garantizar las resistencias mecánicas. Además, la pulverización del residuo aumentaría la energía embebida del material (R-MF) y, por consiguiente, la fabricación del mortero tendría un mayor impacto ambiental.

2.3.5. Absorción de agua por inmersión

La absorción de agua por inmersión está relacionada con la porosidad de los morteros. La Tabla 2.11 muestra que la sustitución de Si-F por Nc-FA disminuye la absorción de agua por inmersión hasta un 2,9 % en los morteros de la Familia-1 y un 6,5 % en los morteros de la Familia-2, lo cual está justificado por el mayor efecto de relleno del Nc-FA frente al Si-FA (Fig. 2.3). La Fig. 2.8 muestra que la absorción de agua por inmersión es inversamente proporcional a la densidad aparente del mortero endurecido.

Tabla 2.11: Absorción de agua por inmersión y capilaridad del mortero endurecido.

Familia	Mortero	Absorción de agua por inmersión				Absorción de agua por capilaridad 90 min					
		Media (%)	SD	Δ (%)Nc-FA	Δ (%)FRMA	Δ (%)R-MF	Media (Kg/(m ² -min-0,5))	SD	Δ (%)Nc-FA	Δ (%)FRMA	Δ (%)R-MF
Familia-1	M1	9,29	0,05	0,00	0,00	0,00	0,7	0,02	0,00	0,00	0,00
	M2	9,15	0,07	-1,51	0,00	--	0,72	0,06	2,86	0,00	--
	M3	9,02	0,13	-2,91	0,00	--	0,73	0,03	4,29	0,00	--
Familia-2	M4	13,66	0,23	0,00	47,04	0,00	0,91	0,03	0,00	30,00	0,00
	M5	13,06	0,07	-4,39	42,73	--	0,94	0,04	3,30	30,56	--
	M6	12,77	0,06	-6,52	41,57	--	0,97	0,08	6,59	32,88	--
Familia-3	M7	10,51	0,14	--	0,00	13,13	0,88	0,05	--	0,00	25,71
	M8	14,31	0,14	--	36,16	4,76	1,12	0,07	--	27,27	23,08

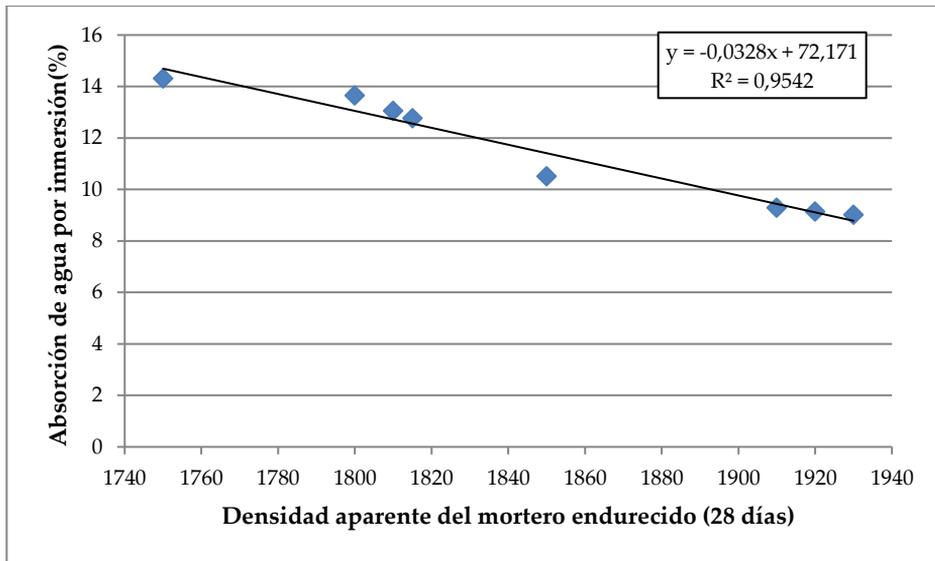


Figura 2.8: Absorción de agua por inmersión frente a densidad aparente del mortero endurecido.

El uso de FMRA aumenta hasta un 47 % la absorción de agua por inmersión en la Familia- 2 (M-4 frente a M-1) y un 36,1 % en la Familia-3 (M-8 frente a M-7), lo cual está justificado por la mayor porosidad de los áridos reciclados. El uso de Nc-FA mitiga en parte estos resultados.

La sustitución de Si-F por R-MF aumenta la absorción de agua por inmersión un 13,1 % (M-1 frente a M-7) en los morteros hechos con NA y un 4,8 % (M-8 frente a M-4) en los morteros hechos con FRMA. El mortero hecho con FRMA y R-MF es el que presenta mayor absorción de agua por inmersión, lo cual está justificado por la mayor porosidad de las partículas de árido reciclado.

2.3.6. Absorción de agua por capilaridad

A diferencia de la absorción de agua por inmersión, la Tabla 2.11 muestra que la sustitución de Si-F por Nc-FA aumenta ligeramente la absorción de agua por capilaridad, un 4,29% en los morteros de la

Familia-1 y un 6,59% en los morteros de la Familia-2. Estos resultados están relacionados con la microestructura porosa de los morteros. Corinaldesi (2012) observó una mayor absorción de agua por capilaridad en los morteros fabricados con áridos finos triturados de ladrillo (FCB) donde la cantidad de microporos ($< 0,1 \mu\text{m}$) y mesoporos ($0,1-1 \mu\text{m}$) fueron más elevados que el mortero fabricado con áridos gruesos de ladrillo triturado (CCB). Por contra, los morteros hechos con CCB mostraron una mayor proporción de macroporos ($>1 \mu\text{m}$) que los morteros hechos con FCB.

El uso de FMRA aumenta hasta un 32,88 % la absorción de agua por capilaridad en la Familia-2 (M-6 frente a M-3) y un 27,27 % en la Familia-3 (M-8 frente a M-7), lo cual está justificado por la mayor porosidad de los áridos reciclados. Los valores obtenidos son del mismo orden de magnitud que los obtenidos por Jiménez y col. (2013) y Ledesma y col. (2015). Los resultados son coherentes con los obtenidos por estos autores y por Silva y col. (2010) y Corinaldesi y col. (2012).

La sustitución de Si-F por R-MF aumenta la absorción de agua por capilaridad un 25,71 % (M-1 frente a M-7) en los morteros hechos con NA y un 23,08 % (M-8 frente a M-4) en los morteros hechos con FRMA. El mortero hecho con FRMA y R-MF es el que presenta mayor absorción de agua por capilaridad.

2.3.7. Permeabilidad al vapor de agua

La Tabla 2.12 muestra que la sustitución de Si-F por Nc-FA disminuye la permeabilidad al vapor de agua hasta un 31,48 % en los morteros de la Familia-1 y un 14,77 % en los morteros de la Familia-2, al igual que la absorción de agua por inmersión, estos resultados están justificados por el mayor efecto de relleno del Nc-FA frente al Si-FA. La Familia-2 muestra unos valores de permeabilidad más bajos que la Familia-1, lo cual está justificado por el mayor porcentaje de partículas inferiores a $0,063 \text{ mm}$ del FRMA con respecto al NA (Tabla 2.2), lo cual

puede justificar que el porcentaje de variación en la permeabilidad al vapor de agua cuando se utiliza Nc-FA sea menor en la Familia-2 que en la Familia-1.

Tabla 2.12: Permeabilidad al vapor de agua del mortero endurecido.

Familia	Mortero	Media	SD	$\Delta(\%)$ Nc-FA	$\Delta(\%)$ FRMA	$\Delta(\%)$ R-MF
Familia-1	M1	13,82	0,24	0,00	0,00	0,00
	M2	10,01	0,13	-27,57	0,00	--
	M3	9,47	0,28	-31,48	0,00	--
Familia-2	M4	7,72	0,32	0,00	-44,14	0,00
	M5	6,78	0,18	-12,18	-50,94	--
	M6	6,58	0,2	-14,77	-52,39	--
Familia-3	M7	8,62	0,21	--	0,00	-37,63
	M8	5,93	0,15	--	-31,21	-23,19

El uso de FMRA reduce hasta un 52,39 % la permeabilidad al vapor de agua en la Familia-2 (M-4 frente a M-1) y un 31,21 % en la familia 3 (M-8 frente a M-7), estos resultados también están justificados por el mayor porcentaje de partículas inferiores a 0,063 mm del FRMA con respecto al NA (Tabla 2.2).

La sustitución de Si-F por R-MF disminuye la permeabilidad al vapor de agua un 37,63 % (M-1 frente a M-7) en los morteros hechos con NA y un 23,19 % (M8 frente a M4) en los morteros hechos con FRMA. El mortero hecho con FRMA y R-MF es el que presenta menor valor de permeabilidad al vapor de agua, lo cual está justificado por el efecto filler del uso combinado de FRMA y R-MF.

2.3.8. Retracción.

La Tabla 2.13, la Fig. 2.9 y la Fig. 2.10 muestran que la sustitución de Si-F por Nc-FA disminuye la retracción hasta un 17,95% en los morteros de la Familia-1 y un 6,59 % en los morteros de la Familia-2. Estos resultados pueden estar justificados por la menor relación a/c y mayor resistencia mecánica de los morteros hechos con Nc-FA. La mayoría de las investigaciones llevadas a cabo demuestran que la

incorporación de cenizas de fondo de carbón o cenizas volantes en materiales base cemento permiten una mejor estabilidad dimensional (Rafieizonooz y col., 2016; Singh and Siddique, 2014). La estructura de partículas porosas del mortero con Nc-FA es beneficioso para disminuir la retracción del mortero.

Tabla 2.13: Retracción a 154 días.

Familia	Mortero	Media (mm/m)	SD (mm/m)	Δ (%) Nc-FA	Δ (%) FRMA	Δ (%) R-MF
Familia-1	M1	-0,78	0,14	0,00	0,00	--
	M2	-0,72	0,16	-7,69	0,00	--
	M3	-0,64	0,15	-17,95	0,00	--
Familia-2	M4	-0,91	0,17	0,00	16,67	--
	M5	-0,87	0,13	-4,40	20,83	--
	M6	-0,85	0,20	-6,59	32,81	--
Familia-3	M7	-0,84	0,16	--	0,00	7,69
	M8	-1,21	0,14	--	44,00	32,97

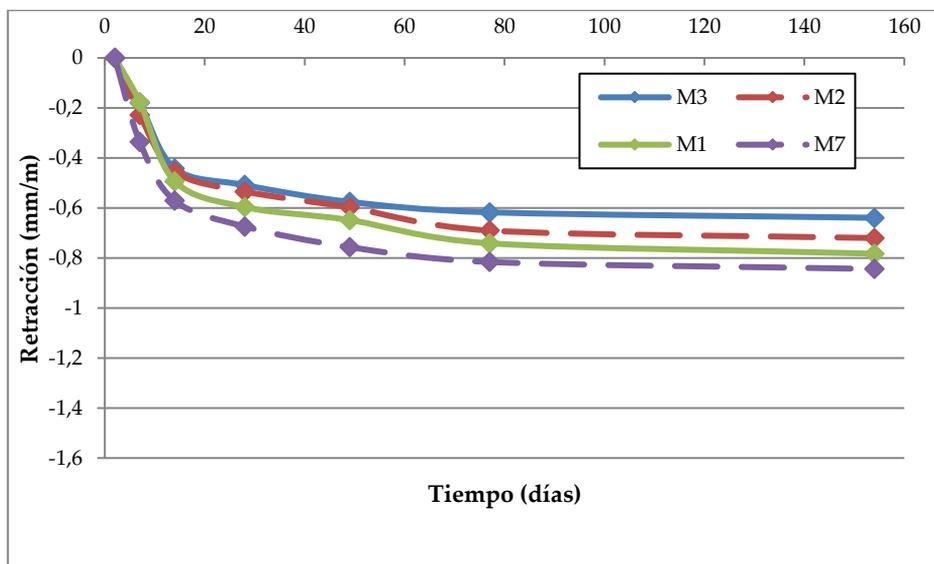


Figura 2.9: Retracción (Familia-1 y Familia-3).

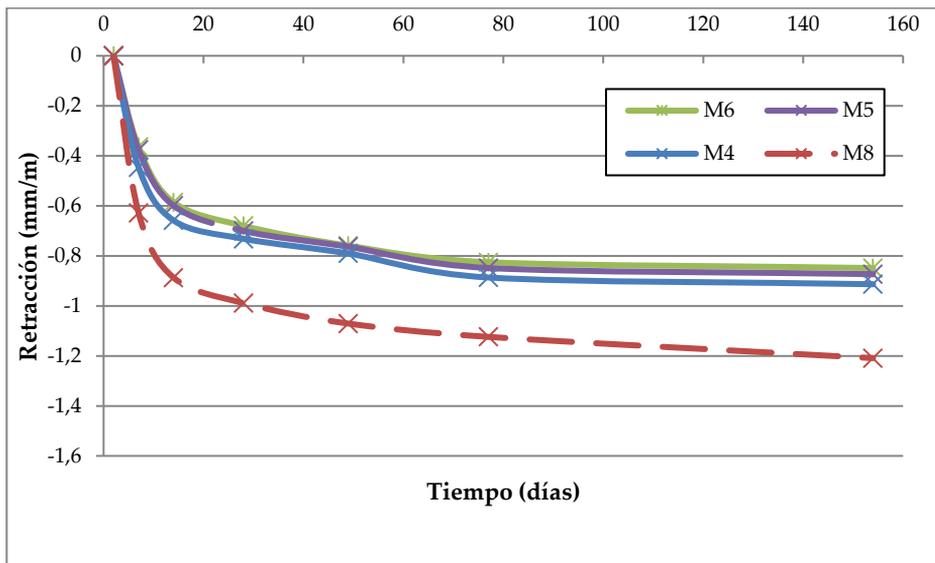


Figura 2.10: Retracción (Familia-2 y Familia-3).

El uso de FMRA aumenta hasta un 32,81 % la retracción en la Familia-2 (M-6 frente a M-3) y un 44 % en la Familia-3 (M-8 frente a M-7). Estos resultados están justificados por la mayor relación a/c y menor resistencia mecánica de los morteros hechos con FRMA. Estos resultados coinciden con los mostrados por Ledesma y col. (2015).

La sustitución de Si-F por R-MF aumenta la retracción un 7,69 % (M-1 frente a M-7) en los morteros hechos con NA y un 32,97 % (M8 frente a M4) en los morteros hechos con FRMA. El mortero hecho con FRMA y R-MF es el que presenta el valor más alto de retracción. También es el mortero con mayor relación a/c y menor resistencia mecánica, lo cual puede justificar los resultados. Silva y col. (2009) también pusieron de manifiesto el efecto negativo de la incorporación de material cerámico pulverizado en la retracción de los morteros.

2.4. Conclusiones

La forma esférica de las partículas de Nc-FA mejora la trabajabilidad de los morteros y permite utilizar menor cantidad de agua de amasado para una consistencia determinada. La mayor densidad aparente de Nc-FA mejora la densidad aparente del mortero fresco y endurecido, lo cual mejora las resistencias mecánicas a los 180 días de edad un 17,6% y un 8,1% en los morteros hechos con arena silícea y mezcla de arena natural silícea y arenas recicladas de RCD respectivamente. Esto supone que podría disminuirse la cantidad de cemento en la fabricación de morteros sin reducir sus prestaciones mecánicas. Tanto la absorción de agua por inmersión como la permeabilidad al vapor de agua disminuyen a medida que aumenta la relación de sustitución de Si-F por Nc-FA. Sin embargo, la absorción de agua por capilaridad aumenta ligeramente. La retracción también disminuye. Por tanto, la sustitución de Si-F por Nc-FA es una alternativa viable y que permite producir un mortero más amigable con el medio ambiente y el fomento de la economía circular en el sector de la construcción.

El efecto combinado de arena reciclada a partir de residuos de mampostería con alto porcentaje de partículas cerámicas y Nc-FA (M-6) sólo disminuye la resistencia mecánica del mortero de referencia hecho con arena natural silícea y filler silíceo (M-1) un 3% a los 180 días de curación, de ahí que también pueda considerarse una alternativa viable y amigable con el medio ambiente. Sin embargo, empeora considerablemente la trabajabilidad, por lo que deben llevarse a cabo estudios con nuevos aditivos para mejorar esta propiedad. La absorción de agua por inmersión y la permeabilidad al vapor de agua aumentan, sin embargo, la absorción de agua por capilaridad disminuye con respecto al mortero de referencia. La incorporación de arena reciclada de RCD aumenta la retracción, aunque los aumentos pueden ser asumibles si no empleamos más del 50% de arena reciclada. Esta

alternativa permite reducir el consumo de arena natural y reciclar los residuos mixtos de RCD y las cenizas volantes no conformes de centrales termoeléctricas que actualmente están generando un problema medioambiental a nivel global.

La sustitución de Si-F por R-MF no es una buena alternativa ya que empeora la trabajabilidad, disminuye la densidad, reduce las resistencias mecánicas más de un 20% a 28 días de edad y aumenta significativamente la retracción de los morteros. Esta alternativa supondría aumentar la cantidad de cemento para garantizar las prestaciones mecánicas de los morteros, lo cual tiene un aumento de emisiones de CO₂. Además la pulverización de los áridos reciclados de RCD aumentaría la energía embebida del material, lo que implicaría la fabricación de un mortero menos amigable con el medio ambiente.

2.5. Normas usadas en el trabajo experimental

UNE 146507-1. Ensayos de áridos. Determinación de la reactividad potencial de los áridos. Método químico. Parte 1: Determinación de la reactividad álcali-sílice y álcali-silicato. CEN; 1999 EX.

UNE 80103. Métodos de ensayos de cementos. Ensayos físicos. Determinación de la densidad real por la norma de Chatelier. CEN; 2013

UNE 83115. Áridos para hormigones. Medida del coeficiente de friabilidad de las arenas. CEN; 1989 EX

UNE 83831. Métodos de ensayo de los morteros para albañilería endurecidos- Determinación de la estabilidad dimensional de los morteros para albañilería endurecidos. CEN; 2010 EX.

UNE 83980. Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo. Determinación de la absorción de agua, la densidad y la porosidad accesible al agua del hormigón. CEN; 2014.

UNE-EN 1097-2. Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos - Parte 2: Métodos para la determinación de la resistencia a la fragmentación. CEN; 2010.

UNE-EN 1097-6. Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos- Parte 6: Determinación de la densidad de partículas y la absorción de agua. CEN; 2014.

UNE-EN 13139. Áridos para morteros. CEN; 2003.

UNE-EN 1744-1. Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos. Parte 1: Análisis químico. CEN; 2010.

UNE-EN 196-2. Métodos de ensayo de cementos - Parte 2: Análisis químico de cementos. CEN; 2014

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. CEN; 2012.

UNE-EN 933-8. Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 8: Evaluación de los finos. Ensayo del equivalente de arena. CEN; 2012.

UNE-EN 933-10. Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos- Parte 10: Evaluación de los finos – Granulometría de los filler (tamizado en corriente de aire). CEN; 2010.

UNE-EN 933-11. Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos - Parte 11: Ensayo de clasificación de los componentes de los áridos gruesos reciclados. CEN; 2009.

UNE-EN 450-1. Cenizas volantes para hormigón - Parte 1: Definiciones, especificaciones y criterios de conformidad. CEN; 2013

UNE-EN 450-2. Cenizas volantes para hormigón - Parte 2: Evaluación de la conformidad. CEN; 2006.

NLT 176. Densidad aparente de polvo mineral en tolueno. 1992

UNE-EN 1015-3. Métodos de ensayo para morteros de albañilería. Parte 3: Determinación de la consistencia del mortero fresco (por la mesa de sacudidas). CEN; 2000.

UNE-EN 1015-9. Métodos de ensayo de los morteros para albañilería - Parte 9: Determinación del período de trabajabilidad y del tiempo abierto del mortero fresco. CEN; 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. CEN; 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. CEN; 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 de revoco y enlucido endurecidos aplicados sobre soportes. CEN; 2000.

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. CEN; 2003.

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 endurecidos de revoco y enlucido. CEN; 1999.

2.6. Referencias bibliográficas

Agencia Europea de Sustancias Químicas (ECHA). Disponible online:

<https://echa.europa.eu/es/regulations/reach/understanding-reach>

Asociación Europea de Productos de Combustión de Carbón e. V. (ECOBA). Disponible online:

<http://www.ecoba.com/ecobaccpprod.html>

Bech, N., & Feuerborn, H. J. (2011, May). Ash quality in Europe-Primary and secondary measures. In World of Coal Ash Conference (pp. 9-12).

Bilir, T., Gencil, O., & Topcu, I. B. (2015). Properties of mortars with fly ash as fine aggregate. *Construction and Building Materials*, 93, 782-789.

Braga, M., De Brito, J., & Veiga, R. (2012). Incorporation of fine concrete aggregates in mortars. *Construction and Building Materials*, 36, 960-968.

Carroll, R. A. (2015, May). Coal Combustion Products in the United Kingdom and the Potential of Stockpile Ash. In Proceedings of the World of Coal Ash Conference, Nashville, TN, USA (pp. 4-7).

Comisión Europea (DG ENV). Gestión de RCD. Informe Final Tarea-2. Francia, 2011. Disponible online:

http://ec.europa.eu/environment/waste/pdf/2011_CDW_Report.pdf

Corinaldesi, V. (2012). Environmentally-friendly bedding mortars for repair of historical buildings. *Construction and Building Materials*, 35, 778-784.

Decisión 2014/955 / UE de la Unión Europea. Disponible online:

<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=celex%3A32014D0955>

Directiva 2008/98 / CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 10 de noviembre de 2008, relativa a los residuos. Diario oficial de la Unión Europea. 2008. Disponible online:

<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:32008L0098&from=EN>

Esquinas, A. R., Ramos, C., Jiménez, J. R., Fernández, J. M., & de Brito, J. (2017). Mechanical behaviour of self-compacting concrete made with recovery filler from hot-mix asphalt plants. *Construction and Building Materials*, 131, 114-128.

Esquinas, A. R., Álvarez, J. I., Jiménez, J. R., Fernández, J. M., & de Brito, J. (2018). Durability of self-compacting concrete made with recovery filler from hot-mix asphalt plants. *Construction and Building Materials*, 161, 407-419.

Eurostat. Estadísticas explicadas. Producción e importación de energía. Disponible online:

http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Energy_production_and_imports

Fanghui, H., Qiang, W., & Jingjing, F. (2015). The differences among the roles of ground fly ash in the paste, mortar and concrete. *Construction and Building Materials*, 93, 172-179.

Fernández-Ledesma, E., Jiménez, J. R., Ayuso, J., Corinaldesi, V., & Iglesias-Godino, F. J. (2016). A proposal for the maximum use of recycled concrete sand in masonry mortar design. *Materiales de Construcción*, 66(321), 075.

International Center for Diffraction Data, Inorganic Phases. Power Diffraction File; Card Nr. 24-0081; Committee on Powder Diffraction Standards: Swarthmore, PA, USA, 1995.

Jimenez, J. R., Ayuso, J., Agrela, F., López, M., & Galvín, A. P. (2012-a). Utilisation of unbound recycled aggregates from selected CDW in unpaved rural roads. *Resources, Conservation and Recycling*, 58, 88-97.

Jiménez, J. R., Ayuso, J., Galvín, A. P., López, M., & Agrela, F. (2012-b). Use of mixed recycled aggregates with a low embodied energy from non-selected CDW in unpaved rural roads. *Construction and Building Materials*, 34, 34-43.

Jiménez, J. R., Ayuso, J., López, M., Fernández, J. M., & De Brito, J. (2013). Use of fine recycled aggregates from ceramic waste in masonry mortar manufacturing. *Construction and Building Materials*, 40, 679-690.

- Khatib, J. M. (2008). Performance of self-compacting concrete containing fly ash. *Construction and Building Materials*, 22(9), 1963-1971.
- Kim, K., Shin, M., & Cha, S. (2013). Combined effects of recycled aggregate and fly ash towards concrete sustainability. *Construction and Building Materials*, 48, 499-507.
- Kou, S. C., & Poon, C. S. (2013). Long-term mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete prepared with the incorporation of fly ash. *Cement and Concrete Composites*, 37, 12-19.
- Ledesma, E. F., Jiménez, J. R., Fernández, J. M., Galvín, A. P., Agrela, F., & Barbudo, A. (2014). Properties of masonry mortars manufactured with fine recycled concrete aggregates. *Construction and building materials*, 71, 289-298.
- Ledesma, E. F., Jiménez, J. R., Ayuso, J., Fernández, J. M., & de Brito, J. (2015). Maximum feasible use of recycled sand from construction and demolition waste for eco-mortar production—Part-I: ceramic masonry waste. *Journal of Cleaner Production*, 87, 692-706.
- Ledesma, E. F., Torres Gómez, A. I., López, M., Ayuso, J., & Jiménez, J. R. (2016). Effect of powdered mixed recycled aggregates on bedding mortar properties. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 20(sup1), s1-s17.
- Neno, C., Brito, J. D., & Veiga, R. (2014). Using fine recycled concrete aggregate for mortar production. *Materials research*, 17(1), 168-177.
- Rafieizonooz, M., Mirza, J., Salim, M. R., Hussin, M. W., & Khankhaje, E. (2016). Investigation of coal bottom ash and fly ash in concrete as replacement for sand and cement. *Construction and Building Materials*, 116, 15-24.
- Saviour, M.N. (2012). Environmental impact of soil and sand mining a review. *International Journal of Science. Environment and Technology*, 1(3), 125-134

Silva, J., de Brito, J., & Veiga, R. (2009). Incorporation of fine ceramics in mortars. *Construction and Building Materials*, 23(1), 556-564.

Silva, J., De Brito, J., & Veiga, R. (2010). Recycled red-clay ceramic construction and demolition waste for mortars production. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 22(3), 236-244.

Singh, M., & Siddique, R. (2014). Strength properties and micro-structural properties of concrete containing coal bottom ash as partial replacement of fine aggregate. *Construction and Building Materials*, 50, 246-256.

Tovar-Rodríguez, G., Barra, M., Pialarissi, S., Aponte, D., & Vázquez, E. (2013). Expansion of mortars with gypsum contaminated fine recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, 38, 1211-1220.

CAPÍTULO 3: ADITIVOS PARA MORTEROS CON ÁRIDOS RECICLADOS

3.1. Introducción

Los aditivos se llevan empleando desde hace siglos con el fin de modificar las propiedades generales del mortero, hay certezas de que los romanos fueron los primeros en usar aditivos tales como sangre y grasas de animales, leche, claras de huevo, etc., ya que veían que se mejoraban algunas propiedades del mortero fresco, aunque su uso no estaba basado en ninguna teoría química. En 1850 empezaron a comercializarse acelerantes de fraguado e impermeabilizantes hidrófugos, luego se introdujeron los primeros aditivos reductores de agua y oclusores de aire, además se empezó a utilizar el yeso para contrarrestar el fraguado acelerado que presentaban mezclas preparadas con cemento portland, así se dio a conocer el primer retardante del hormigón. En los años sesenta del siglo XX se empezaron a utilizar aditivos plastificantes, dichos aditivos son los más utilizados hoy en día ya que tienen una gran capacidad para reducir el agua de amasado, lo que hace que se obtengan hormigones y morteros más resistentes, económicos y duraderos. Posteriormente en los años setenta se introdujeron los primeros aditivos superplastificantes, estos aditivos revolucionaron la tecnología del hormigón, ya que consiguieron realizar hormigones fluidos y de alta resistencia para elementos prefabricados y para la construcción de elementos esbeltos.

Actualmente, la norma UNE-EN 934:2010 parte 2 y parte 3 describe el aditivo para mortero y hormigón, como el producto incorporado a los mismos en el momento del amasado en una cantidad no mayor del 5%

en masa, con relación al contenido de cemento, con el objetivo de modificar las propiedades de la mezcla en estado fresco y/o endurecido.

Los aditivos permiten la producción de morteros y hormigones con características diferentes a los tradicionales, por lo que hoy en día es difícil imaginar un mortero u hormigón sin aditivos, de hecho se consideran como un componente junto con los áridos, el cemento y el agua.

Existen diferentes tipos de aditivos tanto para morteros como para hormigones que permiten controlar propiedades como la trabajabilidad y exudación en estado fresco, el tiempo de fraguado y resistencia inicial de la pasta de cemento, la resistencia final, impermeabilidad y durabilidad en estado endurecido.

El mercado de los aditivos es de conformidad CE, que consiste en el símbolo "CE" establecido en la directiva 93/68/CEE.

Los aditivos para morteros de albañilería se deben designar de la siguiente manera: nombre del tipo de aditivo en el idioma de un país miembro, número de la norma: es decir, UNE-EN 934-3:2010 y código para identificar el tipo de aditivo, compuesto por el número de la norma y el número de la tabla normalizada en la que figuran los requisitos de las prestaciones adicionales para cada tipo particular de aditivo. Ejemplo: Aditivo retardador de fraguado para morteros de albañilería fuertemente retardado; EN 934-3:2010; T.3.

3.1.1. Aditivos para hormigones.

La norma UNE-EN 934-2:2010 clasifica los aditivos para hormigones de la siguiente manera:

Aditivo reductor de agua / plastificante: Aditivo que, sin modificar la consistencia, permite reducir el contenido en agua de un determinado hormigón, o que, sin modificar el contenido de agua, aumenta el asiento / escurrimiento, o que produce ambos efectos a la vez.

Aditivo reductor de agua de alta actividad / superplastificante:

Aditivo que, sin modificar la consistencia, permite reducir fuertemente el contenido en agua de un hormigón determinado, o que, sin modificar el contenido de agua, aumenta considerablemente el asiento / escurrimiento, o que produce ambos efectos a la vez.

Aditivo retenedor de agua: Aditivo que reduce la pérdida de agua, disminuyendo la exudación.

Aditivo inclusor de aire: Aditivo que permite incorporar, durante el amasado, una cantidad controlada de pequeñas burbujas de aire, uniformemente repartidas, que permanecen después del endurecimiento.

Aditivo acelerador de fraguado: Aditivo que disminuye el tiempo del principio de transición de la mezcla para pasar del estado plástico al estado rígido.

Aditivo acelerador del endurecimiento: Aditivo que aumenta la velocidad de desarrollo de las resistencias iniciales del hormigón, con o sin modificación del tiempo de fraguado.

Aditivo retardador del fraguado: Aditivo que aumenta el tiempo del principio de transición de la mezcla para pasar del estado plástico al estado rígido.

Aditivo hidrófugo: Aditivo que reduce la absorción capilar del hormigón endurecido.

Aditivo retardador de fraguado / reductor de agua / plastificante:

Aditivo que combina los efectos de un aditivo reductor de agua / plastificante (función principal) y de los de un aditivo retardador de fraguado (función secundaria).

Aditivo retardador de fraguado / reductor de agua de alta actividad / superplastificante: Aditivo que combina los efectos de un aditivo reductor de agua de alta actividad / superplastificante (función

principal) y de los de un aditivo retardador de fraguado (función secundaria).

Aditivo acelerador de fraguado / reductor de agua / plastificante:

Aditivo que combina los efectos de un aditivo reductor de agua / plastificante (función principal) y de los de un aditivo acelerador de fraguado (función secundaria).

Aditivo modulador de la viscosidad: Aditivo incorporado al hormigón para limitar la segregación mediante la mejora de la cohesión.

Por otro lado, la norma ASTM C 497 “Chemical Admixtures for Concrete”, clasifica los aditivos en siete tipos:

TIPO A: Reductor de Agua.

TIPO B: Retardador de Fraguado.

TIPO C: Acelerador de Fraguado.

TIPO D: Reductor de agua y Retardador

TIPO E: Reductor de agua y Acelerador.

TIPO F: Reductor de agua de a Alto Efecto.

TIPO G: Reductor de agua de Alto Efecto y Retardador.

3.1.2. Aditivos para morteros.

La norma UNE-EN 934-3:2010 clasifica los aditivos para morteros de la siguiente manera:

Aditivo inclusor de aire / plastificante: Aditivo que incrementa la trabajabilidad, o que permite una reducción del contenido en agua al incorporar, durante el amasado, una cantidad controlada de pequeñas burbujas de aire, uniformemente distribuidas, que permanecen retenidas después del endurecimiento. Estas pequeñas burbujas de tamaño comprendido entre 10 y 500 micras son muy beneficiosas, ya que según Rodríguez–Mora (2003), estos aditivos actúan como lubricante del

mortero mejorando la docilidad del mortero en estado fresco, debido a su forma esférica y flexible. Otro beneficio de dicho aditivo es que al incluir aire, disminuye la densidad aparente del mortero fresco, esto evita la segregación y exudación del mortero en estado fresco.

Aditivo retardador de fraguado para mortero de albañilería fuertemente retardado: Aditivo retardador del fraguado tal como se define en la Norma UNE-EN 934-2:2010, pero destinado especialmente para su utilización en mortero de albañilería fuertemente retardado por incorporación de aire ocluido. El objetivo de este aditivo, es prolongar el tiempo de trabajabilidad del mortero, sin cambiar sustancialmente las resistencias finales del mismo. La composición está basada principalmente en los gluconatos, que actúan inhibiendo la reacción entre el cemento y el agua.

Además de estos tipos de aditivos especificados en la norma UNE-EN 934-2:2010 de aditivos para morteros, existen otros tipos de aditivos frecuentemente utilizados como los superplastificantes.

La Tabla 3.1 muestra algunos ejemplos de diferentes tipos de aditivos comercializados en España por la empresa BASF Construction Chemical España SL., su dosificación y las propiedades características de cada uno de ellos. Haciendo referencia a esta tabla en la que se da la dosis de aditivo recomendada por el fabricante. Agarwal y col. (2000) en su estudio comentan que no siempre es necesario utilizar la dosis recomendada por el fabricante, ya que dependiendo de los materiales que se vayan a emplear y las proporciones utilizadas dichas dosis pueden o no funcionar bien, por lo tanto recomiendan que antes de realizar las amasadas se realicen una serie de pruebas con nuestros materiales para comprobar que dicha dosificación cumple con las especificaciones marcadas por el fabricante.

Tabla 3.1: Diferentes tipos de aditivos comercializados en España por la empresa BASF Construction Chemical España SL.

Tipo	Características	Dosificación(*)	Propiedades sobre los morteros
MasterCast 205 MA	Superplastificante/ reductor de agua de alta velocidad	0.7% - 2.5%	<ul style="list-style-type: none"> -Elevado poder plastificante. -Evita exudación de la masa del mortero. -Proporciona un gran mantenimiento de la trabajabilidad. -Facilita el bombeo del mortero.
MasterCast 233	Superplastificante/ reductor de agua de alta actividad para mortero	0.6% - 1.2%	<ul style="list-style-type: none"> -Gran poder plastificante. -Mejora la impermeabilidad del mortero. -Reduce la porosidad y mejora el acabado superficial. -Reduce el riesgo de disgregación del mortero. -Aumenta significativamente las resistencias mecánicas. -Permite reducir el tiempo de aplicación. -Mejora las características de transmisión de calor, facilita el contacto entre mortero y tubería eliminando la oclusión de aire.
MasterCast 736	Hidrofugante para hormigón y mortero	0.5% - 2%	<ul style="list-style-type: none"> -Confiere al elemento hidrofugado una propiedad hidrorrepelente. -Disminuye drásticamente la absorción capilar de agua. -Aumenta la impermeabilidad del hormigón o mortero aditivado. -Aumenta la durabilidad de las piezas. -Incrementa la resistencia a los ciclos hielo-deshielo.

<p>Mastercast 930</p>	<p>Aireante/ retenedor para mortero seco</p>	<p>0.08% - 0.8%</p>	<ul style="list-style-type: none"> -Efecto ocluser de aire y plastificante que mejora la trabajabilidad y docilidad del hormigón y mortero. -Reduce el riesgo de exudación del mortero. -Regula la retención de agua, mejorando la hidratación del cemento. -Mejora la adherencia de los morteros. -Minimiza la pérdida de agua por absorción del soporte o por evaporación. -Gran poder retenedor de agua. -Mejora la resistencia a las heladas. -Incrementa la durabilidad de los morteros aditivados. -Mejora y facilita la puesta en obra.
<p>Mastercast 934</p>	<p>Aireante / plastificante para mortero seco</p>	<p>0.08% - 0.8%</p>	<ul style="list-style-type: none"> -Mejora la plasticidad de los morteros en estado fresco. -Reduce la cantidad de agua de amasado requerida. -Mejora la docilidad y trabajabilidad del mortero, facilitando su manipulación y puesta en obra. -Incrementa las resistencias mecánicas. -Mejora la durabilidad del mortero frente a ciclos hielodeshielo.
<p>MasterCast 560</p>	<p>Aditivo retardante / plastificante para mortero seco</p>	<p>0.1% - 0.7%</p>	<ul style="list-style-type: none"> -Elevado poder retardante. -Confiere al mortero prolongado tiempo de trabajabilidad. -Colabora en la confección de masa de mortero de gran docilidad y fácil puesta en obra. -Incrementa las resistencias mecánicas. -Mejora la durabilidad de los morteros aditivados. -Reduce el riesgo de exudación de la masa. -Controla el calor liberado durante el fraguado del mortero, disminuyendo el riesgo de fisuración. -Mejora el rendimiento de hidratación del cemento.

Valoración de cenizas volantes de plantas de producción de energía y residuos de construcción y demolición en morteros industriales.

MasterCast 644	Hidrofugante para mortero seco, hormigón o pastas de cemento.	0.1% - 2.5%	<ul style="list-style-type: none"> -Reduce la absorción capilar de forma drástica. -Evita la penetración de agua sin presión en el mortero. -Aumenta la durabilidad y la impermeabilidad de los morteros tratados. -Disminuye la formación de sales en la superficie, con lo que mantiene el acabado superficial.
MasterCast 550	Aireante / plastificante para mortero húmedo	0.06% - 0.7%	<ul style="list-style-type: none"> - Reduce la cantidad de agua de amasado, disminuyendo el riesgo de fisuras eflorescencias y humedades. -Las burbujas de aire introducidas en el mortero le proporcionan, una vez endurecido, una reducida absorción capilar y un aumento de la durabilidad frente a las heladas. -Evita una posible disgregación durante el transporte y el uso del mortero.
MasterCast 919 AR	Aireante/retardante para mortero húmedo	0.08% - 1%	<ul style="list-style-type: none"> -Mejora la docilidad de la masa aditivada, mejorando el manejo y la aplicación del mortero. -Mejora las resistencias mecánicas del mortero. -Prolonga el tiempo abierto de los morteros, incluso con cementos rápidos y áridos absorbentes. -Proporciona mayor resistencia al mortero frente a los ciclos hielo-deshielo, incrementando su durabilidad.
MasterCast 925	Retardador de fraguado para mortero fabricado en central	0.1% - 1.5%	<ul style="list-style-type: none"> -Aumenta el tiempo abierto del mortero. -Mejora las resistencias del mortero. -Aumenta el rendimiento de hidratación del cemento. -Reduce la fisuración del mortero. -Permite optimizar el rendimiento productivo de la obra.

(*): Porcentaje con respecto a la cantidad de cemento.

3.2. Características químicas de los aditivos para materiales base cemento.

Los aditivos plastificantes y superplastificantes son los aditivos más utilizados hoy en día en los materiales base cemento. Dependiendo de las características químicas de los aditivos superplastificantes nos encontramos con diferentes mecanismos de acción. Sin embargo, todos los aditivos SP comparten un principio común: la mejora de las propiedades del estado fresco se consigue evitando la floculación de las partículas de cemento. Esta floculación provoca el atrapamiento de agua entre partículas de cemento y es causada por fuerzas de Van Der Waals e interacciones electrostáticas entre diferentes partículas de cemento y partículas de cemento y agua, así como efectos de puente entre partículas de cemento y agua (Björnström y Chandra, 2003).

La incorporación de aire en hormigones y morteros también ha supuesto un avance significativo en los materiales base cemento. Los aditivos aireantes contienen sustancias surfactantes que se concentran en la interfase aire-agua, disminuyen la tensión superficial de las partículas y generan burbujas estables en la matriz cementosa que permanecen después del endurecimiento.

A continuación, se detallan los principales compuestos químicos de los aditivos plastificantes, superplastificantes y aireantes comercializados actualmente.

Lignosulfonatos

Los lignosulfonatos (LS) son uno de los primeros aditivos utilizados como dispersantes en el hormigón, se comenzaron a utilizar como plastificantes o reductores de agua en los años treinta del siglo pasado. Algunas de las características de este aditivo es que al añadirlo al hormigón y mortero retarda el tiempo de fraguado y minimiza la cantidad de agua necesaria de la amasada (hasta un 10%), además mejoran la trabajabilidad del hormigón plástico durante su colocación

en encofrados y el aire ocluido aumenta. Estos aditivos, a pesar de tener un rendimiento limitado, disponen de un gran campo de aplicación, especialmente para mejorar la calidad del hormigón.

Los lignosulfonatos se obtienen a partir de la lignina. La lignina se encuentra en la madera y es la segunda molécula orgánica más abundante en la tierra después de la celulosa. La madera contiene alrededor de un 20-30% de lignina. Se extraen del proceso de producción de celulosa dentro de la industria del papel. Los lignosulfonatos son macromoléculas altamente ramificadas que se forman a partir de unidades de fenilpropano conectadas de forma irregular por éter o enlaces C-C. En la Fig. 3.1 se muestra un dibujo esquemático de parte de la estructura de un lignosulfonato, donde se muestran los posibles enlaces y patrones de sustitución en la molécula.

Los lignosulfonatos están disponibles como sales de calcio, sodio y magnesio. En formulación con otros polímeros, se prefieren las sales de sodio, ya que el calcio podría causar la precipitación del yeso con iones sulfato que podría estar presente en otro elemento de la formulación, por ejemplo, polynaphthalenesulfonate (PNS) o polymelaminesulfonate (PMS). Los lignosulfonatos son vendidos como polvo marrón con olor aromático o como soluciones de color pardo al 30-40%.

En los materiales base cemento, los lignosulfonatos actúan por repulsión electrostática de las partículas (Björnström y Chandra, 2003). Las partículas del SP son absorbidas por la superficie de las partículas de cemento, de manera que las fuerzas de interacción de Van der Waals y electrostáticas entre las partículas de cemento son neutralizadas por el efecto repulsivo causado por la carga negativa de las partículas de SP (Fig. 3.1)

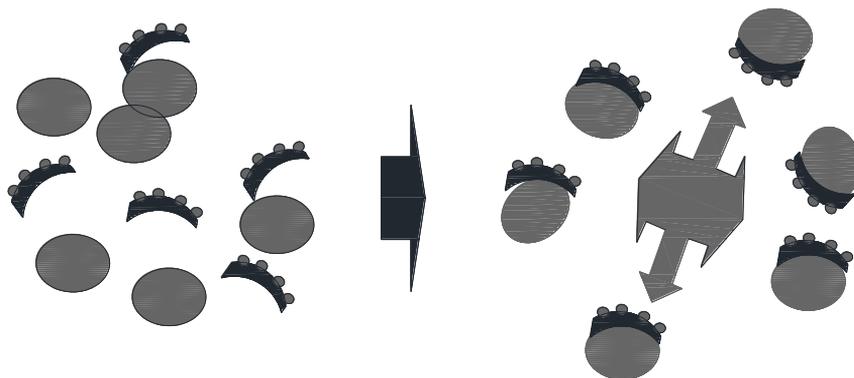


Figura 3.1: Proceso de repulsión entre partículas, responsable del efecto dispersante del aditivo plastificante.

Un factor importante que afecta en el rendimiento de los lignosulfonatos es su peso molecular. Reknes y Gustafsson (2000) probaron lignosulfonatos con diferentes pesos moleculares, llegando a demostrar que las fracciones con un mayor peso molecular mostraban mejores efectos plastificantes. Aunque el lignosulfonato es el material más utilizado para la formulación de productos reductores de agua, es muy raro que se emplee en el diseño de hormigones y morteros de altas prestaciones. Sin embargo, Reknes y Petersen (2003) y Banfill y col. (2007) afirman que los lignosulfonatos de alto peso molecular, de los cuales se eliminan los componentes de azúcares y bajo peso molecular con un tratamiento especial, pueden ser usados para la reducción de agua hasta 20%.

Los lignosulfonatos han sido probados en hormigones hechos con áridos reciclados de hormigón (ARH), y se ha observado que mejoran sus propiedades mecánicas (Pereira y col., 2012; Barbudo y col., 2013) y de durabilidad (Matias y col., 2014; Cartuxo y col., 2016). Sin embargo, se ha observado que los lignosulfonatos pierden su efectividad con la incorporación de áridos reciclados de hormigón en la mezcla (Cartuxo y col., 2015; Cartuxo y col., 2016). La pérdida de eficacia se justifica ya que los áridos reciclados de hormigón están compuestos parcialmente por

mortero adherido, algunas de las partículas de SP son adsorbidas por los ARH en lugar de por las partículas de cemento. Los lignosulfonatos actúan por repulsión electrostática, lo cual tiene un corto rango de antifloculación, actuando solo en las partículas vecinas de las partículas adsorbentes (Pereira y col., 2012).

Dos hechos pueden afectar a la eficacia de los SP base lignosulfonatos en relación con la resistencia mecánica de los hormigones y morteros hechos con áridos reciclados de hormigón:

- La pérdida de eficacia del SP en la trabajabilidad, debido al mecanismo explicado anteriormente, llevando a tener que utilizar una mayor relación agua/cemento, y por lo tanto consiguiendo hormigones menos resistentes y más porosos.
- Si no se observa pérdida de la eficacia del SP en la trabajabilidad, la pérdida de eficacia del SP sobre las propiedades mecánicas puede disminuir, ya que los aumentos en la resistencia y rigidez del hormigón se vuelven más dependientes de las propiedades de los áridos a medida que aumenta la resistencia de la pasta de cemento. Esto no parece ejercer una influencia significativa en los hormigones hechos con AN y algo más en los hormigones hechos con ARH, la influencia es mayor cuando se utilizan áridos reciclados mixtos procedentes de RCD que tienen peores propiedades mecánicas.

Por lo general, la mayoría de los PNS son polímeros aniónicos lineales disponibles comercialmente como sales de sodio o de calcio, y se venden bien como soluciones acuosas con 20-45% de sólidos o bien como polvos de color pardo. Las sales de sodio todavía pueden contener una gran cantidad de residuos de sulfato de sodio procedentes de su producción, mientras que la cantidad de sulfato en las sales de calcio, por lo general, es menor debido a la mala solubilidad del yeso, el cual precipita y puede eliminarse de la solución.

No todos los cementos son compatibles con todos los PNS, y esto es un problema serio para la fabricación de hormigón. Los dispersantes PNS, aumentan en gran medida la fluidez del hormigón fresco. Sin embargo, dependiendo de la combinación utilizada de cemento y PNS, la duración del efecto dispersante puede ser corta, lo que conlleva a una pérdida rápida de trabajabilidad. Los Alkalís solubles muestran que aumenta la fluidez y la duración de la fluidez de la pasta de cemento superplastificada con PNS (Jiang y col., 1999). Este efecto se explica por el hecho de que los alcalinos aumentan la concentración de iones sulfato, que a su vez reduce la absorción del PNS en fases de aluminato, ocasionando más PNS que permanece en la solución (Kim y col., 2000; Jiang y col., 2001). Esto es coherente con lo mencionado anteriormente, de que la incompatibilidad está relacionada con el tipo y la cantidad de yeso en los cementos (Nakajima y Yamada, 2004).

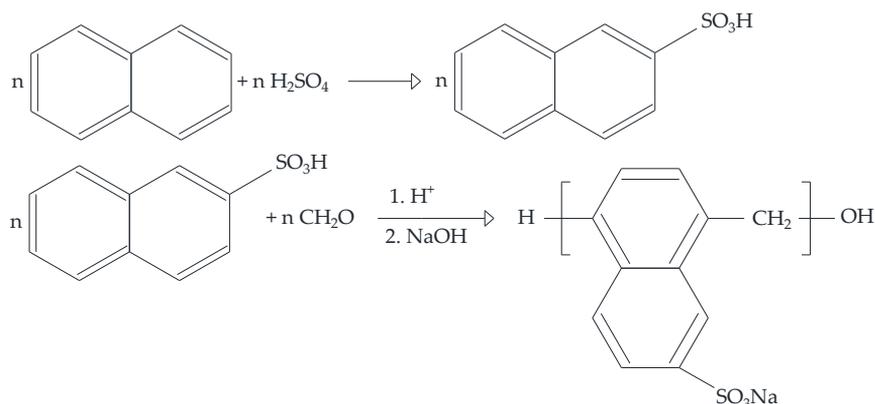


Figura 3.3: Esquema de la reacción para la producción del PNS. Fuente: Understanding the rheology of concrete; capítulo 7.

Polimelamina sulfonatos

Los **Polimelamina sulfonatos** (PMS) son aditivos condensados para hormigón de formaldehído de sulfonato de melamina, estos aditivos son comparables a los PNS (reducción de agua similar). Los PMS han sido utilizados desde mediados de los años setenta como superplastificantes para el hormigón.

Los PMS están basados en polímeros sintéticos y se producen por una reacción de condensación de melamina (2, 4,6-triamino-s-triazine) con sulfito y formaldehído (Bürge y col, 1981; Piech, 1987) (Fig. 3.4). En la primera etapa, se hacen reaccionar melamina, formaldehído y sulfito bajo condiciones alcalinas para dar melanina metilada con grupos de ácido sulfónico. En la segunda etapa la policondensación se lleva a cabo bajo condiciones ácidas. Dependiendo de las condiciones de la reacción y la cantidad de reactivos, se obtiene una serie de polímeros más o menos lineales con grupos de ácido sulfónico.

El peso molecular del polímero y el grado de ramificación son factores adicionales que pueden influir en su rendimiento. En algunos países el contenido de formaldehído libre está limitado o incluso prohibido. Por lo tanto, a pesar de que es posible reducir la cantidad de

formaldehído libre por debajo del nivel exigido, los Polímeros PMS quedaron obsoletos por lo que hoy en día son sustituidos en muchas áreas por los nuevos polímeros PCE (éter policarboxílico).

Normalmente los PMS son los superplastificantes preferidos por las industrias de los prefabricados, si los comparamos con los PNS, se ve que la reducción de agua o la capacidad de plastificación es prácticamente la misma, mientras que la trabajabilidad con PNS es mejor. Sin embargo, el efecto retardante del PMS es menor y mejoran sus resistencias a edades tempranas. Son muy adecuados para la fabricación de elementos arquitectónicos con cemento blanco porque el polímero es incoloro.

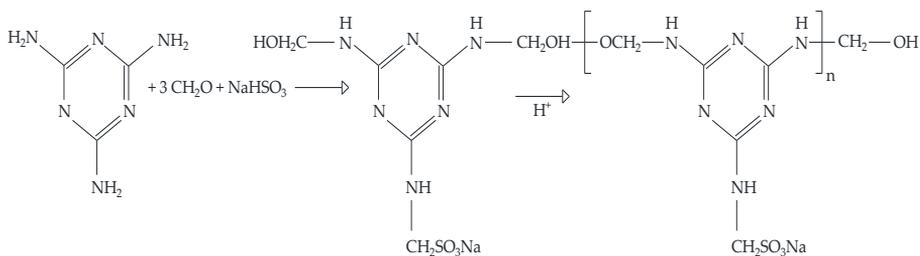


Figura 3.4: Producción de la policondexación del PMS. Fuente: Understanding the rheology of concrete; capítulo 7.

Los superplastificantes de segunda generación (Polynaftalenos sulfonatos y Polimelamina sulfonatos) han tenido como efecto negativo principal que la pérdida de trabajabilidad del hormigón es demasiado rápida. Esta pérdida de trabajabilidad tan acelerada se ha mejorado considerablemente con los aditivos superplastificantes de tercera generación.

Copolímeros de vinilo

Copolímeros de vinilo usados como superplastificantes son polímeros producidos mediante copolimerización pero que no son

polímeros PCE. Estos polímeros lineales, los cuales contienen grupos aniónicos, fueron desarrollados en los años setenta y tuvieron su mayor uso en los años 80 y 90. Pueden considerarse superplastificantes de tercera generación. Los superplastificantes de copolímeros de vinilo han sido utilizados en diversos ensayos de laboratorio para confeccionar hormigones autocompactantes, bien solos o en combinación con aditivos moduladores de viscosidad o espesantes, con buenos resultados. Más tarde la mayoría de ellos fueron reemplazados por los superplastificantes tipo PCE.

A diferencia de los polímeros PNS y PMS, que son producidos por policondensación, los polímeros de vinilo se producen por copolimerización radical.

La dosificación de los copolímeros de vinilo es la mitad de la dosis de superplastificantes PNS o PMS para la misma plasticidad o reducción de agua. La reducción del agua es de aproximadamente el 30%. Además, se mejora el asentamiento del hormigón e incrementan el periodo de trabajabilidad.

Se pueden producir diferentes polímeros teniendo en cuenta los grupos de sulfonato o carboxilato. Algunos ejemplos son copolímeros de ácido acrílico con acrilato de hidroxipropilo (Bradeley and Szymanski, 1985), o copolímeros de sulfonato de ácido maleico modificados con pirrolidona de vinilo, acetato de vinilo u otros (Bürge y col., 1990). En la Fig. 3.5 se muestra la estructura de dos copolímeros de vinilo que contienen sulfonatos y ácidos carboxílicos, los cuales fueron investigados con más detalle por Flatt y col. (1997) y Kusterle y col. (1999).

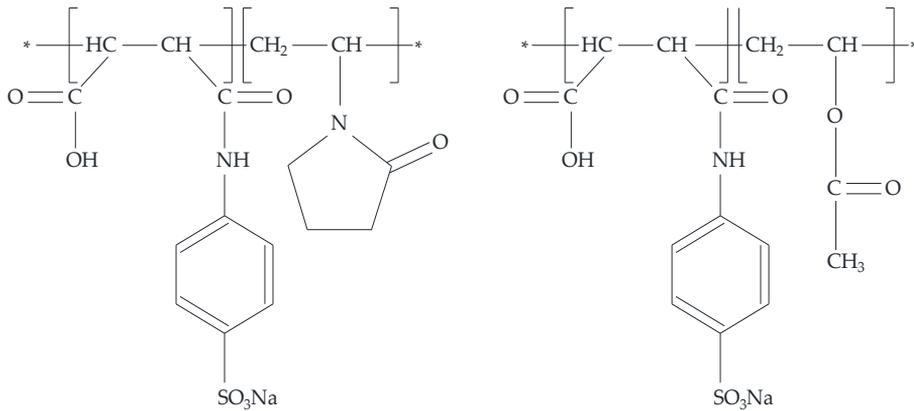


Figura 3.5: Estructura molecular de dos copolímeros de vinilo. Fuente: Understanding the rheology of concrete; capítulo 7.

Policarboxilatos (PCE)

A mediados de los años 80, se desarrolló en Japón una nueva generación de superplastificantes (Tsubakimoto y col., 1984). Estos superplastificantes no son polímeros iónicos lineales como los materiales sintéticos anteriores, ni tampoco polímeros naturales voluminosos como en el caso de los lignosulfonatos. Estos superplastificantes tienen una estructura similar a un peine. Consisten en un polímero llamado “segmento principal o columna vertebral” donde cadenas laterales están conectadas de una manera más o menos regular. Si se dibuja un polímero con todas las cadenas laterales en la misma dirección, como se muestra en la Fig. 3.6, se ve como un peine. Es por eso que estos polímeros se llaman “copolímeros de peine”.

Los aditivos tradicionales a base de melaminas y naftalenos se basan en un efecto de dispersión de las partículas del cemento. Esta se consigue porque la molécula del aditivo tiene una estructura de dipolo con grupos cargados negativamente. Esas moléculas se absorben por las partículas del cemento y las dota de cargas negativas, haciendo que los mismos se repelan entre sí. El efecto de repulsión electrostática disminuye progresivamente al depositarse sucesivas capas de productos

de hidratación en la superficie de la partícula de cemento, lo que conlleva a una pérdida de la fluidez y la trabajabilidad.

Los nuevos aditivos PCE, basados en éteres policarboxílicos, basan su efecto dispersante en importantes cadenas laterales y, mucho menos, en la pura repulsión electrostática. Las largas cadenas laterales crecen más allá de los productos de hidratación del cemento formados, proporcionando una mayor dispersión. Estas cadenas laterales son responsables del efecto estérico (Yoshioka y col., 1997; Björnström y Chandra, 2003). Al transcurrir el tiempo, una segunda molécula se activa mediante el efecto estérico y así se logra una actividad más duradera en el tiempo.

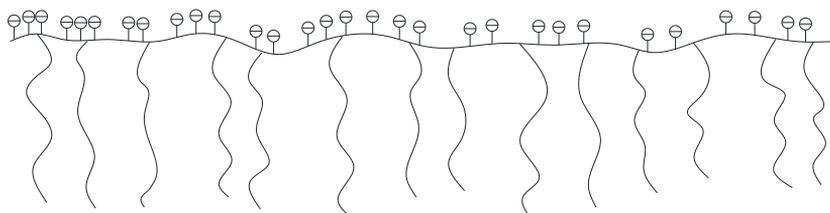


Figura 3.6: Dibujo esquemático de un polímero de peine con un esqueleto iniónico y cadenas laterales flexibles unidas. Fuente: *Understanding the rheology of concrete*; capítulo 7.

Desde que se crearon estos nuevos superplastificantes, su mercado creció rápidamente. Todos ellos se basan en el mismo principio: un segmento principal polimérico construido principalmente a partir de monómeros y unido a cadenas laterales no iónicas hechas de poliéteres.

En general la columna vertebral de la molécula, con grupos carboxilo, es responsable de la reducción de agua alcanzable, asentamiento inicial y tiempo de amasado. Mientras que las cadenas laterales, su longitud, densidad, etc., determinan esencialmente el mantenimiento o caída de la trabajabilidad del superplastificante. Dependiendo de cómo y cuantas de estas cadenas laterales se

introduzcan, se pueden conseguir distintas configuraciones de polímeros según sea nuestro interés.

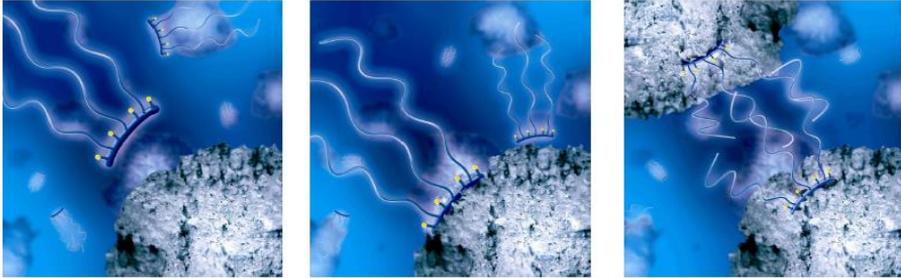


Figura 3.7: Mecanismo de dispersión por impedimentos estéricos. Fuente: BASF.

En los últimos años se ha llegado a un control total sobre la formulación de los PCE empleados en aditivos de hormigón. Se sintetizan las moléculas de forma muy específica, modificando la cadena central o columna vertebral, generando un determinado número de cadenas laterales en la molécula, o bien determinada longitud de éstas en función de las necesidades de los clientes.

Estos nuevos superplastificantes de tercera generación han sustituido en muchas aplicaciones a los anteriores (PNS, PMS y los copolímeros de vinilo). El desarrollo de los PCE es lo que realmente han permitido desarrollar el hormigón autocompactante.

Los PCE han hecho posible reducir la relación (a/c) del hormigón a valores tan bajos como 0,20, mientras se mantiene una buena trabajabilidad con un asentamiento prolongado (Danzinger y col., 2003). Esta baja relación a/c es más o menos la cantidad de agua necesaria para la hidratación del cemento.

Aunque solo se utilizan algunas unidades estructurales básicas para formar polímeros PCE, la industria de los aditivos han desarrollado una gran variedad de polímeros adaptados a las diferentes necesidades de los hormigones. Los PCE están disponibles como soluciones acuosas o como polvos.

Los PCE también han sido probados en hormigones hechos con áridos reciclados de hormigón (ARH), se ha observado que mejoran sus propiedades mecánicas y de durabilidad, incluso se ha observado que su efectividad no se ve tan afectada como en el caso de los lignosulfonatos (Cartuxo y col., 2015; Cartuxo y col., 2016). Esto está justificado, ya que en el caso de que la cadena principal, o parte de ella, se una a la superficie de una partícula de ARH, las cadenas laterales se extienden más allá de ella y repelen a otras cadenas laterales de otras partículas de ARH o de cemento, contribuyendo de esa manera a la fluidez global de la pasta cementosa. No se han encontrado en la bibliografía referencia al efecto de PCE sobre materiales base cemento hechos con áridos reciclados mixtos (ARM).

Bravo y col. (2017) han probado recientemente que la efectividad de los PCE está relacionada con la composición y origen de los ARH, sólo en algunos tipos de ARH, la tasa de incorporación afecta a la efectividad de los PCE en hormigones estructurales.

Fosfonatos de óxido de polietileno (PEG)

Los superplastificantes con grupos fosfato se desarrollaron a principio de los años 90. A diferencia de los PCE que son polímeros aniónicos con cadenas laterales de óxido de polietileno, los PEG son polímeros construidos con una sola cadena de óxido de polietileno con grupos fosfato en un extremo. Por lo tanto, sólo uno o dos grupos fosfato están unidos a un único óxido de polietileno de medio a alto peso molecular. Las estructuras de tales superplastificantes son descritas por Mosquet y col. (1997) y Guicquero y col. (1999).

Los iones de calcio juegan un papel principal en la adsorción de superplastificantes sobre cemento, la adsorción de mono-fosfonato es más fuerte que la del carboxilato o sulfonato. Por lo tanto, uno o dos grupos fosfonato parecen ser suficientes para forzar la molécula a adsorberse sobre cemento o sobre carbonato de calcio.

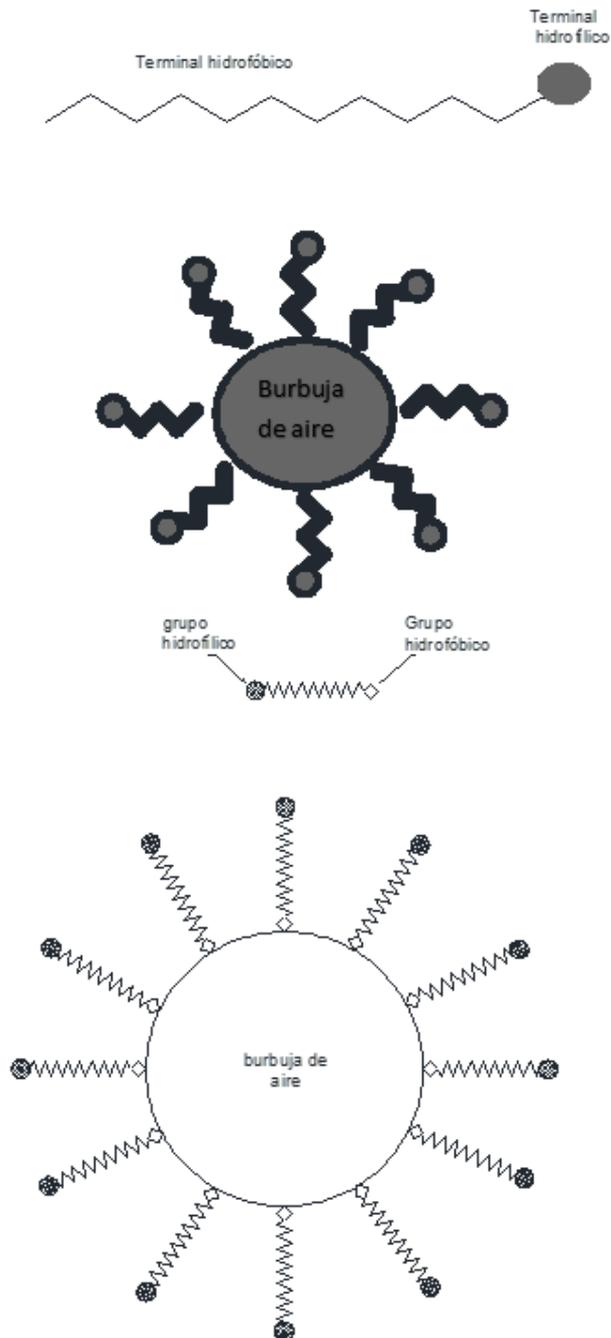


Figura 3.9 Principio de acción de los incorporadores de aire

Los ácidos carboxílicos o sulfónicos forman generalmente los grupos hidrofílicos, en tanto que los hidrocarburos alifáticos o aromáticos (cadena orgánica) conforman los grupos hidrofóbicos. Estos aditivos se producen a partir de subproductos de la industria del papel, petróleo y procesamiento animal.

El tamaño de la burbuja depende de la longitud y secuencia de la cadena orgánica. Por lo tanto, es controlable. La carga negativa exterior de la miscela crea repulsión entre “burbujas”, de tal manera que se reparten uniformemente.

3.3. Objetivos

El objetivo específico de este capítulo es estudiar el efecto de diferentes tipos de aditivos plastificantes, superplastificantes y aireantes comerciales en las propiedades de morteros base cemento hechos con áridos naturales y áridos reciclados mixtos de RCD.

Para la consecución de este objetivo, se han planteado las actividades:

- Selección y caracterización de los materiales a emplear.
- Estudio de la influencia del tipo de árido (natural o reciclado) en las propiedades del mortero fresco y endurecido.
- Estudio del efecto de aditivos aireante-plastificante, aireante-retenedor, retardante-plastificante y superplastificante en las propiedades de los morteros hechos con áridos naturales.
- Estudio del efecto de aditivos aireante-plastificante, aireante-retenedor, retardante-plastificante y superplastificante en las propiedades de los morteros hechos con áridos reciclados de RCD.

3.4. Materiales y métodos

3.4.1. Materiales

3.4.1.1. Árido natural

Para la realización del presente estudio de investigación, se ha utilizado una arena natural silícea comercial (AN) no normalizada, procedente de la planta Áridos Álvarez SL de Córdoba.



Figura 3.10: Arena natural silícea (AN).

3.4.1.2. Árido reciclado de RCD - mixto

Para este estudio se ha empleado la fracción fina 0/4 mm de un árido reciclado de RCD (AR) tipo mixto, recogido de la planta de gestión de Residuos de Construcción y Demolición de la empresa GECORSA S.L., dicha planta se encuentra en Córdoba (Sur de España).



Figura 3.11: Arena reciclada de RCD.

3.4.1.3. Cemento

Se han utilizado dos tipos de cemento comercial: CEMII/B-L 32,5 N y CEMIV/B (V) 32,5 N, ambos suministrados por Cementos Cosmos S.A. Las Tablas 3.2 y 3.3 muestran las características de ambos cementos.

Tabla 3.2: Características del CEM II/B-L 32,5N.

CEM II/B-L 32,5 N		
Cemento portland con caliza		
COMPOSICIÓN	Norma	Valor habitual
Clinker	65-79 %	≥ 65 %
Caliza	21-35 %	≤ 35 %
Minoritarios	0-5 %	≤ 5 %
EXIGENCIAS QUÍMICAS	Norma	Valor habitual
Sulfato (SO ₃)	≤ 3,5 %	< 3,5 %
Cloruro	≤ 0,1 %	< 0,04 %
Cromo VI soluble en agua	≤ 0,0002 %	< 0,0002 %
PROPIEDADES FÍSICAS		
Densidad partícula		2,88 gr/cm ³
EXIGENCIAS FÍSICAS	Norma	Valor habitual
Expansión	≤ 10 mm	< 2,5 mm
Tiempo de fraguado		
Principio	≥ 60 min.	> 75 min.
Final	≤ 720 min.	< 275 min.
EXIGENCIAS MECÁNICAS	Norma	Valor habitual
Resistencia a la compresión		
2 días	≥ 16,0 N/mm ²	> 25,0 N/mm ²
28 días	≥ 32,5 N/mm ²	> 34,0 N/mm ²
	≤ 52,5 N/mm ²	< 52,5 N/mm ²

Tabla 3.3: Características del CEM IV/B (V) 32,5N.

CEM IV/B(V) 32,5N		
Cemento puzolánico		
COMPOSICIÓN	Norma	Valor habitual
Clinker	45-64 %	≥ 54 %
Ceniza	36-55 %	≤ 46 %
Minoritarios	0-5 %	≤ 5 %
EXIGENCIAS QUÍMICAS	Norma	Valor habitual
Sulfato (SO ₃)	≤ 3,5 %	< 3,5 %
Cloruro	≤ 0,1 %	< 0,04 %
Cromo VI soluble en agua	≤ 0,0002 %	< 0,0002 %
PROPIEDADES FÍSICAS		
Densidad partícula		2,60 gr/cm ³
EXIGENCIAS FÍSICAS	Norma	Valor habitual
Expansión	≤ 10 mm	< 2,5 mm
Tiempo de fraguado		
Principio	≥ 60 min.	> 95 min.
Final	≤ 720 min.	< 420 min
EXIGENCIAS MECÁNICAS	Norma	Valor habitual
Resistencia a la compresión		
2 días	≥ 16,0 N/mm ²	> 25,0 N/mm ²
28 días	≥ 32,5 N/mm ²	> 34,0 N/mm ²
	≤ 52,5 N/mm ²	< 52,5 N/mm ²

3.4.1.4. Aditivos

Se han empleado 4 tipos de aditivos suministrados por el grupo BadischeAnilinUnd Soda Fabrik (BASF Construction Chemical España SL): aireante/ plastificante (Mastercast 934), aireante (Mastercast 930), retardante/ plastificante (Mastercast 560) y superplastificante (Mastercast 205 MA). A continuación, se describen las propiedades de dichos aditivos.

Mastercast 934: aditivo aireante-plastificante en polvo para mortero seco, se trata de un aditivo especialmente diseñado para mejorar la trabajabilidad y docilidad de morteros industriales preparados en seco. Este aditivo se caracteriza porque produce un efecto plastificante / aireante que mejora la plasticidad de los morteros en estado fresco, reduce la cantidad de agua de amasado requerida, incrementa las

resistencias mecánicas y mejora la durabilidad del mortero frente a ciclos hielo-deshielo. Desde el punto de vista químico, se trata de un aditivo en base a moléculas surfactantes.

Mastercast 930: aditivo aireante-retenedor presentado en polvo, para la fabricación de mortero de albañilería en general. Permite mejorar la trabajabilidad y docilidad de todo tipo de morteros industriales predosificados en seco y ampliar el tiempo abierto del mortero. Este aditivo se caracteriza por reducir el riesgo de exudación del mortero, regular la retención de agua mejorando así la hidratación del cemento, mejorar la adherencia de los morteros, mejorar la resistencia a las heladas, mejorar y facilitar su puesta en obra, minimizar la pérdida de agua por absorción del soporte o por evaporación y finalmente por incrementar la durabilidad de los morteros aditivados. Están compuestos por polisacáridos.

Mastercast 560: aditivo retardante-plastificante presentado en polvo y diseñado para mortero industrial seco predosificado, prolonga el tiempo de trabajabilidad, incluso trabajando con cementos de fraguado rápido, áridos absorbentes y temperaturas elevadas. Su efecto fluidificante y reductor de agua, permite la fabricación de morteros de elevada calidad y excelente plasticidad, facilitando su manejabilidad y mejorando sus resistencias mecánicas. Se caracteriza por tener un elevado poder retardante, por mejorar la durabilidad de los morteros aditivados, reducir el riesgo de exudación de la masa, por mejorar el rendimiento de hidratación del cemento y por controlar el calor liberado durante el fraguado del mortero, disminuyendo así el riesgo de fisuración. Se trata de una sal de ácido hidroxilado carboxílico.

Mastercast 205 MA: aditivo en polvo superplastificante-reductor de agua de alta actividad especialmente indicado para la preparación de morteros autonivelantes, de elevada fluidez, sin exudación y de elevada calidad que pueden ser aplicados sin la necesidad de métodos de

compactación. Este aditivo se caracteriza porque proporciona un gran mantenimiento de la trabajabilidad y facilita el bombeo del mortero. Se trata de un Éter de policarboxilato.

Las propiedades y características de estos cuatro tipos de aditivos se muestran en la Tabla 4.

Tabla 3.4: Propiedades y características de los aditivos empleados.

PROPIEDADES Y CARACTERÍSTICAS DE LOS DISTINTOS TIPOS DE ADITIVOS				
	Mastercast 934	Mastercast 930	Mastercast 560	Mastercast 205 MA
Función principal	Aireante / Plastificante	Aireante / Retenedor	Retardante / Plastificante	Superplastificante / moteros autonivelante
Función secundaria	Plastificante / reductor de agua	Plastificante/ reductor de agua	Plastificante/ reductor de agua.	Reductor de agua / Cohesionante
Efecto secundario	Pérdida de resistencias por sobredosificación	Elevada oclusión de aire por sobredosificación	Retraso excesivo de fraguado	Riesgo de disgregación
Aspecto físico	Polvo blanco	Polvo blanco	Polvo blanco	Polvo beige
Densidad aparente, 20°C	1,040 ± 0,08 g/cm ³	0,770 –0,930g/cm ³	1,217±0,06g/cm ³	0,870 –0,970 g/cm ³
PH	10,5 ± 1	9,4 ± 1	9 – 12	6 ± 1
CLORUROS	< 0,1 %	< 0,1 %	≤ 0,1%	< 0,1%

3.4.1.5. Agua de amasado

Se utiliza agua potable de la red de abastecimiento.

3.4.2. Caracterización de los áridos

3.4.2.1. Granulometría

En la Fig. 3.12 se observa la curva granulométrica del AN y AR determinada según la Norma UNE 993-1: 2006. Así mismo se muestra la curva de Faury que permite obtener una compacidad máxima de los áridos (Fernández Cánovas, 2011). Se observa que el AR se aproxima más a la curva teórica de Faury. Para evitar el efecto de la granulometría sobre las propiedades de los morteros frescos y endurecidos y así poder comparar los resultados, se ha reproducido en el laboratorio para el AN

la misma granulometría que para el AR. Para ello, el AN se dividió en diferentes fracciones, dosificándolo de manera que se asemejase a la curva del AR que es la que más se aproxima a la curva teórica de Faury. Los tamices utilizados para fraccionar la arena fueron: 4mm, 2mm, 1mm, 0,5mm, 0,25mm, 0,125mm. El material retenido en el tamiz de 4mm fue rechazado para la realización de los ensayos.

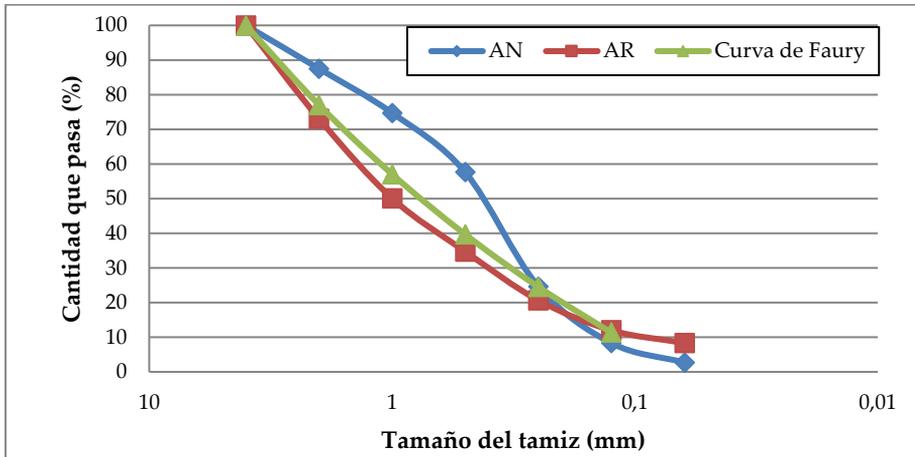


Figura 3.12: Curva granulométrica AN, AR y FAURY.

3.4.2.2. Composición del AR

El árido reciclado a partir del cual se obtuvo la fracción fina, estaba compuesto según la norma UNE-EN 933-11:2009 por Hormigón y morteros (38,24%); áridos naturales no ligados (31,47%); materiales cerámicos (28,85%); materiales bituminosos (1,14%); yeso (0,15%); vidrio 0,01%; otros como madera, plástico, etc. (0,4%).



a) Materiales cerámicos



b) Áridos naturales no ligados



c) Hormigón y morteros



d) Materiales bituminosos



e) Vidrio, yeso y otros

Figura 3.13: Composición del árido reciclado.

3.4.2.3. Tamaño de partículas ultrafinas

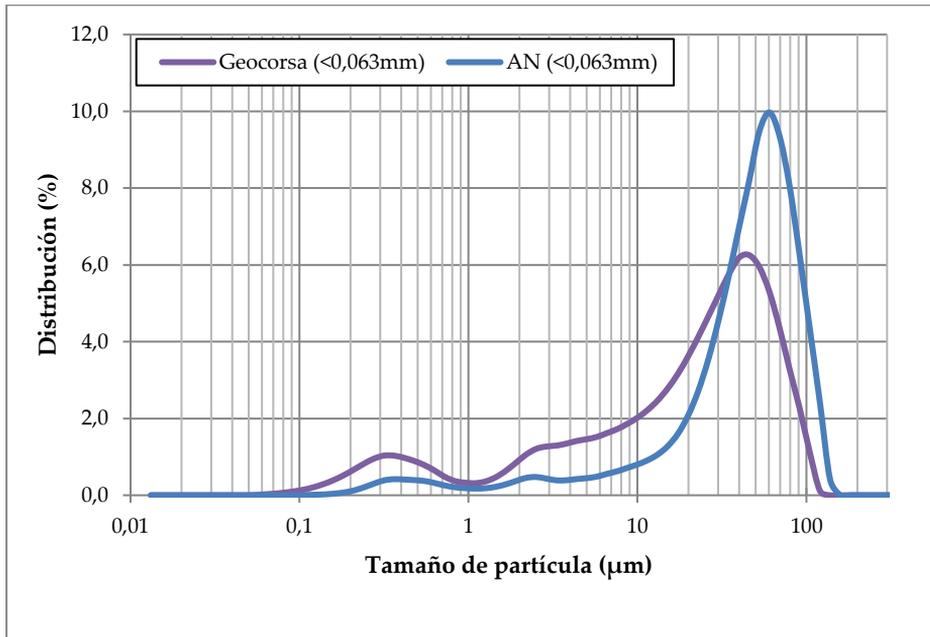


Figura 3.14: Distribución del tamaño de partícula del AN y AR < 0,063mm.

La Fig. 3.14 muestra la distribución del tamaño de las partículas de menos de 0,063 mm, medido con un analizador Mastersizer S (Malvern instruments) usando etanol como dispersante. En ambas muestras, el tamaño de la mayor parte de las partículas se encuentra comprendido entre 10 y 110 µm. En el caso de AR el máximo se encuentra situado entre 40 y 50 µm, mientras que en el caso del AN el máximo está en torno a 60 µm. El AR tiene una mayor cantidad de partículas cuyo tamaño está comprendido entre 1 y 10 µm, lo cual está justificado porque es un material más blando, lo que facilita su disgregación con su manipulación (Evangelista y de Brito, 2014), y por el proceso de trituración empleado.

3.4.2.4. Densidad y absorción

De acuerdo con el procedimiento indicado en la norma UNE-EN 1097-6:2014 se determina la densidad y absorción del árido AN y AR. La Tabla 3.5 muestra el valor medio de tres repeticiones.

Tabla 3.5: Propiedades físico-mecánicas de AN y AR.

Características	Norma	AR	AN
Densidad aparente de partículas (g/cm ³)	UNE-EN 1097-6/00	2,659	2,682
Densidad de particular tras secado en estufa(g/cm ³)	UNE-EN 1097-6/00	2,402	2,655
Densidad de partículas saturadas con la superficie seca (g/cm ³)	UNE-EN 1097-6/00	2,499	2,665
Absorción de agua (%)	UNE-EN 1097-6/00	4,025	0,385

El AR muestra una menor densidad y mayor absorción de agua que el AN, lo cual está justificado por la mayor porosidad del AR, rugosidad y superficie específica. Estas propiedades han sido ampliamente estudiadas en la bibliografía (Evangelista y de Brito, 2014) y los resultados concuerdan con otros estudios previos. El tamaño del árido reciclado influye de manera decisiva sobre la absorción, en las fracciones finas la absorción es mayor que en las gruesas debido a que tiene mayor superficie específica (Jiménez y col., 2013).

3.5. Diseño experimental

Para llevar a cabo la consecución de este objetivo, se diseñan dos familias de morteros. Familia-1: morteros hechos con cemento CEMII/B-L 32,5 N y Familia-2: morteros hechos con cemento CEMIV/B (V) 32,5 N. Todos los morteros se dosifican con una relación volumétrica 1:6 (cemento:árido). Los áridos se usaron a temperatura y humedad ambiente. La humedad del AR estaba en torno al 2,68% mientras que la humedad del AN estaba en torno al 0,2% y una temperatura de 20 °C.

En cada una de las familias se realizaron morteros con AN y morteros con 100% de sustitución de AR. Para estudiar el efecto del aditivo, se incorporó el porcentaje máximo en peso del aditivo, tanto en los morteros con AN como en los morteros con AR, lo que permitirá estudiar el efecto del aditivo en ambos tipos de morteros.

La nomenclatura empleada en este estudio para los morteros se observa en la Tabla 3.6, y ha seguido el siguiente orden: **Tipo de mortero (MS/MR) + tipo de cemento (II/IV) + tipo de aditivo (1,2,3,4).**

Tipo de mortero:

MS: Mortero árido natural silíceo (AN)

MR: Mortero árido reciclado (AR)

Tipo de cemento:

II: CEM II

IV: CEM IV

Tipo de aditivo:

1: Aditivo aireante-plastificante Mastercast 934.

2: Aditivo aireante-retenedor Mastercast 930.

3: Aditivo retardante-plastificante Mastercast 560.

4: Aditivo superplastificante Mastercast 205 MA.

En la tabla 6 se muestra la dosificación empleada para la fabricación de los 20 tipos de morteros en cada una de las amasadas.

En la Familia-1 la cantidad en gramos de cemento empleada es mayor que en la Familia-2, ya que la densidad de partícula del cemento CEM-II es mayor que la del cemento CEM-IV, lo cual está justificado por la adición de cenizas volantes del segundo tipo de cemento, que son más ligeras que las partículas de caliza.

El agua se ajustó experimentalmente hasta conseguir una consistencia de 175 ± 10 mm, siguiendo la norma EN 1015-3: 1999. Los morteros que no cumplían con este valor eran rechazados.

En la Familia-1 se observa que el uso de los aditivos ensayados reduce la relación a/c y la relación a/c efectiva. Esto ocurre tanto en los

morteros hechos con AN como en los morteros hechos con AR, excepto con el aditivo-2 y AN. El mortero que requiere menor cantidad de agua es el fabricado con el aditivo-4 (aditivo superplastificante para mortero autonivelante) y AN. El uso del aditivo-4 reduce entre un 26 y 27% la cantidad de agua necesaria para el amasado en los morteros hechos con AN (MSII4 vs. MSII) y en los morteros hechos con AR respectivamente (MRII4 vs. MRII), por lo que parece que el uso de AR no perjudica la efectividad a la hora de reducir la cantidad de agua del aditivo-4. Estos resultados coinciden con los propuestos por Bravo y col. (2017) en los ensayos realizados con áridos reciclados de hormigón y aditivos superplastificantes.

En el caso del aditivo-1 (aireante-plastificante) la cantidad de agua necesaria se reduce un 8% para los moteros hechos AN (MSII1 vs MSII) y para los morteros hechos con AR (MRII1 vs MRII).

En el caso del aditivo-2 (aireante-retenedor) la cantidad de agua necesaria para amasar el mortero MSII2 aumenta ligeramente (6%) con respecto al mortero de referencia (MSII), lo cual puede estar justificado por un exceso en la dosificación de aditivo que introduce una excesiva cantidad de aire en los morteros y dificultad de fluidez de la pasta que tiene que ser compensada con un aumento de la cantidad de agua. Sin embargo, con el uso de AR, la cantidad de agua requerida se reduce un 2% (MRII2 vs MRII). Por lo que el aditivo-2 no se muestra muy eficaz para reducir la relación a/c.

En el caso del aditivo-3 (retardante-plastificante) la cantidad de agua necesaria se reduce un 11% para los moteros hechos AN (MSII3 vs MSII) y un 10% para los morteros hechos con AR (MRII3 vs MRII).

En la Familia-2, el aditivo 4 (superplastificante) se muestra como el más efectivo en reducir la relación a/c. Este aditivo reduce entre un 24% y 13% la cantidad de agua necesaria para el amasado en los morteros hechos con AN (MSIV4 vs. MSIV) y en los morteros hechos con AR respectivamente (MRIV4 vs. MRIV), por lo que parece que para este tipo

de cemento el uso de AR si perjudica la efectividad del aditivo-4 a la hora de reducir el agua de amasado. Posiblemente porque las partículas de cenizas volantes compitan con las partículas de cemento y áridos reciclados en captar las cadenas del superplastificante.

En el caso del aditivo-1 (aireante-plastificante) la cantidad de agua necesaria se reduce un 4% para los morteros hechos AN (MSIV1 vs MSIV) y un 3% para los morteros hechos con AR (MRIV1 vs MRIV). Los resultados son comparables a los obtenidos en la Familia-1.

En el caso del aditivo-2 (aireante-retenedor), al igual que ocurría en la Familia-1, la cantidad de agua necesaria para amasar el mortero MSIV2 aumenta ligeramente (6%) con respecto al mortero de referencia (MSII), y en el mortero MRIV2 aumenta un 5% con respecto al MRIV. Las razones han sido expuestas en la Familia-1.

En el caso del aditivo-3 (retardante-plastificante) la cantidad de agua necesaria se reduce un 4% para los morteros hechos AN (MSIV3 vs MSIV) y aumenta un 5% para los morteros hechos con AR (MRIV3 vs MRIV), lo cual no concuerda con los resultados obtenidos en la Familia-1. Los datos de amasado del mortero MRIV3 no se consideran coherentes, lo que tendrá su repercusión en el análisis del resto de propiedades del mortero.

Barbudo y col. (2013) ve en su estudio como la relación a/c efectiva disminuye aproximadamente un 17% con la adición de plastificantes (lignosulfonatos) y un 26% con la adición de superplastificantes (policarboxilatos), en comparación con el hormigón de referencia.

Cartuxo y col. (2016) observan en su trabajo que la relación agua/cemento aumentó con el uso de áridos reciclados finos de hormigón (FRCA), lo cual lo explican por la mayor angulosidad de las partículas de reciclado con respecto a la arena natural (AN), lo que conlleva a tener que utilizar mayor cantidad de agua para poder lograr el mismo asentamiento. El hormigón fabricado con un plastificante

(lignosulfonato) redujo la relación a/c efectiva con respecto a la familia de hormigón de referencia entre un 15,7% y 9,09% para los porcentajes de sustitución de 0% y 100%, lo que pone de manifiesto la pérdida de efectividad del aditivo con el uso de árido reciclado. Mientras que el hormigón hecho con superplastificante (policarboxilatos) mantuvo una reducción en la relación agua/cemento efectiva de alrededor del 25% para cualquier porcentaje de sustitución, lo que pone de manifiesto que el uso de áridos reciclados de hormigón no perjudica la efectividad de los superplastificantes hechos a partir de policarboxilatos.

A similares conclusiones llegaron previamente Pereira y col. (2012), quienes observan en su estudio como al añadir SP la relación a/c disminuye al sustituir arena natural (AN) por FRCA, una vez analizaron los resultados vieron como el SP1 (superplastificante base lignosulfonatos) es más sensible a la presencia de FRCA que SP2 (superplastificante base policarboxilatos), esto es debido a que a pesar de ser los dos superplastificantes, el SP1 está basado en lignosulfonatos los cuales actúan principalmente por repulsión electrostática sobre la superficie de las partículas de cemento, y el SP2 está compuesto por ácidos policarboxílicos en este caso el fenómeno de la dispersión se debe principalmente al efecto de impedimento estérico, menos afectada por la superficie de las partículas de cemento.

Tabla 3.6: Proporciones de la mezcla de mortero.

Mortero	AR (gr)	AN (gr)	CEM IV (gr)	CEM II (gr)	Aditivos (gr)	Agua (gr)	a/c	a/c efectiva
MSII	-	3641	-	685	-	530	0,77	0,75
MSII1	-	3641	-	685	5,26	485	0,71	0,69
MSII2	-	3641	-	685	5,26	560	0,82	0,8
MSII3	-	3641	-	685	4,6	470	0,69	0,67
MSII4	-	3641	-	685	16,45	390	0,57	0,55
MRII	3335	-	-	685	-	858	1,3	1,06
MRII1	3335	-	-	685	5,26	788	1,15	0,95
MRII2	3335	-	-	685	5,26	840	1,23	1,03
MRII3	3335	-	-	685	4,6	773	1,13	0,93
MRII4	3335	-	-	685	16,45	628	0,92	0,72
MSIV	-	3641	610	-	-	480	0,79	0,76
MSIV1	-	3641	610	-	4,88	460	0,75	0,73
MSIV2	-	3641	610	-	4,88	510	0,84	0,81
MSIV3	-	3641	610	-	4,27	460	0,75	0,73
MSIV4	-	3641	610	-	15,25	367	0,6	0,58
MRIV	3335	-	610	-	-	767	1,26	1,04
MRIV1	3335	-	610	-	4,88	748	1,23	1,01
MRIV2	3335	-	610	-	4,88	803	1,32	1,1
MRIV3	3335	-	610	-	4,27	803	1,32	1,1
MRIV4	3335	-	610	-	15,25	666	1,09	0,87

3.5.1. Ensayos realizados a los morteros

Las propiedades analizadas del mortero fresco analizadas fueron: la consistencia (UNE-EN 1015-3: 1999), densidad del mortero fresco (UNE-EN 1015-6: 1998) y trabajabilidad (UNE-EN 1015-9: 2000). Los valores medios fueron obtenidos a partir de cuatro repeticiones de cada ensayo.

El mortero endurecido fue caracterizado por la densidad seca (UNE-EN 1015-10: 1999), resistencia a compresión (UNE-EN 1015-11:

1999) a 28 y 180 días, retracción (UNE 83831: 2010) a 2, 7, 14 y 28 días en probetas de 40 mm × 40 mm × 160 mm, absorción de agua por capilaridad (UNE-EN 1015-18: 2002) y absorción de agua por inmersión (UNE 83980: 2014). Para obtener los valores medios se hizo la media de cuatro repeticiones.

3.6. Resultados y discusión

3.6.1. Evolución de la consistencia del mortero

Para evaluar la evolución de la consistencia (UNE-EN 1015-3: 1999) del mortero con el tiempo se hicieron medidas cada 15 min hasta que se consiguiera una consistencia inferior a 105 mm, ya que a partir de esta medida el mortero de albañilería no se puede trabajar. Las Fig. 3.15-3.18 muestran la evolución de la consistencia con el tiempo para los morteros de la Familia-1 y Familia-2.

En la Familia-1, los aditivos aireante-plastificante y aireante-retenedor (tipo 1 y 2) y el aditivo retardante-plastificante (tipo 3) mantienen la consistencia del mortero por encima de 105 mm más tiempo que el mortero de referencia, lo cual es positivo. Sin embargo, en el caso del aditivo superplastificante (tipo 4) se ve claramente como la consistencia con respecto al tiempo cae muy rápido (endurece rápidamente), lo cual puede limitar su uso, sobre todo en el caso del AR donde a los 30 minutos, la mezcla alcanza una consistencia con valores inferiores a 105mm, lo que provocará una gran pérdida de trabajabilidad en comparación con el de referencia.

Comparando la Fig. 3.15 y 3.16, observamos cómo los morteros hechos con AN mantienen una consistencia superior a 105 mm durante más tiempo. En los morteros hechos sin aditivos, la consistencia de 105 mm se alcanza a los 135 y 90 min respectivamente (MSII vs MRII).

El uso de aditivos superplastificantes, ya sean sólidos o líquidos, incrementan la fluidez de los morteros (Toledano y col., 2103) y reducen

la relación a/c. Esto concuerda con los resultados obtenidos en este trabajo. Sin embargo, el uso de áridos secos (humedad de laboratorio), no humectados previamente y la menor relación a/c efectiva de los morteros hechos con el aditivo 4 (MSII4 y MRII4) justifican la evolución negativa de la consistencia de estos morteros. Este hecho, es especialmente evidente cuando se utilizan AR, ya que estos AR compiten por el agua de amasado y resecan el mortero prematuramente.

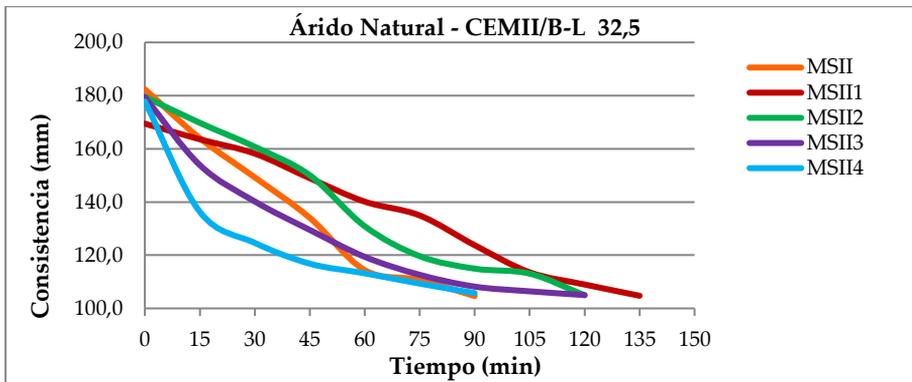


Figura 3.15: Evaluación de la consistencia con el tiempo del Árido Natural.

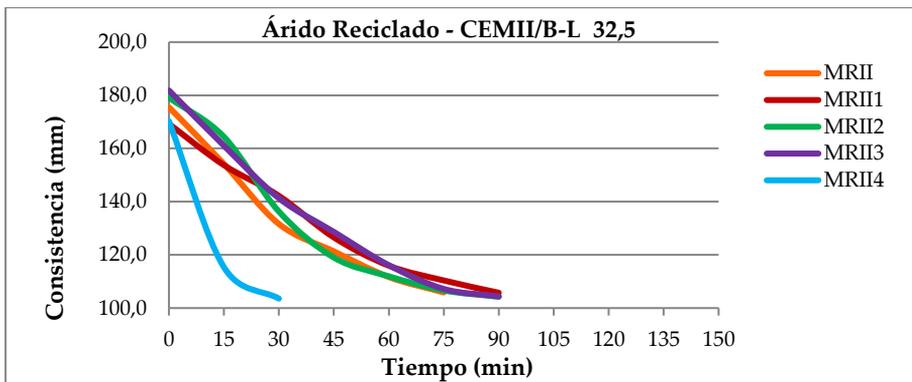


Figura 3.16: Evolución de la consistencia con el tiempo del Árido Reciclado.

En la Familia-2, los resultados son comparables a los obtenidos en la Familia-1. Los aditivos tipo 1 (aireante-plastificante) mantiene la consistencia más fluida que la del mortero de referencia, mientras que los aditivos tipo 2 (aireante-retenedor) y tipo 3 (retardante-plastificante)

también la mantienen ligeramente superior. Sólo el aditivo tipo 4 (superplastificante) la perjudica, pero en menor medida que los morteros hechos con CEM-II. En la Fig. 3.18 se observa que el tiempo de consistencia fluida del mortero hecho con AR es más del doble en comparación con el homólogo de la figura 3.16 (MRIV4 vs MRIV4). En cuanto al uso de áridos reciclados, la tendencia es similar a la Familia-1, el uso de AR reseca rápidamente la muestra de mortero.

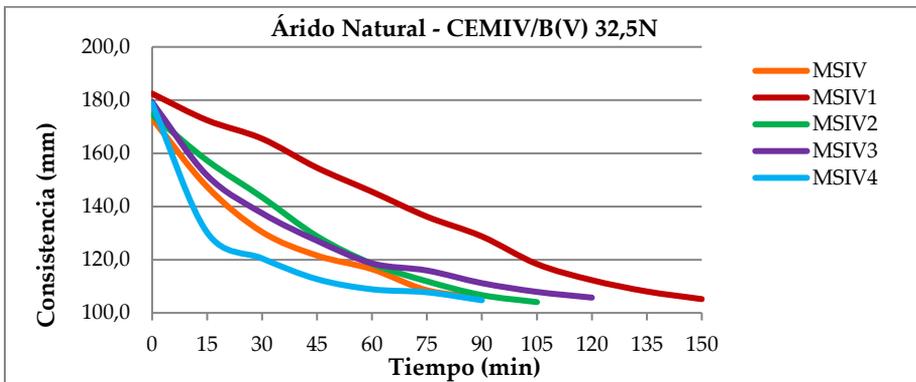


Figura 3.17: Evolución de la consistencia con el tiempo del Árido Natural.

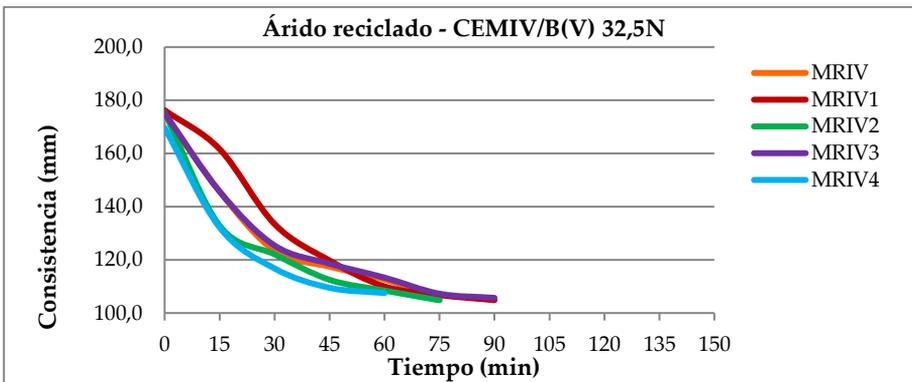


Figura 3.18: Evolución de la consistencia con el tiempo del Árido Reciclado.

3.6.2. Tiempo de trabajabilidad

Las Tablas 3.7 y 3.8 muestran para cada una de las familias de mortero el valor medio de trabajabilidad (UNE-EN 1015-9: 2000), la

desviación estándar de las cuatro repeticiones y los incrementos/decrementos con respecto al mortero de referencia.

El efecto de los aditivos aireante-plastificante, aireante-retenedor (tipo 1 y 2) y el retardante-plastificante (tipo 3) aumentan el tiempo de trabajabilidad de los morteros, tanto en la Familia-1 como en la Familia-2, siendo el aditivo 3 el que produce un mayor incremento en el tiempo de trabajabilidad. Por el contrario, el aditivo 4 es el que menor tiempo de trabajabilidad presenta, esto puede justificarse por la baja relación a/c efectiva de los morteros hechos con el aditivo 4 con respecto a su mortero de referencia (0,55 en MSII4 frente a 0,75 en MSII) en morteros hechos con AN y (0,72 en MRII4 frente a 1,06 en MRII) en morteros hechos con AR.

El uso de AR disminuye considerablemente el tiempo de trabajabilidad. Ledesma y col. (2015, 2016) mostraron que el uso de áridos reciclados de RCD disminuye la trabajabilidad de los morteros de manera lineal al porcentaje de sustitución. Los resultados concuerdan con la evolución de la consistencia con el tiempo. Los malos resultados que ha mostrado el uso del aditivo superplastificantes podrían haberse mejorado pre-saturando previamente los áridos reciclados. Esto se debe mostrar en futuras investigaciones.

En la Familia-1 el uso de AR disminuye la efectividad de los aditivos, lo cual se aprecia en la Tabla 3.7, por los menores valores de los incrementos del tiempo de trabajabilidad con respecto a su mortero de referencia. La pérdida de efectividad del AR para mejorar la trabajabilidad es debido principalmente a dos factores: el uso de AR secos con mayor absorción de agua que los AN (4,025% AR frente a 0,385% AN) y la mayor superficie específica de los AR que perjudica la efectividad de los aditivos (Cartuxo y col., 2016). La trabajabilidad es una de las propiedades limitantes para el uso de AR (Ledesma y col., 2015, 2016).

Los morteros hechos con AR y aditivo aireante-superplastificante (aditivo-1) y aditivo retardante-plastificante (aditivo-3) (MRII1 y MRII3) mejoran el tiempo de trabajabilidad del mortero de referencia hecho sin aditivo y AN (MSII), lo que demuestra la utilidad de este tipo de aditivos para mejorar esta propiedad limitante del uso de AR en morteros.

En el caso de usar CEM-IV (Tabla 3.8), la tendencia es la misma que lo comentado anteriormente con el CEM-II (Tabla 3.7), los aditivos se comportan de la misma manera y los áridos también. La trabajabilidad de los morteros de la familia 2 (CEM-IV) es menor que la trabajabilidad de los morteros de la familia 1 (CEM-II), posiblemente porque necesitaron menos agua de amasado para conseguir la consistencia inicial de los morteros, tendencia que se observa en todas las mezclas, excepto en las hechas con AR y aditivo-3 (retardante-plastificante) y aditivo-4 (superplastificante).

En la Familia-2 el uso de AR disminuye considerablemente la trabajabilidad de los morteros (Tabla 3.8), sin embargo, la efectividad de los aditivos, medida a partir del porcentaje de incremento, es superior a la de la Familia-1 (Tabla 3.7). Esto puede estar justificado por la menor cantidad de cemento CEM-IV utilizado y/o los valores tan bajos en el tiempo de trabajabilidad del mortero de referencia hecho con AR y sin aditivo (MRIV) que es de tan sólo 23 min. Hay que destacar que la trabajabilidad el mortero hecho con AR y aditivo retardante-plastificante (MRIV3) presenta una trabajabilidad superior al mortero de referencia hecho sin aditivo y AN (MSIV).

Estos resultados coinciden con los obtenidos por de Oliveira y col. (2015), quienes utilizando dos aditivos aireantes y áridos con diferente granulometría, llegaron a la conclusión de que el uso de aireantes es una buena opción para mejorar la trabajabilidad de los morteros, aunque el uso de este aditivo ha de hacerse de forma cuidadosa ya que el resto de las propiedades del mortero son muy sensible al volumen de aire incorporado.

Tabla 3.7: Tiempo de trabajabilidad del mortero fresco.

CEM II/ B-L 32,5							
AN	Media (min)	Δ (%)	SD	AR	Media (min)	Δ (%)	SD
MSII	153	0	9	MRII	87	0	3
MSII1	338	121	19	MRII1	181	108	14
MSII2	263	72	4	MRII2	111	28	6
MSII3	495	224	11	MRII3	191	120	9
MSII4	95	-38	8	MRII4	24	-72	4

Tabla 3.8: Tiempo de trabajabilidad del mortero fresco.

CEM IV/B (V) 32,5N							
AN	Media (min)	Δ (%)	SD	AR	Media (min)	Δ (%)	SD
MSIV	94	0,00	7	MRIV	23	0,00	4
MSIV1	245	160,64	10	MRIV1	74	221,74	6
MSIV2	209	122,34	6	MRIV2	53	130,43	5
MSIV3	345	267,02	12	MRIV3	119	417,39	8
MSIV4	54	-42,55	1	MRIV4	6	-73,91	10

3.6.3. Densidad del mortero fresco

Las Tablas 3.9 y 3.10 muestran para cada una de las familias de mortero el valor medio de densidad del mortero fresco (UNE-EN 1015-6:1998), la desviación estándar de las cuatro repeticiones y los incrementos/decrementos con respecto al mortero de referencia (sin aditivos).

En las dos familias de morteros el efecto de los aditivos aireante-plastificante y aireante-retenedor (tipo 1 y 2) y el retardante-plastificante (tipo 3) disminuyen la densidad de los morteros frescos. Seabra y col. (2009) en su estudio constataron que los aditivos aireantes actúan físicamente mediante la incorporación de microporos de aire distribuidos uniformemente en el mortero, lo que conlleva a una disminución de la densidad del mortero fresco. El aditivo 4

(superplastificante) no afecta negativamente a la densidad del mortero fresco, incluso aumenta ligeramente su valor.

Tanto en la Familia-1 como en la Familia-2 el uso de AR si afecta significativamente a la densidad de los morteros. Esto está justificado por la menor densidad del AR (Jiménez y col., 2013). Sin embargo, el uso de AR no afecta significativamente a los porcentajes de variación de densidad de los morteros hechos con aditivos con respecto a los hechos sin aditivos para cada una de las familias y series de morteros.

Tabla 3.9: Densidad del mortero fresco.

CEM II/ B-L 32,5							
AN	Media (gr/cm³)	Δ (%)	SD	AR	Media (gr/cm³)	Δ (%)	SD
MSII	2,22	0,00	0,01	MRII	2,01	0,00	0,01
MSII1	1,67	-25,07	0,06	MRII1	1,59	-20,90	0,04
MSII2	1,89	-15,13	0,05	MRII2	1,65	-17,71	0,03
MSII3	2,08	-6,59	0,02	MRII3	1,83	-8,75	0,03
MSII4	2,26	1,85	0,02	MRII4	2,02	0,59	0,03

Tabla 3.10: Densidad del mortero fresco.

CEM IV/B (V) 32,5N							
AN	Media (gr/cm³)	Δ (%)	SD	AR	Media (gr/cm³)	Δ (%)	SD
MSIV	2,20	0,00	0,02	MRIV	2,03	0,00	0,03
MSIV1	1,80	-18,43	0,01	MRIV1	1,64	-19,29	0,02
MSIV2	1,95	-11,45	0,01	MRIV2	1,75	-13,88	0,02
MSIV3	2,12	-3,73	0,03	MRIV3	1,96	-3,19	0,04
MSIV4	2,23	1,26	0,1	MRIV4	2,05	1,10	0,02

3.6.4. Densidad del mortero endurecido

Las Tablas 3.11 y 3.12 muestran para cada una de las familias de mortero el valor medio de densidad del mortero seco a 28 días de edad (UNE-EN 1015-10: 1999), la desviación estándar de las cuatro repeticiones y los incrementos/decrementos con respecto al mortero de referencia (sin aditivos).

En el caso de la densidad del mortero endurecido se observa una tendencia similar a la densidad del mortero fresco, el efecto de los aditivos aireante-plasticante y aireante-retenedor (tipo 1 y 2) y el retardante-plasticante (tipo 3) disminuyen la densidad del mortero fresco, mientras que el aditivo superplasticante (tipo 4) la aumenta ligeramente. Como ya se ha puesto de manifiesto en trabajos previos (Jiménez y col., 2013; Ledesma y col., 2014, 2015, 2016) el uso de AR disminuye la densidad de los morteros.

En la Familia-1, el uso de AR disminuye la densidad de los morteros endurecidos (Tabla 3.11), sin embargo, no afecta significativamente a los porcentajes de variación. En el caso de la Familia-2 se observa la misma tendencia.

Tabla 3.11: Densidad del mortero seco (CEM II).

CEM II /B-L 32,5N								
	AN	Media(gr/cm ³)	Δ (%)	SD	AR	Media(gr/cm ³)	Δ (%)	SD
28 DIAS	MSII	2,07	0,00	0,02	MRII	1,70	0,00	0,01
	MSII1	1,58	-23,56	0,03	MRII1	1,35	-20,50	0,03
	MSII2	1,81	-12,39	0,03	MRII2	1,40	-17,67	0,06
	MSII3	1,97	-4,73	0,02	MRII3	1,64	-3,86	0,02
	MSII4	2,14	3,53	0,02	MRII4	1,75	2,48	0,01

Tabla 3.12: Densidad del mortero seco (CEMIV).

CEM IV/B(V) 32,5N								
	AN	Media(gr/cm ³)	Δ (%)	SD	AR	Media(gr/cm ³)	Δ (%)	SD
28 DIAS	MSIV	2,09	0,00	0,02	MRIV	1,77	0,00	0,01
	MSIV1	1,46	-29,78	0,01	MRIV1	1,43	-19,05	0,02
	MSIV2	1,65	-20,70	0,01	MRIV2	1,51	-14,62	0,02
	MSIV3	1,90	-8,71	0,02	MRIV3	1,74	-1,67	0,01
	MSIV4	2,10	0,88	0,03	MRIV4	1,77	0,21	0,01

3.6.5. Resistencia a compresión

Las Tablas 3.13 y 3.14 muestran para cada una de las familias de mortero el valor medio de la resistencia a compresión a 28 y 180 días de edad (UNE-EN 1015-11: 1999), la desviación estándar de las cuatro repeticiones y los incrementos/decrementos con respecto al mortero de referencia (sin aditivos).

En las dos familias de morteros, los aditivos aireante-plastificante y aireante-retenedor (aditivo 1 y 2) disminuyen considerablemente la resistencia a compresión de los morteros. Seabra y col (2009) también obtuvieron caídas de resistencia mecánica con el uso de aditivos aireantes. Estas caídas de resistencia limitarían el uso de este tipo de aditivos para morteros de albañilería. Se debería completar la batería de ensayos utilizando dosis más pequeñas de aditivos aireantes, ya que mejoran otras propiedades como la trabajabilidad, pero afectan negativamente a la densidad y resistencia mecánica.

El uso del aditivo retardante-plastificante (aditivo 3) mejora ligeramente la resistencia a compresión con respecto al mortero hecho sin aditivo (MSII3 vs MSII, MRII3 vs MRII, MSIV3 vs MSIV, MRIV3 vs MRIV) a 28 y 180 días, lo que hace de este aditivo una excelente alternativa, ya que mejora otras propiedades como la menor relación a/c y aumento de trabajabilidad.

El aditivo superplastificante (aditivo 4) mejora considerablemente la resistencia mecánica de los morteros de referencia. En base a los resultados obtenidos no podemos afirmar que el uso de AR perjudique a la eficacia del aditivo utilizado, sino que los efectos del aditivo 4 son más acusados en los morteros hechos con AR, es decir, la mejora de resistencia a compresión derivadas del uso del aditivo 4 son más acusadas en los morteros hechos con AR. Esta afirmación es válida tanto para los morteros de la Familia 1 y 2.

El aumento de la resistencia mecánica en hormigones hechos con AR y aditivos ya ha sido puesto de manifiesto por otros autores (Thaczewska, 2014; Barbudo y col., 2013, Cartuxo y col., 2015, 2016). Sin embargo, estos resultados contrastan con los presentados por Pereira y col. (2012) y Cartuxo y col. (2015) que mostraron que el efecto del superplastificante en la resistencia a compresión era más visible cuanto menor era la incorporación de AR en la mezcla de hormigones. Saidi y col (2016) obtuvieron también notables incrementos de la resistencia mecánica de morteros hechos con áridos reciclados obtenidos a partir de residuos de ladrillos refractarios con alto contenido de zirconia.

La evolución de la resistencia a compresión de 28 a 180 días no presenta resultados anómalos, por lo que el uso de los aditivos ensayados no afecta a la evolución de las resistencias mecánicas de los morteros.

En nuestro caso la utilización del aditivo 3 (retardante-plastificante) sería lo más recomendable, ya que resolvemos el problema de trabajabilidad y mantenemos las resistencias e incluso llegan a aumentar ligeramente.

Tabla 3.13: Resistencia a compresión 28 y 180 días.

		CEMII/B-L 32,5N							
		AN	Media (Mpa)	Δ (%)	SD	AR	Media (Mpa)	Δ (%)	SD
28 DIAS	MSII		21,0	0,0	1,1	MRII	9,8	0,0	0,6
	MSII1		4,7	-77,5	0,6	MRII1	3,5	-64,3	0,9
	MSII2		9,0	-57,4	0,6	MRII2	3,1	-67,9	0,6
	MSII3		23,2	10,5	2,2	MRII3	10,1	3,8	1,6
	MSII4		36,3	72,8	2,1	MRII4	19,4	99,1	1,2
180DIAS	MSII		22,7	0,0	2,3	MRII	10,2	0,0	0,7
	MSII1		5,6	-75,3	0,7	MRII1	3,6	-64,5	0,9
	MSII2		12,1	-46,6	1,2	MRII2	3,4	-66,6	0,8
	MSII3		24,4	7,6	1,8	MRII3	10,3	1,6	1,3
	MSII4		39,1	71,9	1,7	MRII4	19,8	95,2	0,9

En la Tabla 3.14 se observa que los morteros fabricados con CEM IV (Familia-2) alcanzan menores resistencias que los fabricados con CEM II (Familia-1), este es debido al sistema de dosificación volumétrica y a la menor cantidad de cemento y Clinker empleado en los morteros de la Familia-2 (Tabla 3.6). En los morteros fabricados con AN el tipo de cemento afecta más que en los morteros fabricados con AR.

Tabla 3.14: Resistencia a compresión 28 y 180 días.

		CEM IV/B(V) 32,5N							
		AN	Media(Mpa)	Δ (%)	SD	AR	Media(Mpa)	Δ (%)	SD
28 DIAS	MSIV		14,1	0,0	0,7	MRIV	6,01	0,0	0,6
	MSIV1		4,3	-69,4	0,3	MRIV1	2,32	-61,4	0,3
	MSIV2		4,6	-67,0	0,5	MRIV2	2,96	-50,8	0,3
	MSIV3		16,7	18,4	0,5	MRIV3	6,39	6,4	0,7
	MSIV4		23,2	64,4	2,0	MRIV4	16,96	182,4	1,6
180DIAS	MSIV		17,1	0,0	1,0	MRIV	7,01	0,0	0,7
	MSIV1		5,7	-66,5	0,3	MRIV1	2,46	-64,9	0,4
	MSIV2		6,0	-65,0	0,6	MRIV2	3,58	-48,9	0,4
	MSIV3		19,2	12,6	0,5	MRIV3	7,25	3,5	0,7
	MSIV4		29,8	74,9	0,9	MRIV4	17,25	146,1	0,8

Para cada una de las familias de mortero y tipo de árido empleado, existe una relación aproximadamente lineal entre la resistencia a compresión a 28 días y la densidad del mortero seco. Las Fig. 3.19 y 3.20 muestran esta relación entre ambas propiedades a 28 días de edad.

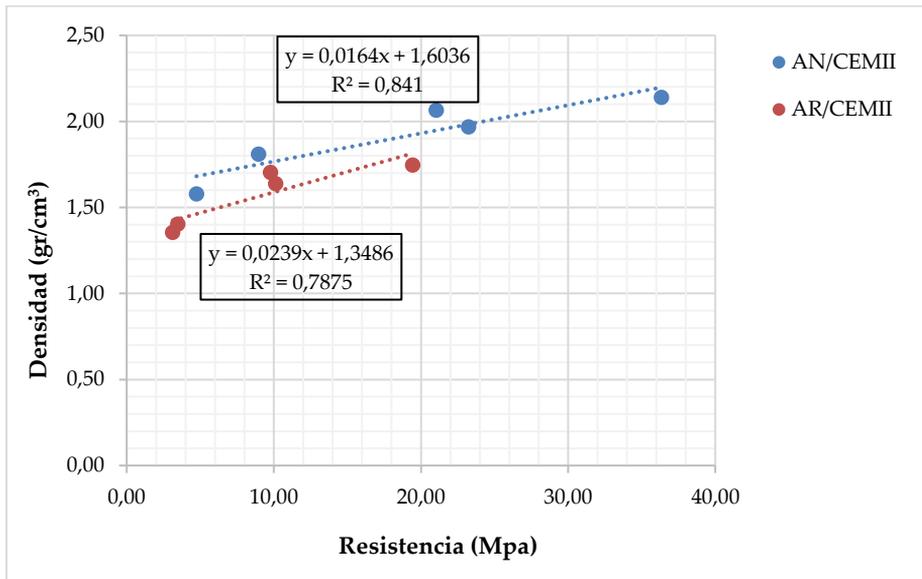


Figura 3.19: Relación entre densidad seca y resistencia a compresión a 28 días (CEM II).

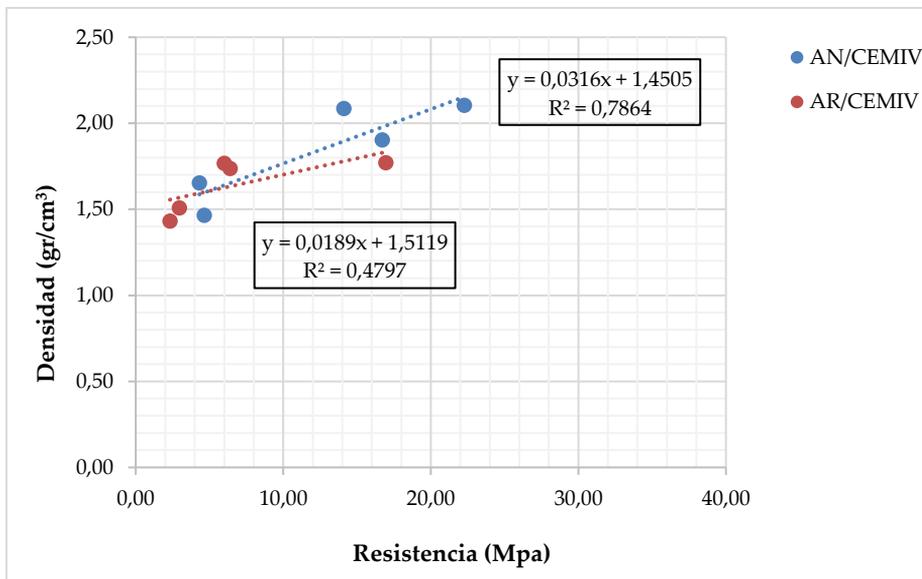


Figura 3.20: Relación entre densidad seca y resistencia a compresión a 28 días (CEM IV).

3.6.6. Absorción de agua por inmersión

Las Tablas 3.15 y 3.16 muestran para cada una de las familias de mortero el valor medio de la absorción de agua por inmersión a los 28 días de edad (UNE-EN 1015-18: 2002), la desviación estándar de las cuatro repeticiones y los incrementos/decrementos con respecto a los morteros de referencia (sin aditivos).

En las dos familias de morteros, comparando con los morteros de referencia (sin aditivos), los aditivos aireante-plastificante y aireante-retenedor (aditivos 1 y 2) aumentaron considerablemente la absorción de agua por inmersión. El aditivo retardante-plastificante (aditivo 3) aumentó ligeramente la absorción de agua por inmersión, y el aditivo superplastificante (aditivo 4) disminuyó la absorción de agua por inmersión. Estos resultados están relacionados con la porosidad de las probetas (densidad del mortero endurecido), la cual a su vez está relacionada con la incorporación de aire en la mezcla que producen los aditivos aireantes, la relación a/c de la mezcla y el uso de áridos reciclados que son más porosos.

Los resultados obtenidos con el uso del superplastificante coinciden con los obtenidos por Cartuxo y col. (2016) quienes estudiaron la influencia que tenían dos tipos de superplastificantes (uno regular y otro de alto rendimiento) sobre las propiedades de durabilidad de un hormigón fabricado con arena reciclada de hormigón. Estos autores observaron que la absorción de agua por inmersión aumenta linealmente con el porcentaje de sustitución de AN por arena reciclada de hormigón.

En la Familia-1 y Familia-2 el efecto de los aditivos es menor en los morteros hechos con AR (Tabla 3.15 y 3.16), ya que los incrementos de absorción de agua por inmersión con respecto a sus morteros de referencia son menores, excepto en el mortero hecho con aireante-retenedor que son mayores.

Con respecto al tipo de cemento empleado no se aprecian grandes cambios en los resultados, podría decirse que el tipo de cemento no sería un factor determinante en este caso.

Tabla 3.15: Absorción de agua por inmersión (CEM II).

CEM II/ B-L 32,5							
AN	Media (%)	Δ (%)	SD	AR	Media (%)	Δ (%)	SD
MSII	8,53	0,00	0,01	MRII	14,84	0,00	0,03
MSII1	19,50	128,64	0,01	MRII1	19,12	28,87	0,02
MSII2	13,37	56,84	0,02	MRII2	24,01	61,86	0,02
MSII3	11,39	33,61	0,03	MRII3	15,87	6,97	0,03
MSII4	6,34	-25,64	0,04	MRII4	12,66	-14,64	0,02

Tabla 3.16: Absorción de agua por inmersión (CEM IV).

CEM IV/B (V) 32,5N							
AN	Media (%)	Δ (%)	SD	AR	Media (%)	Δ (%)	SD
MSIV	8,18	0,00	0,04	MRIV	14,37	0,00	0,05
MSIV1	17,50	114,02	0,02	MRIV1	20,86	45,20	0,02
MSIV2	11,18	36,80	0,01	MRIV2	20,94	45,73	0,03
MSIV3	8,85	8,27	0,03	MRIV3	14,91	3,82	0,01
MSIV4	6,40	-21,77	0,01	MRIV4	12,59	-12,39	0,04

3.6.7. Absorción de agua por capilaridad

Las Tablas 3.17 y 3.18 muestran para cada una de las familias de mortero el valor medio de la absorción de agua por capilaridad a los 90 min (UNE-EN 1015-18: 2002), la desviación estándar de las cuatro repeticiones y los incrementos/decrementos con respecto a los morteros de referencia (sin aditivos).

En los morteros de la Familia-1 hechos con AN (Tabla 3.17), se observa que el uso del aditivo aireante-retenedor (aditivo 2) es el que mayor coeficiente de absorción por capilaridad presenta, el aditivo aireante-plastificante (aditivo 1) y retardante-plastificante (aditivo 3)

presentan un coeficiente de absorción muy similares entre sí, y menor que el mortero de referencia (sin aditivo). Estos resultados están relacionados con el tipo de poro de los morteros, así el mortero MSII2 posiblemente tenga un tamaño de poro que favorezca los fenómenos de capilaridad. Los morteros fabricados con el aditivo superplastificante (aditivo 4) son los que presentan un coeficiente de absorción más bajo. Como era de esperar los valores de absorción de agua son mayores en el caso de morteros fabricados con árido reciclado, por la mayor porosidad del AR. Los resultados obtenidos no guardan relación directa con los obtenidos en la absorción de agua por inmersión, excepto en el aditivo 4 que presenta la menor absorción de agua por inmersión y por capilaridad.

La Familia-2 muestra unos valores similares (Tabla 3.18), por lo que el tipo de cemento no tiene influencia en esta propiedad.

Tabla 3.17: Absorción de agua por capilaridad 90 min.

CEM II/ B-L 32,5							
AN	Media (g/mm ²)	Δ (%)	SD	AR	Media (g/mm ²)	Δ (%)	SD
MSII	0,34	0,00	0,01	MRII	0,68	0,00	0,04
MSII1	0,23	-33,85	0,02	MRII1	0,52	-23,56	0,02
MSII2	0,46	34,68	0,02	MRII2	0,61	-11,12	0,01
MSII3	0,24	-29,63	0,01	MRII3	0,56	-18,94	0,03
MSII4	0,11	-68,29	0,00	MRII4	0,18	-73,81	0,01

Tabla 3.18: Coeficiente de absorción de agua por capilaridad 90min.

CEM IV/ B (V) 32,5N							
AN	Media (g/mm ²)	Δ (%)	SD	AR	Media (g/mm ²)	Δ (%)	SD
MSIV	0,43	0,00	0,01	MRIV	0,66	0,00	0,02
MSIV1	0,25	-40,52	0,01	MRIV1	0,58	-12,09	0,02
MSIV2	0,58	36,30	0,02	MRIV2	0,64	-3,44	0,01
MSIV3	0,34	-20,13	0,01	MRIV3	0,54	-19,19	0,01
MSIV4	0,18	-57,56	0,01	MRIV4	0,27	-59,79	0,01

La evolución en el tiempo de la absorción de agua por capilaridad de los 20 tipos de morteros se muestra en las Fig.3. 21, 3.22, 3.23 y 3.24. Estos gráficos representan los resultados obtenidos para cada tipo de mortero y la función de ajuste determinada por Hall's (1989)

$$W= A+S*t^{1/2}-C*t$$

Donde W es la absorción de agua por capilaridad, t es el tiempo, S es la sorptivity, y A y C son constantes. Evangelista y Brito (2010) y Cartuxo y col. (2016) observaron que la absorción de agua por capilaridad se ajusta bastante bien al modelo de Halls.

La Tabla 3.19 muestra los parámetros de ajuste (A, C, S) del modelo de Halls y coeficiente de ajuste obtenido, el cual es bastante elevado, de ahí que el modelo de Halls explique muy bien la evolución de la absorción de agua por capilaridad.

En las Fig. 3.21-3.24 se observa que en los morteros hechos con el aditivo 2 (aireante-retenedor) a partir de las 48 horas no se absorbe más agua por capilaridad, lo cual puede estar justificado por su estructura porosa.

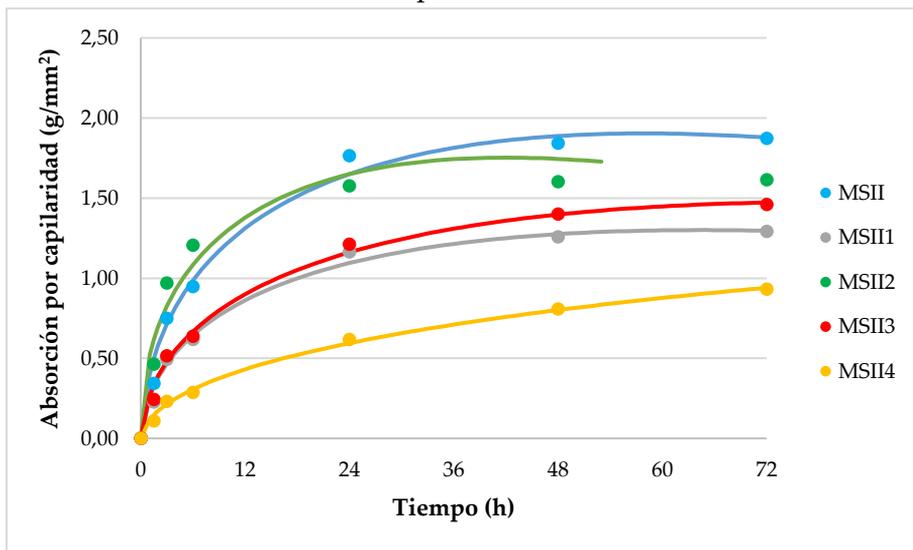


Figura 3.21: Absorción de agua por capilaridad en el tiempo de la familia MSII.

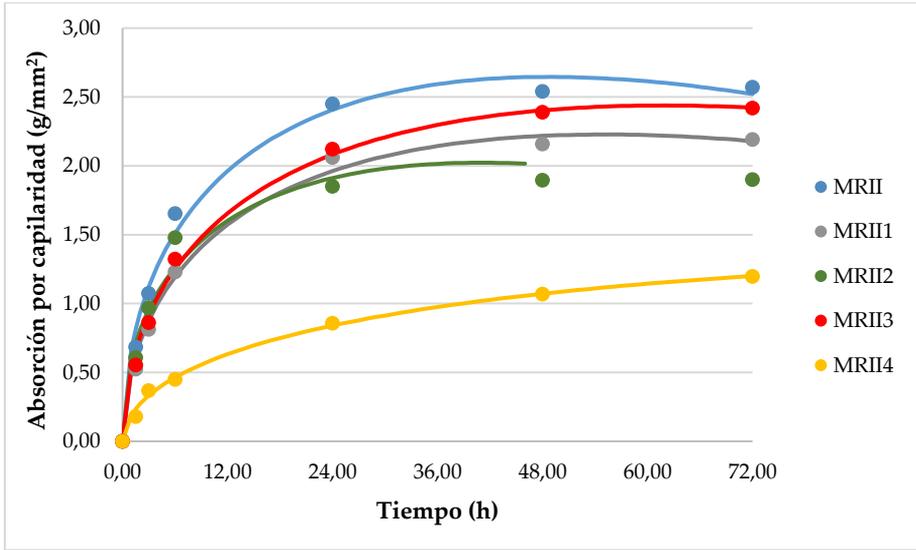


Figura 3.22: Absorción de agua por capilaridad en el tiempo de la familia MR II.

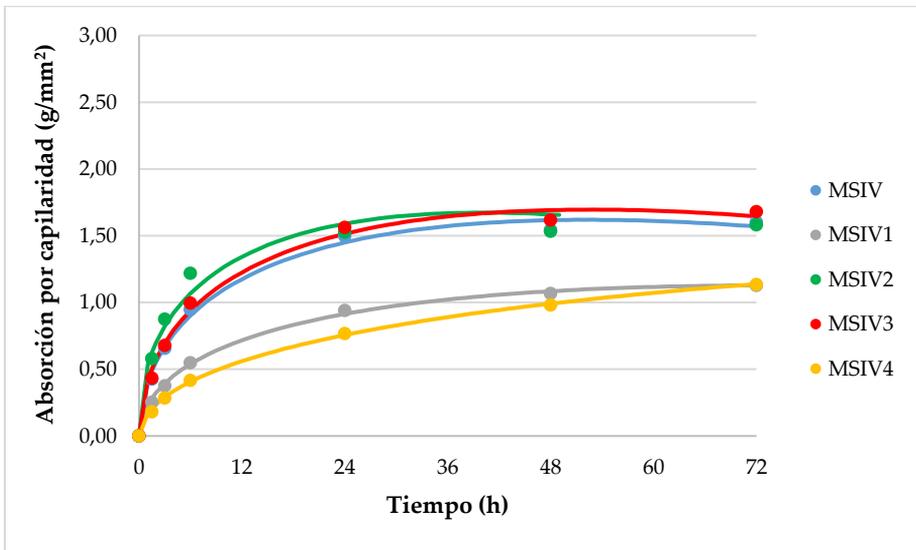


Figura 3.23: Absorción de agua por capilaridad en el tiempo de la familia MS IV.

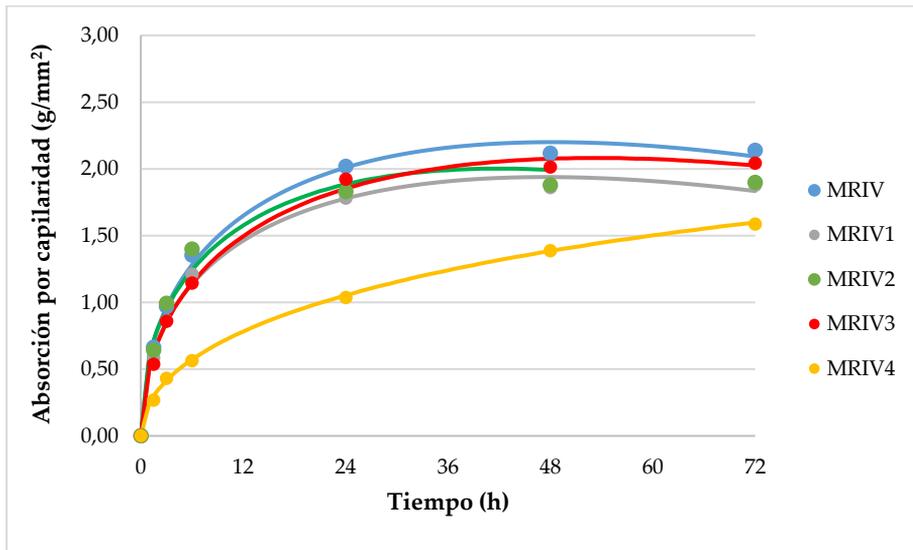


Figura 3.24: Absorción de agua por capilaridad en el tiempo de la familia MRIV.

En las Fig. 3.21-3.24 se ve claramente como los morteros fabricados con superplastificante (aditivo 4) son los que presentan menor capacidad de absorción de agua por capilaridad, lo cual puede estar justificado por su mayor densidad y poros no intercomunicados. Además, también se observa como en todos los casos los morteros a los que se les incorporó AR, la capacidad de absorción se incrementó. Estos resultados están de acuerdo con los obtenidos por Evangelista y Brito (2010) y Cartuxo y col. (2016), quienes concluyeron que la absorción de agua por capilaridad en hormigones aumentaba al incrementar el uso de arena reciclada de hormigón.

Tabla 3.19: Parámetros de ajuste del modelo de capilaridad de Halls.

	A	C	S	ΔS (%)	R2
MSII	-0,0911	0,0344	0,5239	0,00	0,9867
MSII_1	-0,0579	0,0211	0,3386	-35,37	0,9881
MSII_2	0,0270	0,0410	0,5320	1,55	0,9655
MSII_3	-0,0540	0,0190	0,3411	-34,89	0,9918
MSII_4	-0,0235	0,0035	0,1433	-72,65	0,9958
MRII	-0,0491	0,0553	0,7721	0,00	0,9908
MRII_1	-0,0771	0,0419	0,6215	-19,51	0,9927
MRII_2	0,0234	0,0487	0,6241	-19,17	0,9745
MRII_3	-0,0657	0,0405	0,6369	-17,51	0,9957
MRII_4	-0,0212	0,0089	0,2194	-71,58	0,9959
MSIV	-0,0238	0,0315	0,4550	0,00	0,9935
MSIV_1	-0,0225	0,0155	0,2671	-41,30	0,9977
MSIV_2	0,0625	0,0401	0,5082	11,69	0,9716
MSIV_3	-0,0295	0,0328	0,4757	4,55	0,9928
MSIV_4	-0,0150	0,0060	0,1868	-58,95	0,999
MRIV	0,005	0,0455	0,6321	0,00	0,996
MRIV_1	0,0056	0,0408	0,5617	-11,14	0,9949
MRIV_2	0,0416	0,0466	0,6045	-4,37	0,9825
MRIV_3	-0,039	0,0398	0,581	-8,08	0,9958
MRIV_4	-0,004	0,0073	0,2499	-60,47	0,9993

3.6.8. Retracción

Las Tablas 3.20 y 3.21 muestran para cada una de las familias de mortero el valor medio de la retracción a los 28 días (UNE 83831: 2010), la desviación estándar de las cuatro repeticiones y los incrementos/decrementos con respecto a los morteros de referencia (sin aditivos).

Tanto en la Familia-1 como en la Familia-2, los morteros hechos con AN y aditivos aireante-plastificante y aireante-retenedor (aditivo 1 y 2) presentan una mayor retracción en comparación con sus morteros de

referencia (MSII1 vs MSII, MSII2 vs MSII, MSIV1 vs MSIV, MSIV2 vs MSIV), lo cual está justificado por la menor resistencia mecánica y por tanto, menor resistencia a la deformación por retracción de dichos morteros. No ocurre lo mismo en los morteros hechos con AR, donde el uso de aireante-plastificante y aireante-retenedor (aditivo 1 y 2) disminuye ligeramente la retracción de los morteros con respecto a los de referencia (MRII1 vs MRII, MRII2 vs MRII, MRIV1 vs MRIV, MRIV2 vs MRIV).

En todos los morteros fabricados, el aditivo 3 (retardante-plastificante) y el aditivo 4 (superplastificante) reducen la retracción de los morteros con respecto a los de referencia, lo cual está justificado por su menor relación a/c y la mayor resistencia mecánica que limita la deformación por retracción.

Los morteros hechos con AR retraen más que los morteros hechos con AN, lo cual coincide con lo obtenido en estudios previos (Ledesma y col., 2015; Ledesma y col., 2016). Estos resultados están justificado por la menor resistencia mecánica de los morteros hechos con AR y la mayor cantidad de agua empleada en el amasado que favorece la retracción por secado.

Tabla 3.20: Retracción a 28 días morteros fabricados con CEMII.

CEM II/ B-L 32,5							
AN	Media(mm/m)	Δ (%)	SD	AR	Media(mm/m)	Δ (%)	SD
MSII	-0,77	0,00	0,07	MRII	-1,13	0,00	0,05
MSII1	-0,93	21,32	0,03	MRII1	-1,10	-2,67	0,03
MSII2	-0,84	9,49	0,06	MRII2	-1,11	-1,51	0,05
MSII3	-0,70	-9,15	0,11	MRII3	-1,03	-8,89	0,10
MSII4	-0,60	-21,54	0,06	MRII4	-0,90	-20,00	0,03

Tabla 3.21: Retracción 28 días morteros fabricados con CEM IV.

CEM IV/ B (V) 32,5N							
AN	Media(mm/m)	Δ (%)	SD	AR	Media(mm/m)	Δ (%)	SD
MSIV	-0,50	0,00	0,03	MRIV	-1,33	0,00	0,02
MSIV1	-0,60	21,72	0,06	MRIV1	-1,30	-2,11	0,05
MSIV2	-0,60	20,12	0,10	MRIV2	-1,26	-4,59	0,14
MSIV3	-0,43	-12,62	0,03	MRIV3	-1,18	-11,17	0,06
MSIV4	-0,33	-34,21	0,11	MRIV4	-1,01	-24,15	0,02

Las Fig. 3.25-3.29 muestran por separado la evolución de la retracción para cada tipo de aditivo. La Fig. 3.25 muestra la tendencia de la retracción de los morteros sin aditivo. Como era de esperar, los morteros elaborados con AR son los que mayor retracción presentan (MRII y MRIV). Por otra parte, los morteros fabricados con AN y CEMIV siempre se caracterizan por tener la menor retracción; esta consideración también se aplica a las mezclas con aditivos que se verán a continuación.

No hay una tendencia clara que justifique qué factor tiene mayor influencia en la retracción, si la cantidad de agua empleada en el amasado o la resistencia mecánica. Por ejemplo, la mayor retracción del mortero MSII con respecto al MSIV puede estar justificada por la menor cantidad de agua empleada en el amasado (530 gr en MSII frente a 480 gr en MSIV), aunque las resistencias mecánicas con mayores en MSII que en MSIV (21 MPa en MSII frente a 14,1 en MSIV). Sin embargo, la mayor retracción del mortero MRIV con respecto al MRII no está justificada por la cantidad de agua empleada en el amasado (767 gr en MRIV frente a 858 gr en MRII), en este caso, la mayor retracción vendría condicionada por la menor resistencia mecánica del mortero MRIV (6,01 MPa en MRIV frente a 9,8 MPa en MRII).

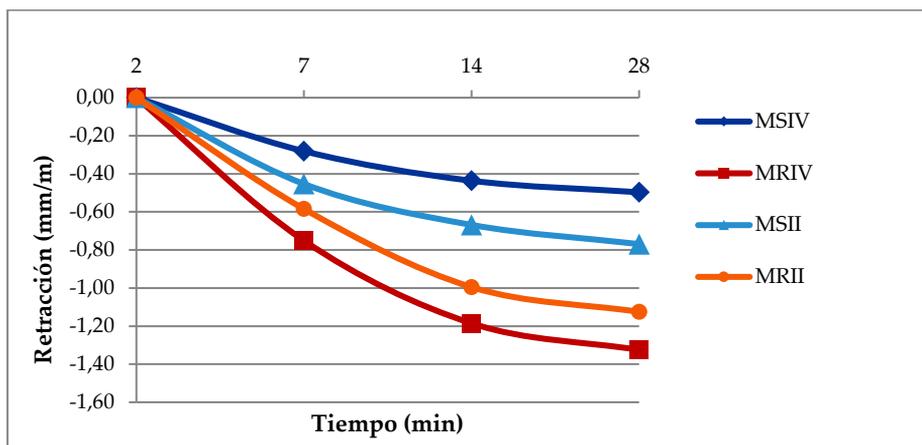


Figura 3.25: Retracción 28 días morteros fabricados sin aditivo.

En la Fig. 3.26 también se observa que los morteros elaborados con AR son los que mayor retracción presentan (MRII1 y MRIV1). Por otra parte, los morteros fabricados con AN y CEMIV (MSIV1) tiene la menor retracción. Comparando las Fig. 3.25 y 3.26 se observa que la adicción del aireante-plastificante (aditivo 1) produce un aumento en la retracción de los morteros fabricados con AN en comparación con el de referencia, sin embargo los morteros fabricados con AR se comportan mejor que los de referencia sin aditivo.

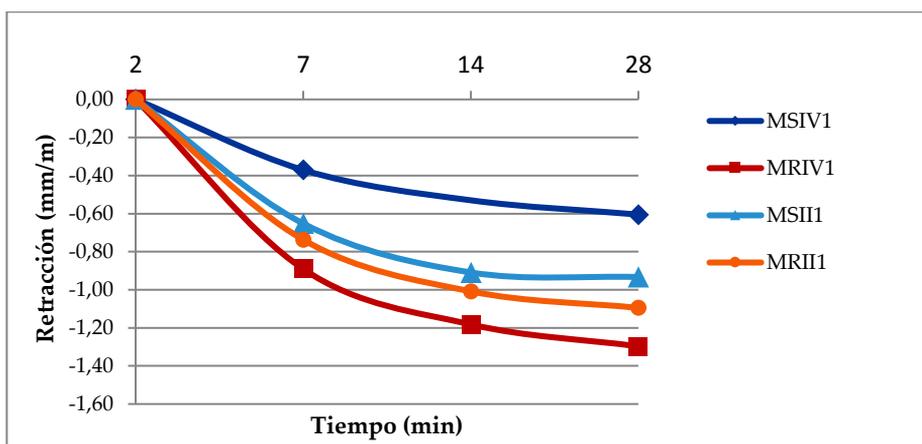


Figura 3.26: Retracción 28 días morteros fabricados con aditivo 1 (aireante-plastificante).

En la Fig. 3.27 se observa una tendencia similar a la Fig. 3.25 y 3.26, los morteros elaborados con AR son los que mayor retracción presentan (MRII2 y MRIV2). Por otra parte, los morteros fabricados con AN y CEMIV (MSIV2) tiene la menor retracción. Comparando las Fig. 3.25 y 3.27 se observa que la adición de aireante-retenedor se comporta como el aireante-plastificante, aumenta la retracción en los morteros hechos con AN para los morteros hechos con CEM II y CEM IV y disminuye la ligeramente la retracción en los morteros hechos con AR para ambos tipos de morteros.

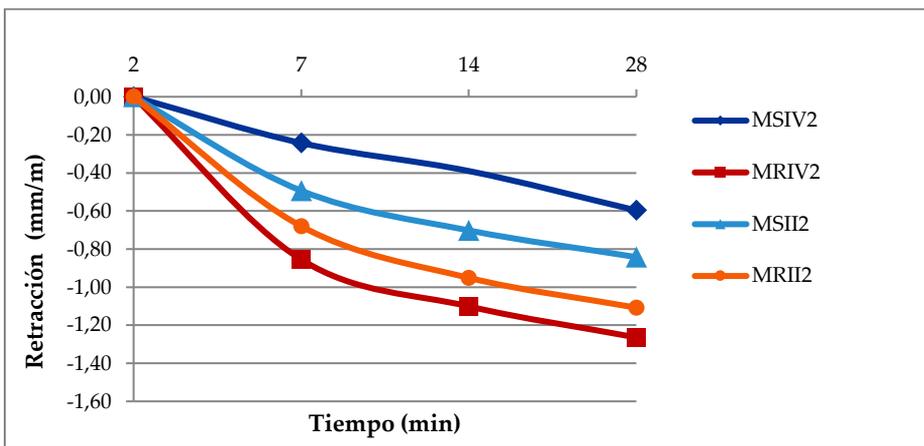


Figura 3.27: Retracción 28 días morteros fabricados con aditivo 2 (aireante-retenedor).

En la Fig. 3.28 también se observa que los morteros elaborados con AR son los que mayor retracción presentan (MRII3 y MRIV3). Por otra parte, los morteros fabricados con AN y CEMIV (MSIV3) tiene la menor retracción. Comparando las Fig. 3.28 y 3.25 se observa que el aditivo retardante-plastificante disminuye la retracción tanto en los morteros hechos con AN como con AR.

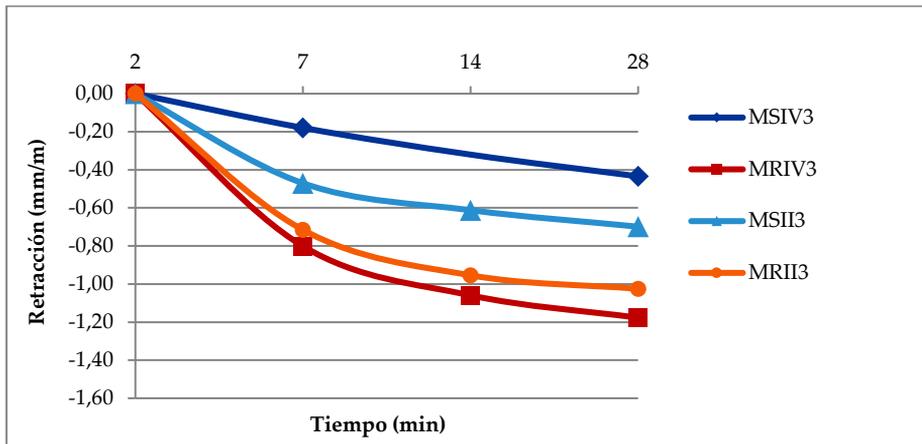


Figura 3.28: Retracción a 28 días morteros fabricados con aditivo 3 (retardante-plastificante).

Los morteros fabricados con superplastificante (Fig. 3.29) son los que presentan menor retracción si lo comparamos con los morteros de referencia. Al igual que en el resto de los morteros, el uso de AR aumenta la retracción (MRII4 y MRIV4). Por otra parte, los morteros fabricados con AN y CEMIV (MSIV4) tiene la menor retracción.

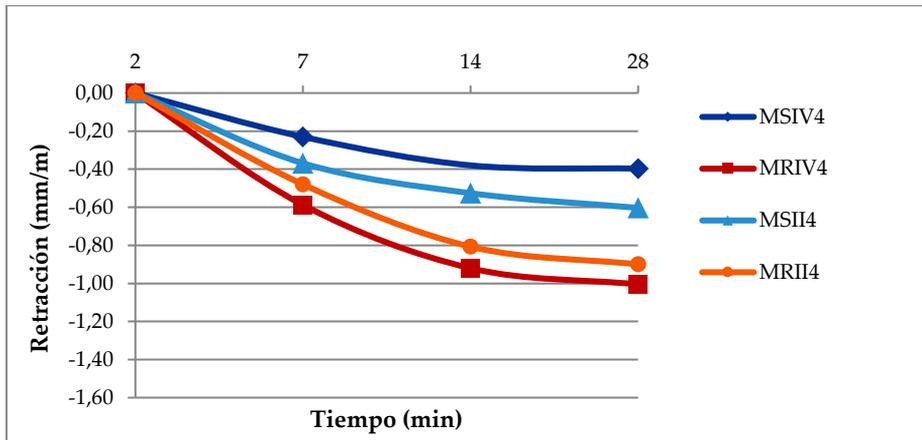


Figura 3.29: Retracción a 28 días morteros fabricados con aditivo 4 (superplastificante).

3.7. Conclusiones

En este capítulo se estudia desde un punto de vista experimental, el efecto de diferentes tipos de aditivos (aireante-plastificante, aireante-retenedor, retardante-plastificante y superplastificante-reductor de agua de alta actividad) sobre las propiedades de morteros hechos con una arena silíceo de referencia (AN) y una arena reciclada mixta de residuos de construcción y demolición (AR). Los ensayos se han llevado a cabo utilizando dos tipos de cemento comerciales: CEM-II/B-L 32,5 N y CEMIV/B (V) 32,5 N. A continuación, se muestran las principales conclusiones obtenidas para cada uno de las propiedades estudiadas.

Relación agua/cemento

Efecto del aditivo: el aditivo aireante-plastificante, retardante-plastificante y superplastificante han sido efectivos para reducir la relación agua/cemento (a/c). El aditivo superplastificante se ha mostrado como el más eficaz, mientras que el aditivo aireante-retenedor usado a la dosis máxima recomendada por el fabricante no permitió reducir la relación a/c empleada.

Efecto del AR: el uso de AR no ha supuesto una pérdida de efectividad del aditivo aireante-plastificante y aireante-retenedor. En el caso del aditivo retardante-plastificante y superplastificante no se observa pérdida de efectividad cuando se utiliza cemento tipo CEM-II, sin embargo, si se observa pérdida de efectividad cuando los AR se emplean con cemento con cenizas volantes CEM-IV.

Efecto del cemento: la efectividad de los aditivos se ve reducida con el uso de cemento puzolánico hecho con cenizas volantes (CEM-IV) en relación al uso de cemento CEM-II, tanto en los morteros hechos con AR como en los morteros hechos con AR.

Evolución de la consistencia con el tiempo:

Efecto del aditivo: para los aditivos aireante-plastificante, aireante-retenedor y retardante-plastificante, la consistencia se mantiene en el tiempo mejor que en el mortero de referencia (sin aditivo) en el caso de morteros hechos con AN o mantienen un comportamiento similar en el caso de morteros hechos con AR. Si embargo el uso de superplastificante produce una pérdida de la consistencia mucho más rápida (pérdida de trabajabilidad del mortero), tanto en los morteros hechos con AN como con AR.

Efecto del AR: la mayor absorción de agua de los AR y su incorporación seca a la mezcla (sin pre-humectación y humedad de laboratorio) provoca una rápida caída de la consistencia con el tiempo, para cualquier tipo de aditivo y mortero. Los AR compiten por el agua de amasado muy rápidamente. Sería conveniente pre-humectar previamente los AR con el uso de superplastificantes para evitar la pérdida de consistencia de los morteros de manera prematura.

Efecto del cemento: el cemento puzolánico (CEM-IV) mantiene mejor la consistencia con el tiempo que el cemento CEM-II, especialmente con el uso de AR, lo cual está relacionado con su menor efectividad a la hora de reducir la relación a/c. A mayor relación a/c inicial, mejor se mantiene la consistencia con respecto al tiempo en los morteros ensayado.

Trabajabilidad:

Efecto del aditivo: los aditivos aireante-plastificante, aireante-retenedor y retardante-plastificante aumentan el tiempo de trabajabilidad en los morteros hechos con AN y AR. El retardante-plastificante es el que mayor tiempo de trabajabilidad consigue. Sin embargo, el uso de superplastificantes disminuye el tiempo de trabajabilidad en todos los morteros, lo cual está relacionado con su

efectividad a la hora de reducir la relación a/c, la menor cantidad de agua empleada en el amasado y el uso de AR no pre-saturados.

Efecto del AR: el uso de AR seco disminuye considerablemente el tiempo de trabajabilidad de los morteros, aunque el uso de aditivos aireante-plastificante y retardante-plastificante se han mostrado eficaces para aumentar la trabajabilidad de los morteros hechos con AR hasta el punto de evitar que esta sea una propiedad limitante de los morteros hechos con AR. El uso de superplastificantes en los morteros con AR secos disminuye drásticamente el tiempo de trabajabilidad y no se considera una alternativa viable porque agrava esta propiedad limitante si utilizamos los AR secos.

Efecto del Cemento: el uso de cemento puzolánico (CEM-IV) disminuye el tiempo de trabajabilidad con respecto al CEM-II, ya que por regla general se necesita menos agua inicial de amasado para conseguir la consistencia deseada que en los morteros hechos con CEM-IV.

Densidad del mortero fresco y endurecido

Efecto del aditivo: los aditivos aireante-plastificante, aireante-retenedor y retardante-plastificante hacen que disminuya la densidad en los morteros hechos con AN y AR tanto en estado fresco como endurecido. Por el contrario, el superplastificante aumenta ligeramente la densidad de los morteros. Los morteros con aditivos aireantes disminuyen más la densidad que el aditivo retardante-plastificante.

Efecto del AR: el uso de AR seco disminuye considerablemente la densidad de los morteros frescos y endurecidos. El efecto de los aditivos sobre la densidad de los morteros no se significativamente alterado por el uso de AN o AR.

Efecto del Cemento: el tipo de cemento no influye de manera significativa sobre la densidad de los morteros frescos ni endurecidos.

Resistencia a compresión:

Efecto del aditivo: los aditivos aireante-plastificante y aireante-retenedor afectan negativamente a la resistencia mecánica de los morteros. El aditivo retardante-plastificante mejora ligeramente la resistencia a compresión del mortero de referencia (sin aditivo). El aditivo superplastificante proporciona las mayores resistencias a compresión a 28 y 180 días.

Efecto del AR: la incorporación de AR afecta negativamente a la resistencia mecánica. La caída de resistencia puede ser compensada con el uso de aditivos superplastificantes y retardadores-plastificantes. El efecto de los aditivos sobre los morteros es similar en morteros hechos con AN y AR.

Efecto del cemento: Los morteros fabricados con CEM-II presentan mejores resistencias que los fabricados con CEM-IV, debido al sistema de dosificación volumétrica empleada en este trabajo.

Absorción de agua por inmersión:

Efecto del aditivo: los aditivos aireante-plastificante y aireante-retenedor son los que mayor absorción de agua por inmersión presentan, con el retardante-plastificante la absorción es similar al de referencia y con el que se consigue una menor absorción de agua por inmersión es con el aditivo superplastificante.

Efecto del AR: los morteros fabricados con AR presentan una mayor absorción de agua por inmersión que los morteros hechos con AN. La influencia de los aditivos en el incremento del valor de absorción de agua por inmersión es menor en los morteros hechos con AR.

Efecto del cemento: el tipo de cemento no influye de manera significativa sobre la absorción de agua por inmersión.

Absorción de agua por capilaridad:

Efecto del aditivo: El aditivo aireante-retenedor incrementa la absorción de agua por capilaridad con respecto a los morteros de referencia hechos sin aditivos. Los aditivos aireante-plastificante y retardante-plastificante presentan un valor de absorción de agua por inmersión ligeramente inferior a los morteros de referencia sin aditivos. Los superplastificantes reducen considerablemente la absorción de agua por inmersión. La absorción de agua por inmersión se ajusta bien a la función de Hall's.

Efecto del AR: el uso de AR incrementa el valor de absorción de agua por capilaridad y no afecta al comportamiento de los aditivos, a excepción del aireante-retenedor que aumenta la absorción de agua por capilaridad en los morteros hechos con AN y disminuye ligeramente en los morteros hechos con AR.

Efecto del cemento: el tipo de cemento no influye de manera significativa sobre la absorción de agua por capilaridad.

Retracción:

Efecto del aditivo: los aditivos aireante-plastificante y aireante-retenedor incrementan la retracción de los morteros. El aditivo retardante-plastificante mejora ligeramente la retracción del mortero de referencia (sin aditivo) y el aditivo superplastificante disminuye considerablemente la retracción de los morteros.

Efecto del AR: el uso de AR incrementa el valor de retracción en los morteros. Los aditivos aireante-plastificante y aireante-retenedor incrementan la retracción en los morteros hechos con AN y disminuyen ligeramente la retracción de los morteros hechos con AR, todo ello medido con respecto a los morteros de referencia (sin aditivos).

Efecto del cemento: con el cemento CEM-IV se consigue una menor retracción que con el CEM-II en los morteros hechos con áridos naturales, lo cual está justificado por la menor cantidad de Clinker y

calor de hidratación de la muestra. Sin embargo, el CEM-IV produce una mayor retracción que el CEM-II en los morteros hechos con AR, lo cual puede estar justificado por la menor resistencia mecánica que se consiguen en los morteros con CEM-IV.

Conclusión y recomendaciones prácticas:

El aditivo aireante-plastificante reduce la cantidad de agua de amasado, mejora la trabajabilidad, reduce la densidad, reducen la resistencia mecánica, aumenta significativamente la absorción de agua por inmersión, reduce ligeramente la absorción de agua por capilaridad e incrementan la retracción de los morteros. Este aditivo en las dosis ensayadas no se considera válido para mejorar las propiedades de los morteros de albañilería hechos con áridos reciclados de RCD.

El aditivo aireante-retenedor no reduce la cantidad de agua de amasado, mejora la trabajabilidad, reduce la densidad, reducen la resistencia mecánica, aumenta significativamente la absorción de agua por inmersión, incrementa la absorción de agua por capilaridad e incrementa la retracción de los morteros. Este aditivo en las dosis ensayadas no se considera válido para mejorar las propiedades de los morteros de albañilería hechos con áridos reciclados de RCD.

El aditivo retardante-plastificante reduce la cantidad de agua de amasado, se muestra muy eficaz para mejorar la trabajabilidad, reduce la densidad, pero en menor medida que los aditivos aireantes, mejora ligeramente la resistencia mecánica, mantiene la absorción de agua por inmersión de los morteros de referencia, reduce ligeramente la absorción de agua por capilaridad y disminuye ligeramente la retracción. Este aditivo en las dosis ensayadas se considera buena opción para mejorar las propiedades de los morteros de albañilería hechos con áridos reciclados de RCD utilizados a humedad ambiente (sin pre-saturación).

El aditivo superplastificante se muestra el más eficaz para reducir la cantidad de agua de amasado, aunque el uso de AR sin humectación

previa reduce mucho el tiempo de trabajabilidad, lo que puede limitar su uso, aumenta significativamente la resistencia mecánica, reduce la absorción de agua por inmersión, reducen significativamente la absorción de agua por inmersión y disminuye la retracción de los morteros. Este aditivo en las dosis ensayadas puede ser una buena opción para mejorar las propiedades de los morteros de albañilería con áridos reciclados de RCD, pero no utilizando los áridos secos a humedad ambiente (sin pre-saturación) ya que afecta negativamente a la trabajabilidad de los morteros.

3.8. Normas usadas en el trabajo experimental

UNE 146507-1. Ensayos de áridos. Determinación de la reactividad potencial de los áridos. Método químico. Parte 1: Determinación de la reactividad álcali-sílice y álcali-silicato. CEN; 1999 EX.

UNE 80103. Métodos de ensayos de cementos. Ensayos físicos. Determinación de la densidad real por la norma de Chatelier. CEN; 2013

UNE 83115. Áridos para hormigones. Medida del coeficiente de friabilidad de las arenas. CEN; 1989 EX

UNE 83831. Métodos de ensayo de los morteros para albañilería endurecidos- Determinación de la estabilidad dimensional de los morteros para albañilería endurecidos. CEN; 2010 EX.

UNE 83980. Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo. Determinación de la absorción de agua, la densidad y la porosidad accesible al agua del hormigón. CEN; 2014.

UNE-EN 197-1. Cemento. Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes. CEN; 2011

UNE-EN 1097-2. Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos - Parte 2: Métodos para la determinación de la resistencia a la fragmentación. CEN; 2010.

UNE-EN 1097-3. Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 3: Determinación de la densidad aparente y la porosidad. CEN; 1999

UNE-EN 1097-6. Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos- Parte 6: Determinación de la densidad de partículas y la absorción de agua. CEN; 2014.

UNE-EN 13139. Áridos para morteros. CEN; 2003.

UNE-EN 1744-1. Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos. Parte 1: Análisis químico. CEN; 2010.

UNE-EN 196-2. Métodos de ensayo de cementos - Parte 2: Análisis químico de cementos. CEN; 2014

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. CEN; 2012.

UNE-EN 933-8. Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 8: Evaluación de los finos. Ensayo del equivalente de arena. CEN; 2012.

UNE-EN 933-10. Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos- Parte 10: Evaluación de los finos – Granulometría de los fillers (tamizado en corriente de aire). CEN; 2010.

UNE-EN 933-11. Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos - Parte 11: Ensayo de clasificación de los componentes de los áridos gruesos reciclados. CEN; 2009.

UNE-EN 934-2. Aditivos para hormigones, morteros y pastas. Parte 2: Aditivos para hormigones. Definiciones, requisitos, conformidad, marcado y etiquetado. CEN; 2010.

UNE-EN 934-3. Aditivos para hormigones, morteros y pastas. Parte 3: Aditivos para morteros para albañilería. Definiciones, requisitos, conformidad, marcado y etiquetado. CEN; 2010.

NLT 176. Densidad aparente de polvo mineral en tolueno. 1992

UNE-EN 1015-3. Métodos de ensayo para morteros de albañilería. Parte 3: Determinación de la consistencia del mortero fresco (por la mesa de sacudidas). CEN; 2000.

UNE-EN 1015-6. Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 6: Determinación de la densidad aparente del mortero fresco. CEN; 1999

UNE-EN 1015-9. Métodos de ensayo de los morteros para albañilería - Parte 9: Determinación del período de trabajabilidad y del tiempo abierto del mortero fresco. CEN; 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. CEN; 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. CEN; 2000.

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. CEN; 2003.

UNE 83831. Métodos de ensayo de los morteros para albañilería endurecidos. Determinación de la estabilidad dimensional de los morteros para albañilería endurecidos. CEN; 2010.

UNE 83980. Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo. Determinación de la absorción de agua, la densidad y la porosidad accesible al agua del hormigón. CEN; 2014.

3.9. Referencias bibliográficas

Agarwal, S. K., Masood, I., & Malhotra, S. K. (2000). Compatibility of superplasticizers with different cements. *Construction and Building materials*, 14(5), 253-259

Aignesberger A and Michaud H (1966), "An organisch-organischer Baustoff", DE Patent 1671017

Banfill, P. F. G., Bowen, P., Flatt, R. J., Galmiche, L., Houst, Y. F., Kauppi, A., & Perche, F. (2007). Improved superplasticisers for high performance concrete: the SUPERPLAST project. In *Proceedings of the 12th International Congress on the Chemistry of Cement* (No. LTP-CONF-2006-003, pp. Fin00344-pdf). Conseil national de recherches du Canada.

Barbudo, A., de Brito, J., Evangelista, L., Bravo, M., & Agrela, F. (2013). Influence of water-reducing admixtures on the mechanical performance of recycled concrete. *Journal of Cleaner Production*, 59, 93-98.

Bradley, G., Hoarty, J. T., & Howarth, I. M. (1985). U.S. Patent No. 4,524,163. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.

Björnström, J., & Chandra, S. (2003). Effect of superplasticizers on the rheological properties of cements. *Materials and Structures*, 36(10), 685-692.

Bravo, M., de Brito, J., Evangelista, L., & Pacheco, J. (2017). Superplasticizer's efficiency on the mechanical properties of recycled aggregates concrete: Influence of recycled aggregates composition and incorporation ratio. *Construction and Building Materials*, 153, 129-138.

Bürge T, Widmer J, Meyer T and Sulser U (1981), "Vefahren zur Herstellung von hochkonzentrierten, niedrigviskosen, wässrigen Lösungen von N-modifizierten Melamin/ Aldehydharzen", CH Patent 644876.

Bürge T, Schober I, Huber A, Widmer J and Sulser U (1990), "Hydro soluble polymers, process for their preparation and their use as dispersing agents in suspensions of solid materials, EP Patent 0402563.

Cartuxo, F., de Brito, J., Evangelista, L., Jimenez, J. R., & Ledesma, E. F. (2015). Rheological behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates–Influence of the superplasticizer. *Construction and Building Materials*, 89, 36-47.

Cartuxo, F., de Brito, J., Evangelista, L., Jiménez, J. R., & Ledesma, E. F. (2016). Increased Durability of Concrete Made with Fine Recycled Concrete Aggregates Using Superplasticizers. *Materials*, 9(2), 98.

Danzinger W M, Saitoh K, Jost P and Maeder U (2003), "New generation of admixture polymers and its role in concrete technology", in Grieve G and Owens G (ed.), *Proceedings 11th International Congress on the Chemistry of Cement (ICCC)*, Durban, pp. 2271 – 2275

De Oliveira Romano, R. C., dos Reis Torres, D., & Pileggi, R. G. (2015). Impact of aggregate grading and air-entrainment on the properties of fresh and hardened mortars. *Construction and Building Materials*, 82, 219-226.

Evangelista, L., & De Brito, J. (2010). Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 32(1), 9-14.

Evangelista, L., & De Brito, J. (2014). Concrete with fine recycled aggregates: a review. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 18(2), 129-172.

Fernández-Ledesma, E., Jiménez, J. R., Ayuso, J., Corinaldesi, V., & Iglesias-Godino, F. J. (2016). A proposal for the maximum use of recycled concrete sand in masonry mortar design. *Materiales de Construcción*, 66(321),075.

Flatt, R. J., Houst, Y. F., Bowen, P., Hofmann, H., Widmer, J., Sulser, U., ... & Bürge, T. A. (1997). Interaction of superplasticizers with model powders in a highly alkaline medium. In Proc. 5th CANMET/ACI Intern. Conf. on Superplasticizers and other Chemical Admixtures in Concrete (No. LTP-CONF-1997-003, pp. 743-762). American Concrete Institute, Farmington Hills, Mi, USA.

Guicquero, J. P., Mosquet, M., Chevalier, Y., & Le Perchec, P. (1999). U.S. Patent No. 5,879,445. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.

Hall, C. (1989). Water sorptivity of mortars and concretes: a review. Magazine of concrete research, 41(147), 51-61.

Jiang, S., Kim, B. G., & Aitcin, P. C. (1999). Importance of adequate soluble alkali content to ensure cement/superplasticizer compatibility. Cement and Concrete Research, 29(1), 71-78.

Jiang, S., & Petrov, N. (2001). Cement/superplasticizer interaction: the case of polysulfonates. Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, (233).

Jiménez, J. R., Ayuso, J., López, M., Fernández, J. M., & De Brito, J. (2013). Use of fine recycled aggregates from ceramic waste in masonry mortar manufacturing. Construction and Building Materials, 40, 679-690.

KUSTERLE, D., & GRASS, D. (1999). The rheological behaviour of cementitious materials with chemically different superplasticizers. In PRO 5: International RILEM Conference on The Role of Admixtures in High Performance Concrete (Vol. 5, p. 357). RILEM Publications.

Kim, B. G., Jiang, S. P., & Aitcin, P. C. (2000). Slump improvement mechanism of alkalis in PNS superplasticized cement pastes. Materials and Structures, 33(6), 363-369.

Ledesma, E. F., Jiménez, J. R., Fernández, J. M., Galvín, A. P., Agrela, F., & Barbudo, A. (2014). Properties of masonry mortars manufactured with

fine recycled concrete aggregates. *Construction and building materials*, 71, 289-298.

Ledesma, E. F., Jiménez, J. R., Ayuso, J., Fernández, J. M., & de Brito, J. (2015). Maximum feasible use of recycled sand from construction and demolition waste for eco-mortar production–Part-I: ceramic masonry waste. *Journal of Cleaner Production*, 87, 692-706.

Matias, D., de Brito, J., Rosa, A., & Pedro, D. (2013). Durability of concrete with recycled coarse aggregates influence of superplasticizers *Journal of materials in civil engineering*, 26(7), 06014011.

Mosquet, M., Chevalier, Y., Brunel, S., Guicquero, J. P., & Le Perchec, P. (1997). Polyoxyethylene di-phosphonates as efficient dispersing polymers for aqueous suspensions. *Journal of Applied Polymer Science*, 65(12), 2545-2555.

Nakajima, Y., & Yamada, K. (2004). The effect of the kind of calcium sulfate in cements on the dispersing ability of poly β -naphthalene sulfonate condensate superplasticizer. *Cement and concrete research*, 34(5), 839-844.

Pereira, P., Evangelista, L., & De Brito, J. (2012). The effect of superplasticisers on the workability and compressive strength of concrete made with fine recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, 28(1), 722-729.

Pieh, S. (1987). Polymere Dispergiermittel I. Molmasse und Dispergierwirkung der Melamin-und Naphthalin-Sulfonsäure-Formaldehyd-Polykondensate. *Macromolecular Materials and Engineering*, 154(1), 145-159.

Reknes K and Gustafsson J (2000), "Effect of modifications lignosulfonate on adsorption on cement and fresh concrete properties", in Malhotra V M (ed.) *Proceedings 6th CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete*, Nice, CI, SP-195, pp. 127-141.

Reknes K and Petersen B G (2003), "Novel lignosulfonate with superplasticizer performance" in Malhotra V M (ed.) Proceedings 7th CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete, Berlin, ACI, Supplementary Papers, pp. 285-299.

Saidi, M., Safi, B., Benmounah, A., Megdoud, N., & Radi, F. (2016). Physico-mechanical properties and thermal behavior of firebrick-based mortars in superplasticizer presence. *Construction and Building Materials*, 104, 311-321.

Seabra, M. P., Paiva, H., Labrincha, J. A., & Ferreira, V. M. (2009). Admixtures effect on fresh state properties of aerial lime based mortars. *Construction and Building Materials*, 23(2), 1147-1153.

Tkaczewska, E. (2014). Effect of the superplasticizer type on the properties of the fly ash blended cement. *Construction and Building Materials*, 70, 388-393.

Toledano-Prados, M., Lorenzo-Pesqueira, M., González-Fonteboa, B., & Seara-Paz, S. (2013). Effect of polycarboxylate superplasticizers on large amounts of fly ash cements. *Construction and Building Materials*, 48, 628-635.

Tsubakimoto, T., Hosoido, M., & Tahara, H. (1984). U.S. Patent No. 4,471,100. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.

Yoshioka, K., Sakai, E., Daimon, M., & Kitahara, A. (1997). Role of steric hindrance in the performance of superplasticizers for concrete. *Journal of the American Ceramic Society*, 80(10), 2667-267

CAPÍTULO 4: USO COMBINADO DE CENIZAS VOLANTES DE BIOMASA Y ÁRIDOS RECICLADOS MIXTOS EN MORTEROS

4.1. Introducción

La biomasa es el conjunto de la materia orgánica, de origen vegetal o animal, y los materiales que proceden de su transformación natural o artificial. La Directiva 2009/28/CE relativa al fomento del uso de la energía procedente de fuentes renovables, define la biomasa como “la fracción biodegradable de los productos, desechos y residuos de origen biológico procedentes de actividades agrarias (incluidas las sustancias de origen vegetal y de origen animal), de la silvicultura y de las industrias conexas, incluidas la pesca y la acuicultura, así como la fracción biodegradable de los residuos industriales y municipales”.

Se pueden distinguir tres grupos de biomasa para su aprovechamiento energético dependiendo de las fuentes de las que provengan:

Biomasa Natural: es aquella que se produce en ecosistemas naturales sin la intervención del hombre.

Biomasa Residual: es la generada en las actividades humanas que utilizan materia orgánica como pueden ser:

- Residuos de cultivos herbáceos.
- Residuos de cultivos leñosos.
- Residuos de actividades agrícolas.

- Residuos forestales.
- Residuos de industrias madereras.
- Residuos de industrias agroalimentarias.
- Residuos biodegradables

Biomasa procedente de cultivos energéticos: son cultivos específicos dedicados a la producción de energía.

En la Unión Europea, cinco países aportan el 56,7% de la energía primaria producida con biomasa (Francia, Suecia, Alemania, Finlandia y Polonia). La Fig. 4.1 muestra la producción de energía con biomasa en la UE. España ocupa el sexto lugar en la UE, en cuanto a producción de energía primaria a partir de biomasa sólida.

Los principales consumidores de biomasa (consumo per cápita) son los países nórdicos y bálticos, junto con Austria, y encabezados por Finlandia. Según datos de la European Climate Foundation (2010), el consumo anual de biomasa para calor y electricidad se estima en 1650 TWh en 2020. La Directiva 2009/28/CE establece que se debe alcanzar una cuota del 20% de energía procedente de fuentes renovables en el consumo total de energía de la UE en 2020 y del 27% en el año 2030 según el marco sobre clima y energía para 2030 de la UE.

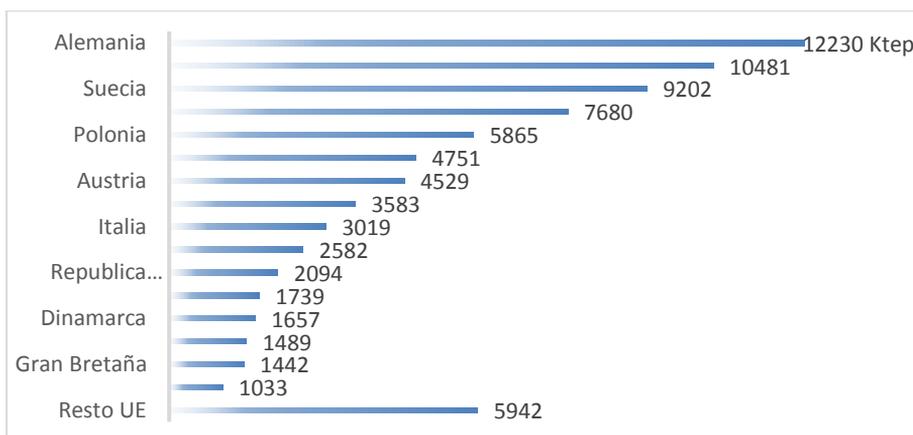


Figura 4.1: Producción de energía con biomasa en la UE (CEDEX, 2014).

España es un país altamente dependiente de los combustibles fósiles. Según los últimos datos del Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), en 2016 el consumo primario de energía se situó en torno a los 123.485 de ktep. El petróleo supuso en el consumo de energía primaria un 44,2%, el gas natural un 20,3%, la energía nuclear un 12,4% y el carbón un 8,5%. Las energías renovables supusieron un 13,9%. La biomasa supuso un 4,6% del consumo de energía primaria en 2016 en España.

Según la Agencia Andaluza de la Energía, el potencial de biomasa detectado en Andalucía asciende a 3.955 ktep. Si se tiene en cuenta que el consumo de energía primaria en Andalucía en 2015 fue de 18.468,5 ktep significa que el potencial de biomasa representa el 21,4 % de las necesidades energéticas en Andalucía.

Andalucía cuenta con una importante riqueza biomásica, siendo en gran medida su procedencia del cultivo del olivar y de sus industrias derivadas. La biomasa del olivar destaca debido a que la producción de aceite de oliva es uno de los productos más preciados en Andalucía. Además, este cultivo genera una serie de subproductos con un contenido energético importante y que son aprovechados como biocombustibles de elevada calidad y que suponen aproximadamente el 40% del potencial total, estos subproductos son: el orujo, el orujillo, hojas de almazara, el hueso de aceituna y la poda del olivar.

Andalucía lidera el ámbito de la generación de energía a partir de biomasa, con 18 plantas de combustión de biomasa en 2015 y un total de capacidad instalada de 257,48 MW, que en 2013 tuvieron un consumo de casi 724 ktep, cifra que sitúa a la región a la cabeza en el panorama nacional. La región es, además, **la primera Comunidad Autónoma en consumo de biomasa** con 514.000 toneladas equivalentes de petróleo en 2013 y cuenta actualmente con ocho fábricas de pélets en funcionamiento. La Fig. 4.2 muestra la distribución por provincias del potencial de biomasa en Andalucía.

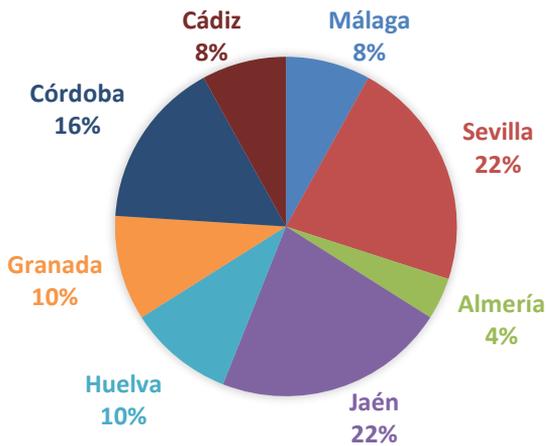


Figura 4.2: Distribución provincial del potencial de biomasa. Fuente: Agencia Andaluza de la Energía. Conserjería de Empleo, Empresas y Comercio (2015).

En la combustión de biomasa se generan dos tipos de cenizas que deben gestionarse desde una perspectiva medioambiental:

- Cenizas de fondo (CF) formadas por el material total o parcialmente quemado.
- Cenizas volantes (CV) partículas arrastradas por la corriente de gases al exterior de la cámara de combustión.

Los productos de desecho procedentes de la combustión de la biomasa se están convirtiendo en un problema medioambiental y económico en las plantas de combustión de biomasa (Cabrera y col., 2014). En la actualidad, la mayor parte de las cenizas de biomasa producidas en las centrales térmicas de biomasa se depositan ya sea en vertederos o se utiliza en campos agrícolas o forestales como enmienda de suelos o para la fabricación de fertilizantes agrícolas ricos en potasio. Con frecuencia estos usos se llevan a cabo sin ningún tipo de control. (Rajamma y col., 2015).

La ceniza de fondo comprende la fracción gruesa de ceniza producida en la parrilla, en la cama inferior y en la cámara de combustión primaria. A menudo, se mezcla con impurezas minerales

contenidas en el combustible de biomasa, como arena, piedras y barro o con material de cama en las plantas de combustión de lecho fluidificado. Estas impurezas pueden ser minerales, especialmente en instalaciones de combustión de lecho fijo, y dar lugar a la formación de escoria (debido a una disminución del punto de fusión) y a la presencia de partículas de cenizas sinterizadas en la ceniza de fondo. Las cenizas de fondo se caracterizan por estar formadas por partículas altamente porosas y tener una textura rugosa. El tamaño de sus partículas puede variar dependiendo del tipo de horno utilizado, pero suele estar comprendido entre 0-4 mm (Hinojosa y col., 2014, Cabrera y col., 2014). Según estudios realizados por Cuenca y col. (2013) este tipo de cenizas podrían tener un uso en terraplenes, rellenos de carreteras y hormigones no estructurales. Según Maschio y col. (2011) el uso de cenizas de fondo en cemento, morteros u hormigón es factible ya que su eliminación y uso como material secundario tiene un efecto beneficioso sobre el medio ambiente.

La ceniza volante es la fracción más fina de cenizas (mayor parte de las partículas por debajo de 75 μm), arrastradas por los gases de combustión, que se recoge y precipita en los filtros, las partículas de tamaño mayor a 1 mm proceden del material que no se ha quemado.

Teniendo en cuenta que el coste de eliminación de cenizas de biomasa está en aumento y que los volúmenes de cenizas de biomasa se están incrementando en todo el mundo, es crucial encontrar una manera de gestionar de forma sostenible este tipo de residuos, no sólo por el coste que supone su eliminación en vertederos sino también con el objetivo de tener un sistema de producción con residuos cero, que debe ser el objetivo final de todas las actividades humanas futuras.

Una manera de reciclar las cenizas de biomasa sería utilizarlas en los materiales de construcción, cumpliendo así las recomendaciones de la Directiva Europea sobre residuos 2008/98/CE y produciendo importantes beneficios ambientales, ya que el reciclado de cenizas de biomasa minimiza la extracción de los áridos naturales y reduce la

cantidad de residuos que potencialmente se depositarían en vertederos (Cabrera y col. 2014).

En este capítulo se estudia el uso de la ceniza volante de biomasa en sustitución del filler silíceo empleado en la fabricación de morteros industriales.

Según la Lista Europea de Residuos las cenizas de biomasa de las centrales térmicas se clasifican como residuos industriales, con el código 100101 o 100103 y deben ser manejados en consecuencia.

La reutilización potencial tanto de las cenizas volantes como de las de fondo ha sido estudiada por diversos autores, a continuación, se muestran algunos de los estudios más relevantes realizados con anterioridad al desarrollo de esta Tesis Doctoral.

4.1.1. Uso de cenizas de biomasa en materiales de construcción

Según Rajamma y col. (2009), la cantidad y la calidad de las cenizas producidas en una planta de energía de biomasa es variables y dependen de las características de la biomasa utilizada (los desechos agrícolas o biomasa herbácea, de madera o corteza); la tecnología de la combustión de biomasa, (por ejemplo, en un horno de rejilla las cenizas de biomasa son sometidas a temperaturas más altas, entre 1000–1200 °C, en comparación con un lecho fluidificado, menos de 900° C) y por último influye el lugar en el que se recogen las cenizas, por ejemplo cenizas de fondo o cenizas volantes. Todo esto condiciona su posible uso como material de construcción. Normalmente, las cenizas de la biomasa se caracterizan por el alto contenido de óxido de calcio, sílice, alúmina, y baja cantidad de óxido de hierro, en comparación con las cenizas volantes de la combustión del carbón (Esteves y col., 2012).

Da Luz-García y Sousa-Coutinho (2013) utilizaron las cenizas de fondo obtenidas a partir de la combustión de residuos de madera (GWA)

como sustitución parcial del cemento en la fabricación de morteros. Se sustituyó el 0%, 5% y 10% en peso. Analizaron la densidad, resistencia mecánica y durabilidad del mortero mediante la penetración de iones cloruro, resistividad eléctrica, absorción de agua por capilaridad y carbonatación. Observaron que la densidad y resistencia a flexión no presentaban diferencias significativas con respecto al mortero de referencia, lo mismo ocurrió con la resistividad eléctrica medida a 78 días. Sin embargo, la resistencia a compresión disminuyó a medida que aumentaba el porcentaje de sustitución de cemento por GWA. En la penetración de iones cloruro, se obtuvo una permeabilidad de cloruros más alta que el mortero de referencia fabricado solo con cemento.

Modolo y col. (2013) utilizaron las cenizas de fondo de residuos de biomasa forestal producidos en cámaras de combustión de lecho fluidificado burbujeante (BFBCs) como árido en la elaboración de morteros. Estos morteros fueron elaborados mediante la sustitución en peso entre el 50% y 100% de arena comercial por dichas cenizas. En los ensayos realizados detectaron que la cantidad de cloruros en las cenizas era significativa, lo que conlleva a la necesidad de controlar la concentración de cloruros, ese fue uno de los puntos críticos, además de la variación del nivel de agua de las cenizas a lo largo del tiempo. Observaron que los morteros producidos al reemplazar arena comercial con una masa equivalente de 50 y 100% en peso de ceniza mostraban características similares al de referencia (sin cenizas). Las preocupaciones principales son causadas por la variación del nivel de agua de las cenizas a lo largo del tiempo y la necesidad de controlar la concentración de cloruros.

Carrasco y col. (2014) estudiaron la viabilidad de utilizar cenizas de fondo procedentes de la combustión de biomasa vegetal como sustitución del cemento en la fabricación de bloques de construcción. Utilizaron proporciones de sustitución que iban del 10% al 90% en peso. Para ello estudiaron las propiedades físico-mecánicas de estos

materiales y su impacto ambiental mediante la lixiviación de metales pesados. Los resultados demostraron que la adición de cenizas de fondo aumenta la porosidad del material lo que hace que disminuya su conductividad térmica, así como la resistencia a compresión. Por otro lado, la adición de cenizas de fondo con más del 50% de sustitución puede crear fisuras en las muestras de ensayo cuando estas se someten a ciclos de hielo-deshielo. Con respecto a la concentración de metales pesados en los lixiviados de las cenizas de fondo y las mezclas ensayadas estaban por debajo del límite de material inerte según la Directiva Europea.

Beltrán y col. (2014) estudiaron la posibilidad de utilizar cenizas de fondo de biomasa procedentes de restos de poda de olivo como sustitutivo de cemento y arena natural en hormigones no estructurales con áridos reciclados de RCD. Se utilizó un cemento CEM I 42,5 MPa, dos tipos de áridos reciclados y tres tipos de áridos naturales, aditivo superplastificante y por último cenizas de fondo de biomasa (BBA) generada por la combustión de una biomasa compuesta principalmente de aceituna triturada y otra biomasa obtenida de resto de poda de olivar, así como otros cultivos energéticos, procedente de la central térmica ubicada en Linares (Jaén, España), Se estudiaron las propiedades físicas (densidad, porosidad y absorción de agua), mecánicas (resistencia a compresión y a flexión), y de durabilidad (penetración de iones cloruro, penetración de agua bajo presión y retracción). Los resultados mostraron que la BBA presentaba una alta absorción de agua y baja densidad, obtuvieron una distribución del tamaño de partículas adecuada para dicho material lo que hace que pueda ser utilizado como sustituto de la arena natural, pero con un cuidado especial a la hora de hacer la dosificación debido a su baja densidad. Con respecto a la resistencia a flexión y compresión de los hormigones fabricados con BBA los valores de resistencia mecánica fueron menores que los del hormigón de referencia. En cuanto a las propiedades de durabilidad, la

penetración de agua bajo presión, la penetración de iones cloruro y la retracción fueron mayores al incorporar BBA que en los materiales de referencia.

Cabrera y col. (2014) analizaron el uso de las cenizas de fondo de biomasa como material de relleno para la construcción de infraestructuras viarias. Para ello se evaluaron las características físicas, químicas y mecánicas de 30 muestras tomadas de tres plantas de biomasa diferentes localizadas en Andalucía, para caracterizar física y mecánicamente todas las muestras se midieron los siguientes parámetros: granulometría, absorción de agua, densidad, friabilidad, compactabilidad según el ensayo Proctor modificado, índice CBR y plasticidad e hinchamiento en edómetro. Compararon los resultados con las especificaciones técnicas de la normativa española (PG-3) y concluyeron que las cenizas de fondo de biomasa poseen propiedades aceptables para ser utilizadas como material de relleno en el núcleo de terraplenes de carreteras de 5 m máximo en altura sin medidas de precaución adicionales.

En un estudio posterior, Cabrera y col. (2015) pusieron de manifiesto la posibilidad de utilizar cenizas de fondo de biomasa en mezclas con árido natural y árido reciclado mixto de RCD para la formación de bases y sub-bases de carreteras con un 3% y un 5% de cemento. Estudiaron las propiedades físicas, químicas y mecánicas de los materiales base cemento hechos con cenizas de fondo de biomasa. Los resultados obtenidos por estos autores fueron positivos ya que ponen de manifiesto que, para determinados porcentajes de dosificación, es posible utilizar BBA mezcladas con áridos naturales o reciclados.

Modolo y col. 2015, investigaron la influencia de utilizar cenizas de fondo de biomasa en morteros. Para ello sustituyeron la arena natural por cenizas de fondo de biomasa, la sustitución se hizo en peso al 25%, 50% y 100%. Los resultados demostraron la factibilidad de utilizar

cenizas de fondo de biomasa en morteros. En cuanto a las propiedades en estado fresco de los morteros, observaron que la sustitución de arena por cenizas de fondo produce una disminución de la demanda de agua.

Beltrán y col. (2016) estudiaron el efecto de la sustitución de arena natural por cenizas de fondo de biomasa en las propiedades de los morteros. Utilizaron dos tipos de cemento (CEM-I 52.5 N/SR y CEM-II/B-L 32.5). En cada familia de morteros, se utilizaron tres relaciones volumétricas de sustitución de arena natural por cenizas de fondo (0%, 10% y 20%) y tres contenidos de cemento (515 g/l, 485 g/l y 450 g/l). También realizaron la sustitución del cemento por cenizas de fondo (10% y 20% en volumen de cemento). La incorporación de cenizas de fondo de biomasa incrementa la porosidad de los morteros, disminuye la densidad seca y la resistencia mecánica. Los autores atribuyen este efecto negativo a la mayor porosidad y presencia de materia orgánica no quemada de las cenizas de biomasa. La influencia de las cenizas de fondo de biomasa es menor en los morteros hechos con CEM-I. A pesar de los resultados obtenidos, los autores consideran que la incorporación de hasta un 20% de ceniza de biomasa puede ser viable para la fabricación de morteros de albañilería.

Rosales y col. (2016) estudiaron la influencia de la utilización de áridos reciclados mixtos (RMA) y cenizas de fondo de biomasa (BBA) como sustitutos de los áridos naturales en las propiedades del hormigón. Los materiales utilizados fueron: Cem II-A/L-42,5, cenizas de fondo de biomasa (BBA) subproducto generado por la combustión de la biomasa compuesta principalmente de residuos del olivar, arcilla expandida, dos tipos de áridos naturales, un árido reciclado mixto y un aditivo superplastificante. Analizaron la densidad, absorción de agua por inmersión, resistencia a la compresión, resistencia a la flexión, UPV, penetración de agua y retracción. Los resultados mostraron que al sustituir RMA y BBA las propiedades mecánicas del hormigón no mejoraron debido al alto contenido de partículas de cerámica y mortero

adherido en el caso del RMA y a la alta porosidad y alto contenido de materia orgánica en el caso de BBA. A pesar de ello, los hormigones ligeros cumplían los límites establecidos por la normativa española EHE-08. Llegaron a la conclusión de que fabricar hormigón ligero con una tasa baja de uso de estos subproductos era posible, ya que se lograban materiales con una densidad inferior y exigencias mecánicas que cumplen con las normas actuales para este tipo de hormigón.

Rosales y col. (2017) evaluaron la ceniza de fondo de biomasa de oliva con ocho tratamientos diferentes, no procesados (BBA), triturado (BBA-C), quemado (BBA-CO), BBA sin partículas ligeras (BBA-NL) y combinación de tratamientos (BBA-C-CO), (BBA-C-NL), (BBA-C-CO-NL). Además, para evaluar la influencia de BBA como sustituto parcial del cemento, se compararon las propiedades del cemento fabricado con BBA con las del cemento sin adiciones (Control-OPC). Los materiales utilizados fueron: arena natural estándar (SNS), CEM-I 52,5, cenizas de fondo de biomasa (BBA) obtenida a partir de la combustión de varios residuos agrícolas, tales como el material podado de olivos y otros materiales vegetales. Analizaron las propiedades mecánicas y de durabilidad de los morteros que contenían cenizas de fondo de biomasa aplicando diferentes métodos de procesamiento. Los resultados obtenidos mostraron mejoras significativas en las propiedades mecánicas y de durabilidad de los morteros en los que se aplicó algún tratamiento. La extracción de partículas ligeras y la eliminación de materia orgánica mediante la combustión mejoraron considerablemente el comportamiento mecánico de los morteros fabricados. Por lo tanto, los morteros con ceniza de fondo de biomasa triturada sin partículas flotantes y sin materia orgánica produjeron un 10% de disminución de la resistencia a la compresión con respecto al mortero de referencia. Por lo tanto, este estudio muestra una posibilidad de valorización de residuos en la fabricación de morteros y hormigones.

Las cenizas de biomasa no contienen metales tóxicos como en el caso de las cenizas de carbón. Los constituyentes que forman las cenizas procedentes de la combustión de biomasa son muy diversas ya que dependen del tipo de biomasa, tipo de suelo y la cosecha (García y Sousa-Coutinho, 2013). Sin embargo, en un estudio realizado por Cabrera y col. (2016) observaron que las cenizas de fondo de biomasa utilizadas en su estudio presentaban un alto potencial de contaminación por lo que fueron clasificadas como residuos peligrosos, esta carga contaminante fue reducida después de su tratamiento con cemento, por lo que indicaron que dichos materiales pueden ser reutilizados desde el punto de vista del medio ambiente siempre que se lleve a cabo una gestión adecuada.

4.1.2. Uso de las cenizas volantes de biomasa en construcción

Muchos tipos de cenizas volantes de biomasa tienen propiedades puzolánicas similares a las cenizas volantes del carbón, tales como los de cáscara de arroz, madera, paja de trigo y paja de la caña de azúcar (Wang y col. 2007).

Wang y col. (2007) realizaron mezclas de hormigón con cenizas volantes de biomasa con el fin de estudiar su resistencia mecánica, microscopía y durabilidad. Los principales materiales utilizados en este estudio fueron cemento Portland tipo I y II, cenizas volantes procedentes del carbón de clase C y cenizas volantes de biomasa procedentes del carbón vegetal. Las mezclas se realizaron reemplazando el cemento por las cenizas volantes en peso. Según los resultados obtenidos, llegaron a la conclusión de que a partir de la reacción álcali/sílice, el uso de cenizas volantes de biomasa permite reducir el potencial de expansión en comparación con las cenizas volantes de clase C, aun cuando las primeras tienen un contenido de álcali superior.

Rajamma y col. (2009) fabricaron pastas de cemento y morteros sustituyendo cemento portland ordinario por cenizas volantes de biomasa. La sustitución se hizo en peso al 10%, 20% y 30%. Las pastas de cemento se prepararon con un contenido de agua que van desde el 30% a 46% del peso de cemento. Los materiales utilizados en este estudio fueron: Cem I 42,5 R, arena silíceas, dos tipologías de cenizas a las que denominaron F1 y F2. El primer tipo de cenizas volantes las recogieron en una central térmica de biomasa dedicada a la producción de electricidad, en la que se utilizan residuos forestales para la producción de energía, estas cenizas eran de color negro lo cual indica un contenido significativo de carbono; el segundo tipo de cenizas volantes lo recogieron de una planta de cogeneración de biomasa, a partir de una industria de pulpa y papel, estas cenizas eran de color gris. Las cenizas volantes se tamizaron a través de una malla de 75 micras. En este estudio llegaron a la conclusión de que se podría incorporar hasta un 20% de cenizas como sustitutivo del cemento en los morteros sin afectar significativamente a la resistencia mecánica. Identificaron como aspecto limitante, la cantidad carbono, cloruro y sulfato de las cenizas volantes de biomasa, los cuales deberían controlarse.

Cruz-Yusta y col. (2011) realizaron mezclas sustituyendo las cenizas volantes de biomasa procedentes de la quema de orujo por cemento, obteniendo una reducción de las resistencias mecánicas, lo cual evidencia la baja actividad puzolánica de las cenizas volantes. Obtuvieron que los morteros con sustitución del 10% de cenizas volantes por cemento fue la única que cumplió con la resistencia a compresión para un mortero industrial clasificado como M-5 de acuerdo con la norma UNE-EN 998-2:2012.

Maschio y col. (2011) realizaron mezclas de mortero sustituyendo las cenizas de biomasa (volantes y de fondo) procedentes de la combustión de astillas de abeto por cemento Portland CEM II/B-LL. Se sustituyó en peso variando del 5% al 30%. Obtuvieron una reducción en

las resistencias mecánicas a medida que se aumentó el porcentaje de sustitución, por lo que sólo sustituciones del 5% presentaron valores similares a los morteros de referencia. Por otro lado, la absorción de agua resultó baja en los morteros con mayores resistencias mecánicas, incrementándose en la medida en que la resistencia decrece, puntualizando el hecho de una absorción por encima del 5% para las muestras con sustituciones de cenizas por encima del 10%, las cuales resultan más porosas y en consecuencia, más susceptibles de sufrir una degradación de la matriz que conforma el mortero.

Sata y col. (2012) evaluaron la influencia de la variación de la relación agua/cemento sobre morteros con adiciones de cenizas volantes procedentes de cáscaras de arroz (RHA) mezcladas con las de corteza de eucalipto (RHBA) y de aceite de palma (POFA). Las proporciones de sustitución de cenizas por cemento variaron en este estudio entre el 10% y el 40%, y los valores de relación agua/cemento se fijaron en 0,50, 0,575 y 0,65. Las cenizas y parte de la arena de río fueron molidas hasta obtener tamaños de partículas similares a los del cemento ordinario. Concluyeron que para una misma relación agua/cemento, la resistencia a compresión de los morteros con sustitución por RHBA y POFA tiende a incrementarse con el aumento de la proporción de dichas cenizas y con la edad de curado, hecho más notorio en las cenizas tipo RHBA. Además, los morteros con cenizas de tipo RHBA mostraron valores de resistencia a compresión ligeramente superiores a aquellos que contenían cenizas de tipo POFA, debido al mayor porcentaje de Silicio en la primera.

Cuenca y col. (2013) estudiaron la posibilidad de usar cenizas volantes procedentes de la combustión de pellets de residuos agrícolas de olivo como filler en la fabricación de hormigones autocompactantes. Para ello fabricaron dos tipos de muestras, la primera de hormigón convencional (grava, áridos, aditivos, filler y cemento) y la segunda incorporando cenizas volantes de biomasa. Los materiales empleados en

este estudio fueron: Cem I 42,5 R/SR, un aditivo superplastificante Glenium ACE-324 hecho de policarboxilatos, dos tipos de filler, para el hormigón de referencia emplearon un filler de piedra caliza comercial mientras que para la otra muestra emplearon cenizas volantes de biomasa como filler. Utilizaron áridos de piedra caliza dolomítica triturada en tres fracciones: una fracción de arena 0/4, una fracción de gravilla 2/8 y por último una fracción de grava 8/16. Según los resultados obtenidos en laboratorio, estos autores llegaron a la conclusión de que las cenizas volantes de biomasa se pueden utilizar para la fabricación de hormigón autocompactante de alta calidad, ya que se demostró que el hormigón fabricado con cenizas volantes de biomasa alcanza una resistencia a compresión igual o mayor a la del hormigón de referencia.

Demis y col. (2014) centraron su estudio en evaluar la influencia de las principales características de las cenizas de biomasa con diferentes contenidos de SiO_2 en el desarrollo de la resistencia mecánica del hormigón y el rendimiento en la exposición de cloruro. Para ello emplearon cuatro tipos de cenizas volantes de biomasa diferentes (cenizas de cáscara de arroz (RHA), cenizas de aceite de palma (POFA), cenizas de caña de azúcar (SCBA) y cenizas de madera (WA)). Llegaron a la conclusión de que factores tales como las variaciones en las condiciones de funcionamiento y la fuente de biomasa influyen en las características químicas de las cenizas de biomasa incluso perteneciendo al mismo grupo. Estos autores afirman en su trabajo que la utilización de cenizas de biomasa procedentes de subproductos agroindustriales contiene grandes cantidades de sílice amorfa, lo que puede ser una solución alternativa a la incorporación de los materiales cementantes complementarios utilizados tradicionalmente para la fabricación de cemento y/o hormigón. Concluyeron que estos materiales son eficaces en el desarrollo de la resistencia del hormigón y extremadamente eficiente en la reducción de la permeabilidad del hormigón.

Rajamma y col. (2015) fabricaron pasta de cemento y morteros mediante la sustitución de cemento Portland ordinario por cenizas volantes de biomasa. La sustitución se hizo en peso al 0%, 10%, 20% y 30%. En este trabajo estudiaron tanto las propiedades en fresco como en endurecido. Los materiales utilizados en este trabajo fueron Cem I 42,5R, arena silícea con una distribución de tamaño de partículas entre 0,15 y 4,75 mm, superplastificante (Sikament 300 Plus) utilizado para ajustar la plasticidad de los morteros frescos y dos tipos de cenizas volantes de biomasa generadas a partir de tecnologías de combustión distintas. Una de ellas se recogió en el precipitador electrostático de una central térmica que utiliza un horno de parrilla para quemar los residuos de madera o biomasa forestal de las actividades de explotación forestal y la otra se generó en una planta de cogeneración asociada a la producción de pasta de papel que quema principalmente corteza de eucalipto en una combustión de lecho fluidificado burbujeante. Llegaron a la conclusión de que la introducción de cenizas de biomasa afecta a las características en estado endurecido, pero de manera no significativas por lo que sería una solución viable. En estado fresco el uso de cenizas volantes de biomasa condujo a una disminución en el tiempo de fraguado.

4.2. Objetivos

El objetivo específico de este capítulo es estudiar el efecto de la sustitución de filler silíceo comercial por ceniza volante de biomasa en las propiedades de morteros de albañilería hechos con áridos naturales y áridos reciclados mixtos de RCD.

Para la consecución de este objetivo específico se llevarán a cabo las siguientes actividades:

- 1.- Caracterización fisicoquímica de los materiales empleados en la fabricación de los morteros.

2.- Estudio del efecto de la incorporación de cenizas volantes de biomasa en las propiedades del mortero fresco y endurecido fabricado con áridos naturales.

3.- Estudio del efecto de la incorporación de cenizas volantes de biomasa en las propiedades del mortero fresco y endurecido fabricado con áridos reciclados de RCD.

4.3. Materiales y métodos

4.3.1. Materiales

4.3.1.1. Árido Natural

Para la realización del presente estudio se ha utilizado como referencia una arena natural silíceo comercial (AN) no normalizada, procedente de la planta Áridos Álvarez SL de Córdoba (Ver Apdo. 3.4.1.1 del Capítulo 3).

4.3.1.2. Árido reciclado de RCD – mixto

Para este estudio se ha empleado la fracción fina 0/4 mm de un árido reciclado de RCD (AR) tipo mixto, recogido de la planta de Residuos de Construcción y Demolición de la empresa GECORSA S.L., situada en Córdoba (España). (Ver Apdo. 3.4.1.2 del Capítulo 3).

4.3.1.3. Cemento

Se ha utilizado un cemento portland tipo CEM I 52,5 R (UNE-EN 197-1) suministrado por Cementos Cosmos S.A. Las características se presentan en la Tabla 4.1.

4.3.1.4. Aditivo

Se ha utilizado un aditivo plastificante aireante para morteros (NEOPLAST), caracterizado por:

- Otorga una mayor plasticidad a la mezcla, consiguiendo superficies más lisas.

- Proporciona una mayor cohesión al conjunto, disminuyendo las posibilidades de segregación.
- Mejora la trabajabilidad del mortero, facilitando su puesta en obra.
- Aumenta su resistencia a temperaturas extremas mediante la inclusión de aire.

De acuerdo a la información suministrada por el fabricante, es recomendable la adición de 10 ml por cada 50 kg de cemento. En este caso, se han añadido 0,1 ml a cada una de las amasadas (672 g de cemento).

Tabla 4.1: Composición del CEM I 52.5 R (Cementos Cosmos S.A.).

ESPECIFICACIONES		
COMPOSICIÓN	Norma	Valor habitual
Clinker	95-100 %	≥ 95 %
Minoritarios	0-5 %	≤ 5 %
EXIGENCIAS QUÍMICAS	Norma	Valor habitual
Pérdida por calcinación	≤ 5 %	< 3,2 %
Residuo Insoluble	≤ 5 %	< 1 %
Sulfato	≤ 4 %	< 4 %
Cloruros	≤ 0,1 %	< 0,02 %
Cromo VI soluble en agua	≤ 0,0002 %	< 0,0002 %
PROPIEDADES FÍSICAS		
Densidad partícula		3,15 gr/cm ³
EXIGENCIAS FÍSICAS	Norma	Valor habitual
Expansión (Le Chatelier)	≤ 10 mm	< 2,5 mm
Tiempo de fraguado mínimo	≥ 60 min.	> 85 min.
Tiempo de fraguado máximo	≤ 720 min.	< 355 min.
EXIGENCIAS MECÁNICAS	Norma	Valor habitual
Resistencia a la compresión (2 días)	≥ 30,0 N/mm ²	> 38,0 N/mm ²
Resistencia a la compresión (28 días)	≥ 52,5 N/mm ²	> 57,0 N/mm ²

4.3.1.5. Filler silíceo

Se ha utilizado como referencia un filler silíceo (FS) comercial de Minas Carmina Palau Saverdera (Gerona, España). El 100% de las

partículas pasan por el tamiz 0,125 mm y el 74% por el tamiz de 0,063 mm, lo cual cumple con las especificaciones de la EHE-08 (UNE-EN 933-1:2006).

4.3.1.6. Cenizas volantes de biomasa

Para cumplir los objetivos de la investigación, se han utilizado dos cenizas volantes de biomasa, una procedente de una Planta de biomasa localizada en Linares (Jaén) y la otra de una planta de biomasa localizada en Puente Genil (Córdoba).

Cenizas volantes de biomasa de linares (BL): procedentes de un complejo industrial de la localidad de Linares, en la provincia de Jaén, administrado por la empresa Valoriza Energía, del grupo Sacyr-Vallehermoso. Esta planta tiene el doble objetivo de extracción de aceite de oliva para el consumo, así como el aprovechamiento de los desechos producidos en la extracción para la generación de energía eléctrica. Tiene una capacidad de producción de 15 MW.

El orujillo constituye la fuente principal de biomasa de esta planta, aunque también se utilizan otros tipos de biomásas procedentes de otros cultivos, como el orujo de uva, la poda de olivar, cáscaras de almendra, así como rastrojos de algodón, girasol o ajo.



Figura 4.3: Planta de valorización energética de biomásas de Linares (Valoriza Energía, Grupo Sacyr-Vallehermoso).

Cenizas de biomasa de Puente Genil (BP): procedentes de un complejo industrial de cogeneración en ciclo combinado (13 + 4,4 MW) y generación eléctrica a partir de biomasa (9,6 MW) localizado en Puente Genil (Córdoba) de la empresa Valoriza Energía, del grupo Sacyr-Vallehermoso.

La biomasa utilizada como combustible para la planta proviene principalmente de orujillo (residuo que se obtiene del proceso de extracción del aceite de orujo de oliva) pero también orujos de uva, poda de olivar, cáscara de almendra, rastrojos de algodón, girasol, ajos, sorgo, residuos forestales, etc., procedentes de cultivos de la zona.

La toma, preparación, conservación y transporte de las muestras de las cenizas volante se realizaron de acuerdo con la norma UNE 83421:1987 EX.



Figura 4.4: Planta de valorización energética de biomasa de Puente Genil (Valoriza Energía, Grupo Sacyr-Vallehermoso).

4.3.2. Caracterización del árido natural (AN) y árido reciclado de RCD (AR)

4.3.2.1. Granulometría

La granulometría del AN y AR está descrita con detalle en el Apdo. 3.4.2.1. del Capítulo 3.

4.3.2.2. Composición del AR

El árido reciclado a partir del cual se obtuvo la fracción fina coincide con la utilizada en el Capítulo 3 (ver Apdo. 3.4.2.2 del Capítulo 3). Está compuesta según la norma UNE-EN 933-11:2009 por Hormigón y morteros (38,24%); áridos naturales no ligados (31,47%); materiales cerámicos (28,85%); materiales bituminosos (1,14%); yeso (0,15%); vidrio 0,01%; otros como madera, plástico, etc. (0,4%).

4.3.2.3. Densidad y absorción

De acuerdo al procedimiento indicado en la norma UNE-EN 1097-6 se determina la densidad y absorción del árido AN y AR. Los resultados están descritos con detalle en el Apdo. 3.4.2.4 del Capítulo 3.

4.3.2.4. Composición mineralógica de los áridos

Para la determinación de la composición mineralógica se ha procedido a la realización de difractogramas de rayos X de los áridos empleados (Fig. 4.5).

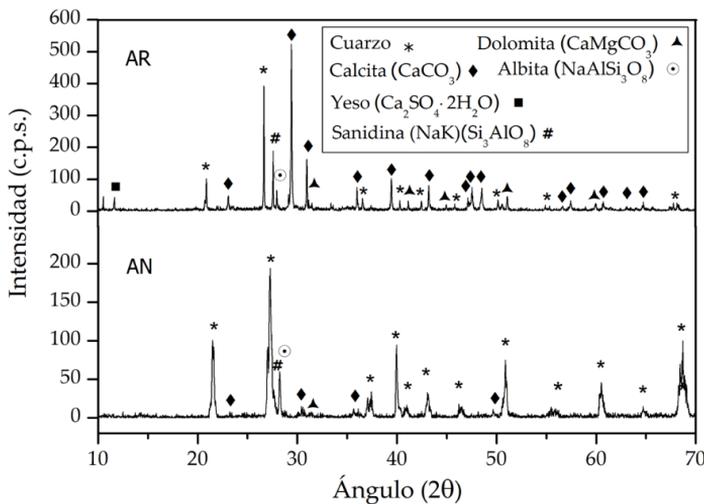


Figura 4.5: Patrones de DRX DE AN y AR.

La fase principal de la AN es el cuarzo (33-1161) [JCPDS, 1995] además podemos apreciar la presencia de albita (10-0393) [JCPDS,

1995], y de manera minoritaria la presencia de sanidina (10-0357) [JCPDS, 1995] y calcita (05-0586) [JCPDS, 1995].

En el AR la fase mayoritaria es la calcita (05-0586) [JCPDS, 1995] y el cuarzo (33-1161) [JCPDS, 1995] también se observa la presencia de sanidina (10-0357) [JCPDS, 1995] y como fase minoritarias albita (10-0393), dolomita (36-0426) [JCPDS, 1995], yeso (42-0551) [JCPDS, 1995].

4.3.2.5. Lixiviación de áridos

Para estudiar la lixiviación de los materiales se realiza el Test de conformidad según la norma UNE-EN 12457-3:2003. En el ensayo se distinguen dos pasos de lixiviación. Paso 1: se añade una cantidad de lixivante (agua desionizada) de modo que se establezca una relación líquido/sólido (en adelante L/S) = 2 l/kg. Se agita en un volteador durante 6 horas a una velocidad de entre 5 y 10 revoluciones. y después se procede al filtrado de la muestra con filtros de 0,45 µm. Paso 2: a la muestra anterior se añade agua desionizada para conseguir una relación L/S =10 l/kg. Se agita la muestra 18 horas y después se procede a su filtrado con filtros de 0,45 µm. Además, se mide el pH, la conductividad y la temperatura del líquido en ambos pasos. Se realiza 2 repeticiones para cada material.

El análisis para determinar las trazas de elementos se hizo en el Servicio Centralizado de Apoyo a la Investigación (SCAI) de la Universidad de Córdoba. Se utilizó un ICP de masas modelo Perkin-Elmer ELAN DRC-e. Los resultados se compararon con los criterios de aceptación de residuos en vertedero dados por la Decisión del Consejo 2003/33/CE (basados en el Directiva 1999/31/CE) que clasifica los residuos en peligrosos, no peligrosos e inertes.

Como se puede observar en la Tabla 4.2, sólo el Cr y los sulfatos superan el límite de residuo inerte, lo cual concuerda con lo expresado por Del Rey y col. (2015). No se realizaron estudios para identificar el

origen del Cr. Según Del Rey y col. (2015) los materiales cerámicos puros contienen principalmente Cr (III), mientras que en los áridos reciclados el Cromo puede estar como Cr (IV) que es mucho más tóxico. La Directiva no distingue entre Cr (III) y Cr (IV) (Del Rey y col., 2015). El origen de los sulfatos en los áridos reciclados está ligado a la presencia de yeso en los áridos reciclados mixtos (Jiménez, 2013).

Tabla 4.2: Concentraciones lixiviadas de AN y AR (mg / kg) y criterios de aceptación de residuos (Decisión 2003/33 / CE del Consejo)

Elemento (mg/kg)	Criterios Directiva de vertederos de la UE 2003/33 / EC									
	AN		AR		Residuo inerte		Residuo no peligroso		Residuo peligroso	
	L/S=2	L/S=10	L/S=2	L/S=10	L/S=2	L/S=10	L/S=2	L/S=10	L/S=2	L/S=10
Cr	0,001	0,000	0,273	0,343	< 0,2	< 0,5	4	10	25	70
Ni	0,000	0,000	0,008	0,011	< 0,2	< 0,4	5	10	20	40
Cu	0,000	0,003	0,016	0,020	< 0,9	< 2	25	50	50	100
Zn	0,001	0,002	0,027	0,165	< 2	< 4	25	50	90	200
As	0,013	0,061	0,004	0,007	< 0,1	< 0,5	0,4	2	6	25
Se	0,003	0,013	0,011	0,022	< 0,06	< 0,1	0,3	0,5	4	7
Mo	0,001	0,000	0,068	0,088	< 0,3	< 0,5	5	10	20	30
Cd	0,000	0,000	0,000	0,000	< 0,03	< 0,04	0,6	1	3	5
Sb	0,001	0,002	0,007	0,028	< 0,02	< 0,06	0,2	0,7	2	5
Ba	0,025	0,091	0,080	0,331	< 7	< 20	30	100	100	300
Hg	0,000	0,000	0,000	0,000	< 0,003	< 0,01	0,05	0,2	0,5	2
Pb	0,000	0,000	0,000	0,000	< 0,2	< 0,5	5	10	25	50
Fluoruro	< 1	< 1	< 1	< 1	< 4	< 10	60	150	200	500
Cloruro	14	50	110	174	< 550	< 800	10000	15000	17000	25000
Sulfato	34	50	3200	6110	< 560	< 1000	10000	20000	25000	50000
Condiciones de la muestra de ensayo										
C (µS/cm)	56,5	32,5	1398	651						
Tª (°C)	27,9	25,5	26,4	26,5						
pH	8,88	9,38	10,4	10,93						

4.3.3. Caracterización del filler silíceo y de las cenizas de biomasa

4.3.3.1. Densidad

De acuerdo con el procedimiento indicado por las normas UNE-EN 1097-3/99 y UNE 80103/2013 se determina la densidad real y aparente del SF, BL y BP

Tabla 4.3: Propiedades físico-mecánicas de SF, BL y BP.

Características	Norma	SF	BL	BP
Densidad aparente (g/cm ³)	UNE-EN 1097-3/99	1,107	0,313	0,354
Densidad Real (g/cm ³)	UNE 80103/2013	2,622	2,213	2,446

4.3.3.2. Granulometría

La Fig. 4.6 muestra el tamaño de partícula del filler silíceo (SF) y de las cenizas volantes de biomasa de la Planta de Linares (BL) y de Puente Genil (BP) medido con un analizador Mastersizer S (Malvern instruments) usando etanol como dispersante. El tamaño de partícula está comprendido entre 0,1 y 100 micras, las dos cenizas presentan una distribución bimodal con un máximo de pequeña intensidad en torno a 0,3 -0,4 micras y otro de gran intensidad en torno a 5 micras. El SF presenta la mayor parte de las partículas en torno a 20 micras.

El tamaño de partícula en el presente capítulo está en el rango de los tamaños de partícula de las cenizas volantes de biomasa utilizadas por Rajamma y col. (2009) que utilizaron dos tipos con tamaños de partícula por debajo de 50 micras, para lo cual procedieron a un tamizado previo al amasado con el objetivo de eliminar partículas mayores de 75 micras.

4.3.3.3. Caracterización superficial de las partículas mediante microscopía electrónica de barrido (SEM)

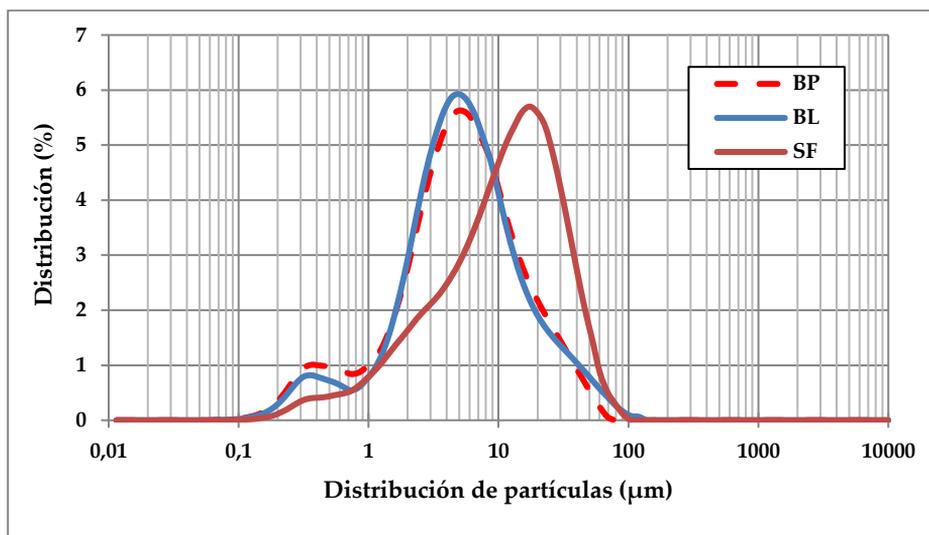


Figura 4.6: Distribución del tamaño de partículas.

El tamaño de las partículas de acuerdo con la distribución del tamaño de partícula (Fig. 4.6) concuerda con las microfotografías del microscopio electrónico de barrido, JEOL JSM-6300, trabajando a un voltaje de 20 Kv, que se recogen en la (Fig. 4.7), en la que queda de manifiesto que el tamaño de partículas del SF es mayor que el de BL y BP. Así mismo la morfología de las partículas SF presentan mayor cantidad de aristas que las de biomasa, lo cual está de acuerdo con el procedimiento de obtención de estas, ya que el SF se obtiene por machaqueo y las cenizas de biomasa mediante un proceso de calefacción. La forma de las partículas de las cenizas volantes de biomasa es irregular, lo que coincide con resultados obtenidos por (Rajamma y col. 2009).

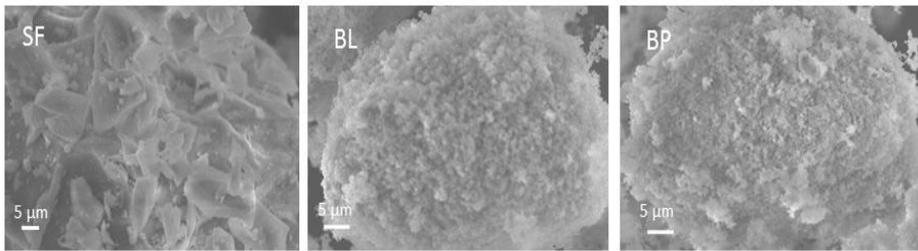


Figura 4.7: Microfotografías de microscopio electrónico de barrido (SEM) de las muestras SF, BL y BP.

4.3.3.4. Distribución del tamaño de poro

La textura de las cenizas se hizo mediante isoterma de adsorción-desorción de nitrógeno. La tabla 5 muestra que las partículas de BL y BP tuvieron una superficie BET 20 veces mayor que la superficie del SF (5,53 y 5,07 m²/g respecto a 0,25 m²/g). La (Fig. 4.8) muestra la distribución del tamaño de poro para el filler SF y las cenizas volantes de biomasa BL y BP en el rango entre 1,75 y 105 nm. El SF tuvo un volumen de poro despreciable comparado con BL y BP. El máximo contenido de poros en las muestras BL y BP estuvo entre 1,75 y 3,5nm y en la zona de 40 y 90nm. Por tanto, en las cenizas de biomasa se observó la presencia de mesoporos de tamaño pequeño y también la presencia de macroporos.

4.3.3.5. Composición química

El análisis de la composición se llevó a cabo con la técnica de microsonda electrónica acoplada a un microscopio electrónico de barrido, JEOL JSM-6300, trabajando con un potencial de aceleración de 20 Kv y una distancia de trabajo de 15mm. La Tabla 4.4 recoge la composición de los fillers SF, BL y BP. En el caso del SF se trata de un material de carácter sílice (SiO₂) y en el caso de las cenizas BL y BP se observa una gran cantidad de Potasio, Cloro y Carbono.

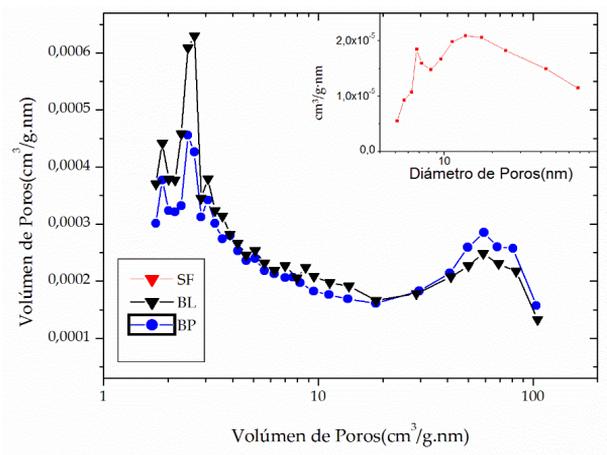


Figura 4.8: Distribución del tamaño de poro.

Tabla 4.4: Composición de los filler SF, BL, BP.

Elemento	SF	BL	BP
C	-	15,12%	16,22%
Na ₂ O	-	-	0,40%
SO ₃	-	6,82%	13,71%
Cl	-	14,74%	10,31%
K ₂ O	-	60,01%	55,02%
CaO	-	2,52%	2,55%
CuO	-	0,79%	1,78%
SiO ₂	100%	-	-

Estos resultados están de acuerdo con los obtenidos mediante análisis de difracción de rayos X (Fig.4.9), realizados con un difractómetro Bruker D8-Discover A25 con radiación Cu-K α .

La composición química de las cenizas de biomasa está íntimamente relacionada con el tipo de biomasa utilizada y la temperatura de combustión (Vassilev y col., 2013; Coda y col., 2007). Algunos autores observan como principal componente de las cenizas de biomasa el CaO (Coda y col., 2007), otros el SiO₂ (Vassilev y col., 2013), algunos otros muestran que el K₂O supera el 51% (Capablo y col., 2009).

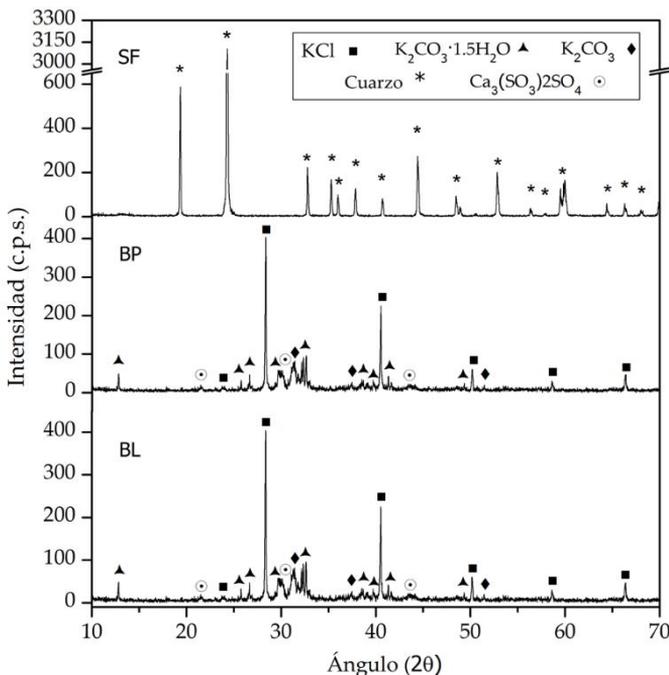


Figura 4.9: Patrón de DRX de BL y BP.

4.3.3.6. Composición mineralógica

Para determinar la composición mineralógica se realizó los difractogramas de rayos X del SF y de las cenizas de biomasa.

Para la muestra de SF la única fase presente ha sido cuarzo (33-1161) [JCPDS, 1995]. Para las cenizas de biomasa la fase mayoritaria fue Cloruro Potásico (KCl) (JCPDS, 1995) y en menor medida otros compuestos como el carbonato potásico (K_2CO_3) (JCPDS, 1995) y en menor medida $K_2CO_3 \cdot 1,5H_2O$ (JCPDS, 1995). Similares resultados fueron obtenidos por (Guo y col., 2015). Sin embargo, en la bibliografía la composición mayoritaria de las cenizas volantes de biomasa (FA) utilizadas contenían cuarzo (SiO_2) y calcita (SiO_2) (Rajamma y col., 2009; Esteves y col., 2012) y fases minoritarias como microlina ($KAlSi_3O_8$) y periclusa (MgO) (Esteves y col., 2012). Maschio y col. (2011) utilizaron FA de biomasa que contenían principalmente calcita ($CaCO_3$), dióxido

(CaMgSi₂O₆) Cal (CaO), periclusa (MgO) y cantidades menores de arcanite (K₂SO₄), silvita (KCl).

4.3.3.7. Análisis de infrarrojos (FT-IR)

El espectro de infrarrojo con transformada de Fourier (FT-IR) de las muestras SF, CBL y CBP se muestran en la Fig. 4.10. La forma del espectro del SF está de acuerdo con la bibliografía (Vázquez y col. (1981) y García Calvo y col., 2013). En relación al espectro de SF las bandas que aparecen a 1170 cm⁻¹ y 1028 cm⁻¹ corresponden a las vibraciones de tensión asimétrica de Si-O-Si, y el doblete característico del cuarzo a 796 y 777 cm⁻¹ corresponde a la vibración de tensión simétrica de los enlaces Si-O-Si. En relación a los espectros de las muestras de las cenizas volantes de biomasa BL y BP la banda que aparece la frecuencia a 1647 cm⁻¹ corresponde a la banda de flexión de los grupos OH⁻ (Farmer, 1974), las bandas que aparecen a 1413 cm⁻¹ y 873 cm⁻¹ corresponde a las vibraciones de tensión asimétrica y de flexión del carbonato (Hidalgo y col., 2008). La banda que aparece a 1126 cm⁻¹ corresponde al carbonato potásico hidratado. Las bandas que aparecen a 981cm⁻¹ y 621 cm⁻¹ corresponden a la presencia de sulfatos (Nakamoto, 2008)

4.3.3.8. Análisis termogravimétrico

El análisis termogravimétrico (Fig. 4.11) mostró la pureza del filler SF ya que no se observó ninguna pérdida de peso. En el caso de las cenizas BL y BP el pico endotérmico (ATD) en torno a 100°C y la pérdida de peso (ATG) asociada al mismo se debe a la pérdida de agua de las cenizas, el pico endotérmico en torno a 626°C y que no se corresponde con ninguna pérdida de peso se debe al proceso de fusión del KCl. La pérdida de peso a partir de 800°C se debe a la eliminación de CO₂ y la transformación del carbonato potásico (K₂CO₃) en K₂O. (Lehman y col., 1998)

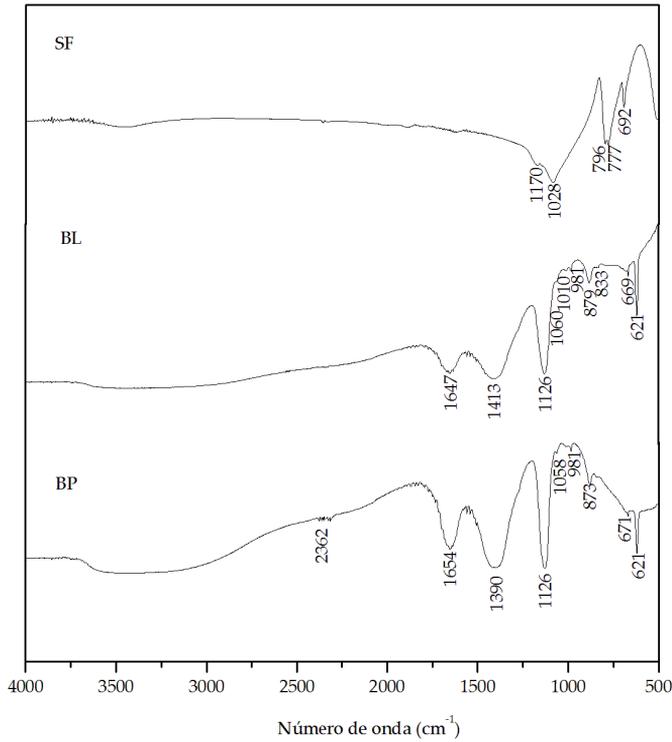


Figura 4.10: Infrarrojos SF, BL y BP.

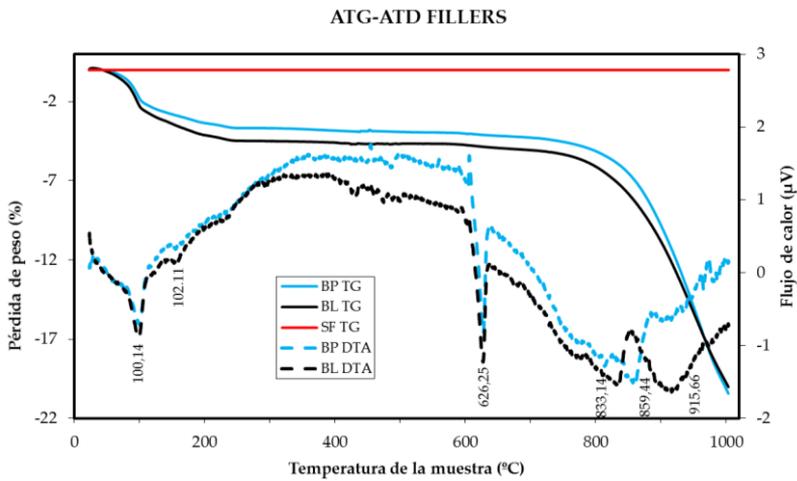


Figura 4.11: ATG de SF, BL y BP.

4.3.3.9. Lixiviación de cenizas volantes de biomasa

La Tabla 4.5 muestra los resultados obtenidos de lixiviación de los dos tipos de cenizas utilizadas. De igual forma que los áridos utilizados (AN y AR), los resultados son analizados con el criterio de EU Landfill, y comparados con los valores que marca la Directiva 2003/33/EC. Ambas cenizas son clasificadas como residuo peligroso

Tabla 4.5: Concentraciones lixiviadas de BL y BP (mg / kg) y criterios de aceptación de residuos (Decisión 2003/33 / CE del Consejo).

Elemento (mg/kg)	Criterios Directiva de vertederos de la UE 2003/33 / EC				
	BL	BP	Residuo inerte	Residuo no peligroso	Residuo peligroso
	L/S=10	L/S=10	L/S=10	L/S=10	L/S=10
Cr	17,238	36,796	< 0,5	10	70
Ni	0,43	0	< 0,4	10	40
Cu	1,351	0	< 2	50	100
Zn	0,005	0,006	< 4	50	200
As	10,766	4,484	< 0,5	2	25
Se	3,186	2,308	< 0,1	0,5	7
Mo	3,068	1,949	< 0,5	10	30
Cd	0	0	< 0,04	1	5
Sb	0,115	0,104	< 0,06	0,7	5
Ba	2,498	0	< 20	100	300
Hg	0,076	0	< 0,01	0,2	2
Pb	2,889	0,026	< 0,5	10	50
Fluoruro	2	(*)	< 10	150	500
Cloruro	71000	42600	< 800	15000	25000
Sulfato	102330	67390	< 1000	20000	50000
Condiciones de la muestra de ensayo					
C (µS/cm)	51,75	30,36			
Tª (°C)	13,85	13,85			
pH	10,29	12,74			

(*): Muestra no susceptible de medida IC por su elevado contenido en sales

En ambas cenizas (BL y BP), se observan concentraciones elevadas de los metales Cr, As y Se. De igual forma, los cloruros y sulfatos superan el máximo que marca la directiva 2003/33/EC (25000 mg/kg y 50000 mg/kg respectivamente) para ser clasificado el material como residuo peligroso.

Cabrera y col. (2016) estudiaron la lixiviación de 30 muestras de cenizas de fondo de biomasa procedentes de diferentes plantas situadas en Córdoba, Málaga y Jaén donde observaron que los elementos más conflictivos fueron el As y Hg. La concentración de As presente se encontraba en niveles peligrosos en el 43,3% de las muestras, y a niveles no peligrosos e inertes en el otro 56,7%. El Hg se detectó a concentraciones peligrosas en el 20% de las muestras y a niveles no peligrosos e inertes en el otro 80%. Otros elementos relevantes encontrados fueron el Cr, Ni, Cu, Se y Mo, superando los valores límite de residuos inertes en la mayoría de los casos. Estos autores destacaron que las cenizas de fondo de biomasa presentaban un alto potencial de contaminación por lo que fueron clasificadas como residuos peligrosos, esa carga contaminante fue reducida después de su tratamiento con cemento, por lo que indicaron que dichos materiales pueden ser reutilizados desde el punto de vista medioambiental, siempre y cuando se lleve a cabo una gestión adecuada.

4.4. Diseño experimental

Este estudio pretende evaluar el uso de cenizas volantes de biomasa como material sustitutivo del filler silíceo en la fabricación de morteros de albañilería hechos con arena natural y con arena reciclada de RCD. Para ello se emplearon morteros con dosificación volumétrica: 1:6:0,5 (cemento: arena: filler).

Los áridos fueron secados en estufa antes de realizar las amasadas, para evitar las correcciones de humedad en las diferentes dosificaciones,

y así manejar las mismas cantidades de materiales en todos los casos. Considerando un volumen de 1600 cm³, la estimación del peso necesario de los diferentes componentes en las amasadas se realizó con la siguiente expresión (Ec.1):

$$(Ec.1) \text{ Masa requerida (g)} = \frac{\text{densidad } \left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}\right) \times 1600\text{cm}^3 \times n^\circ \text{ partes}}{7,5 \text{ partes totales}}$$

En la Tabla 4.6 se muestra la dosificación empleada para la fabricación de los seis tipos de morteros. El agua se ajustó experimentalmente hasta conseguir una consistencia de 175 ± 10 mm, siguiendo la norma (UNE-EN 1015-3:2000). Los morteros que no cumplían con este valor eran rechazados.

Tabla 4.6: Proporciones de la mezcla de mortero (masa en gramos por cada 1600 cm³ de mortero).

	Tipo de mortero	Cemento	Árido		Filler			Agua	a/c	Consistencia media (mm)	SD
		Cemento	AN	AR	SF	BL	BP				
FAMILIA-1	AN-SF	672	3398	-	280	-	-	550	0,82	172	7
	AN-BL	672	3398	-	-	236		515	0,77	178	2
	AN-BP	672	3398	-	-	-	261	716	1,06	169	2
FAMILIA -2	AR-SF	672	-	3113	280	-		690	1,03	178	6
	AR-BL	672	-	3113	-	236		620	0,92	173	2
	AR-BP	672	-	3113	-	-	261	878	1,31	171	5

La denominación de las diferentes mezclas de mortero es la que se enuncia a continuación:

FAMILIA-1: Probetas elaboradas con arena natural.

FAMILIA-2: Probetas elaboradas con arena reciclada de RCD

AN-SF: Probetas de mortero elaboradas con arena natural y filler silíceo.

AN-BL: Probetas de mortero elaboradas con arena natural y cenizas volantes de biomasa de Linares.

AN-BP: Probetas de mortero elaboradas con arena natural y cenizas volantes de biomasa de Puente Genil.

AR-SF: Probetas de mortero elaboradas con arena reciclada de RCD y filler silíceo.

AR-BL: Probetas de mortero elaboradas con arena reciclada de RCD y cenizas volantes de biomasa de Linares.

AR-BP: Probetas de mortero elaboradas con arena reciclada de RCD y cenizas volantes de biomasa de Puente Genil.

4.4.1. Ensayos realizados a los morteros

El mortero fresco fue caracterizado por la consistencia (EN 1015-3: 2000), densidad del mortero fresco (EN 1015-6:1999), aire ocluido (EN 1015-7: 1999) y trabajabilidad (EN 1015- 9: 2000).

El mortero endurecido fue caracterizado por la densidad aparente en seco (UNE-EN 1015-10:2000), resistencia a flexión y compresión (UNE-EN 1015-11:2000) a 28 y 180 días, retracción (UNE 83831: 2010) a 2, 7, 14 y 28 días en probetas de 40 mm × 40 mm × 160 mm, absorción de agua por capilaridad (UNE-EN 1015-18: 2002) y permeabilidad al vapor de agua (UNE-EN 1015-19:1999). También se determinó la resistencia inicial a cortante (UNE-EN 1052-3: 2003). Para obtener los valores medios de cada propiedad se hicieron cuatro repeticiones.

4.5. Resultados y discusión

4.5.1. Evolución de la consistencia del mortero

Para estudiar la evolución de la consistencia del mortero con el tiempo se hicieron medidas en la mesa de sacudidas (EN 1015-3: 1999) cada 15 min, hasta conseguir una consistencia inferior a 105 mm, ya que a partir de esta medida el mortero podía considerarse no trabajable. Las

Fig. 4.13-4.14 muestran la evolución de la consistencia con el tiempo para los morteros de la Familia 1 y 2.

En primer lugar se evalúa la consistencia de los morteros de la Familia-1 (AN). En la Fig. 4.12 se observa como al reemplazar el SF por BL (AN-SF vs. AN-BL) la consistencia a lo largo del tiempo se ve perjudicada. En el caso del AN-BP se observa como la consistencia prácticamente no varía en comparación con el mortero de referencia (AN-SF). El diferente comportamiento de los morteros está justificado por la diferente relación a/c necesaria en el amasado para conseguir una consistencia constante (Tabla 4.6). En los morteros AN-BL se empleó una relación a/c de 0,77 (515 g de agua), inferior incluso al mortero de referencia (a/c = 0,82), lo que justifica su rápida pérdida de trabajabilidad en comparación con el mortero AN-SF y AN-BP. Sin embargo, en el mortero AN-BP se empleó una relación a/c de 1,06 (716 g de agua), lo que explica un comportamiento similar al mortero de referencia AN-SF.

Se puede concluir que en los morteros con áridos naturales el uso de cenizas de biomasa disminuye el tiempo de trabajabilidad, lo cual puede compensarse aumentando la relación agua/cemento.

En el caso de los morteros de la Familia-2 (AR), la relación a/c de los morteros AR-SF, AR-BL y AR-BP debió aumentarse un 25,6%, 19,5% y 23,6% con respecto a los morteros AN-SF, AN-BL y AN-BP respectivamente para mantener una consistencia constante (Tabla 4.6). Esto es debido a la mayor absorción de agua de los áridos reciclados de RCD. Este hecho ya ha sido evidenciado en trabajos previos donde la trabajabilidad ha sido identificada como una de las propiedades más perjudicadas por el uso de áridos reciclados de RCD en morteros de albañilería (Ledesma y col., 2015; Fernández-Ledesma y col., 2016).

En la Fig. 4.13 se observa un comportamiento similar de los morteros AR-SF y AR-BL, a pesar de que la relación a/c fue ligeramente inferior en los morteros AR-BL que en los morteros AR-SF. Por tanto, la influencia negativa de la ceniza de biomasa en la trabajabilidad no se

aprecia en los morteros hechos con áridos reciclados debido al elevado valor de la relación a/c empleada. En el caso de los morteros AR-BP presentan un mejor comportamiento en la trabajabilidad con respecto a los morteros AR-SF y AR-BL, lo cual está relacionado con su mayor valor de relación a/c.

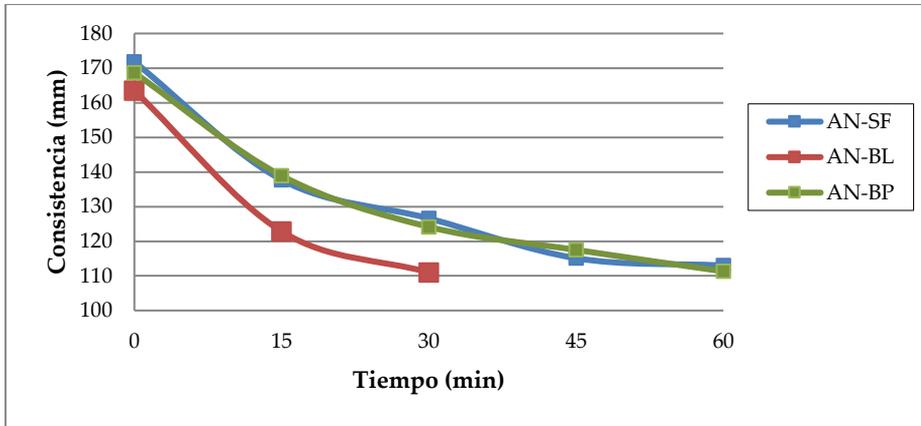


Figura 4.12: Consistencia a lo largo del tiempo AN.

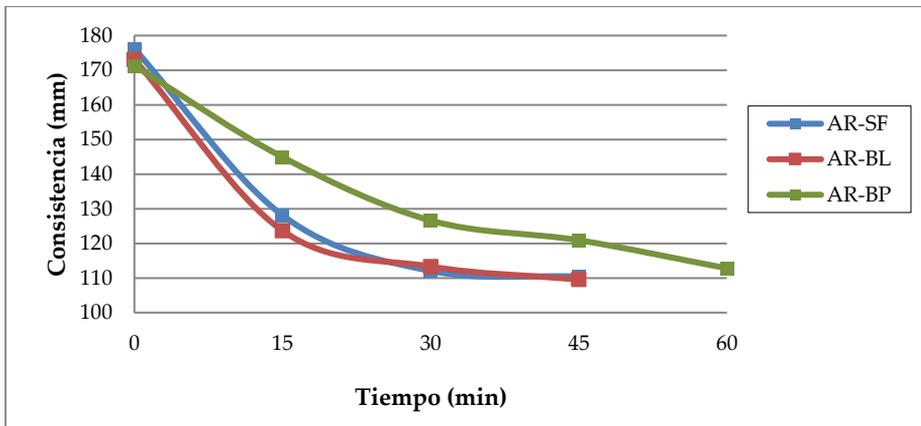


Figura 4.13: Consistencia a lo largo del tiempo AR.

4.5.2. Densidad del mortero fresco

Las Tabla 4.7 muestra para cada una de las familias de mortero el valor medio de densidad del mortero fresco de las cuatro repeticiones,

la desviación estándar y los incrementos/decrementos con respecto a los morteros de referencia AN-SF y AR-SF.

En la Familia-1 el mortero AN-BL muestra un valor ligeramente superior al mortero AN-SF, mientras que el mortero AN-BP un valor ligeramente inferior, lo cual puede estar más bien relacionado con la relación a/c empleada en las mezclas. A mayor relación a/c menor densidad del mortero fresco.

Tendencia similar a la recogida en el trabajo de Rajamma y col. (2009) quién atribuyeron las ligeras variaciones en la densidad del mortero fresco al grado de compactación obtenido en la preparación de las probetas de morteros y a las diferentes relaciones a/c empleadas.

En la Familia-2 se observa una tendencia similar, el mortero AR-BL con menor relación a/c presenta una mayor densidad del mortero fresco, mientras que el mortero AR-BP con mayor relación a/c presenta la menor densidad de mortero fresco. Todos los morteros de la Familia-2 muestran menor densidad que los morteros de la Familia-1, lo cual está justificado por la menor densidad de la arena reciclada frente a la arena natural (Jiménez y col., 2013; Ledesma y col., 2014; Ledesma y col., 2015; Fernández-Ledesma y col., 2016).

Tabla 4.7: Densidad del mortero fresco.

	Tipo de mortero	Media (g/cm ³)	Δ (%)	SD
Familia-1	AN-SF	2,16	0,0	0,02
	AN-BL	2,20	2,0	0,01
	AN-BP	2,13	-1,4	0,02
Familia-2	AR-SF	1,95	0,0	0,03
	AR-BL	1,98	1,7	0,02
	AR-BP	1,87	-4,0	0,02

4.5.3. Aire ocluido

La Tabla 4.8 muestra para cada una de las familias de mortero el valor medio de aire ocluido de las cuatro repeticiones, la desviación estándar y los incrementos/decrementos con respecto al mortero de referencia

En la Familia-1 los morteros fabricados con ceniza de biomasa (AN-BL y AN-BP) presentan un menor porcentaje de aire ocluido que el mortero de referencia (AN-RF). La Familia-2 presenta un comportamiento similar. Esto puede estar justificado por el menor tamaño de partícula de las cenizas de biomasa (BL y BP) con respecto al SF (Figura 12) lo que provoca un mayor efecto de relleno de poros.

Los morteros de la Familia-2 tienen un porcentaje de aire ocluido mayor que los morteros de la Familia-1, esto es debido a la mayor porosidad de la arena reciclada frente a la arena natural (Jiménez y col., 2013).

Tabla 4.8: Aire ocluido del mortero fresco.

	Tipo de mortero	Media (%)	Δ (%)	SD
Familia-1	AN-SF	4,43	0	0,88
	AN-BL	3,8	-14,1	0,43
	AN-BP	1,66	-62,5	0,36
Familia-2	AR-SF	6,05	0	0,81
	AR-BL	5,48	-9,50	0,34
	AR-BP	4,32	-28,60	0,42

4.5.4. Tiempo de Trabajabilidad

Las Tabla 4.9 muestra para cada una de las familias de mortero el valor medio del tiempo de trabajabilidad de las cuatro repeticiones, la desviación estándar y los incrementos/decrementos con respecto a los morteros de referencia (AN-SF y AR-SF).

En el caso de emplear AN-BL y AN-BP se aprecia como el tiempo de trabajabilidad es mucho menor que en el caso del mortero de referencia. La misma tendencia se observa en los morteros AR-BL y AR-BP con respecto al AR-SF. Estos resultados coinciden con Rajamma y col., (2015), quienes observaron que por lo general al introducir cenizas volantes de Biomasa (BFA) por encima del 10% se producía una disminución en el tiempo de fraguado en muestras preparadas con una relación a/c fija, lo cual fue justificado por la mayor capacidad de adsorción de agua revelada por las cenizas volantes de biomasa y por la reducción concomitante de agua libre disponible en la mezcla. Llegando a la conclusión de que el aumento del contenido de cenizas indujo cambios predecibles en el tiempo de fraguado.

Al igual que ocurría con la evolución de la consistencia, el efecto negativo del uso de cenizas volantes de biomasa en el tiempo de trabajabilidad de los morteros es ligeramente menor en el caso de los morteros hechos con arenas recicladas. El tiempo de trabajabilidad es menor en las cenizas BL que en las cenizas BP, posiblemente debido a la menor relación a/c de los morteros hechos con BL.

Tabla 4.9: Tiempo de trabajabilidad del mortero fresco.

	Tipo de mortero	Media (min)	Δ (%)	SD
Familia-1	AN-SF	96	0,0	4
	AN-BL	21	-78,2	3
	AN-BP	31	-67,7	4
Familia-2	AR-SF	64	0,0	6
	AR-BL	24	-62,5	2
	AR-BP	35	-45,3	3

4.5.5. Densidad del mortero endurecido

La Tabla 4.10 muestra para cada una de las familias de mortero el valor medio de densidad del mortero endurecido a los 28 días de edad de las cuatro repeticiones, la desviación estándar y los

incrementos/decrementos con respecto a los morteros de referencia (AN-SF y AR-SF).

En el caso de la densidad del mortero endurecido se observa una tendencia similar a la densidad del mortero fresco. En la Familia-1 y Familia-2 se obtiene que a mayor relación a/c menor densidad del mortero endurecido.

Como ya se ha puesto de manifiesto en trabajos previos (Jiménez y col., 2013; Ledesma y col., 2014, 2015, 2016) el uso de AR disminuye la densidad de los morteros. Todos los morteros de la Familia-2 muestran menor densidad que los morteros de la familia-1, lo cual está justificado por la menor densidad de la arena reciclada frente a la arena natural (Jiménez y col., 2013; Ledesma y col., 2014; Ledesma y col., 2015; Fernandez-Ledesma y col., 2016).

Tabla 4.10: Densidad del mortero seco.

	Tipo de mortero	Media (g/cm³)	Δ (%)	SD
Familia-1	AN-SF	2,06	0,0	0,01
	AN-BL	2,07	0,3	0,04
	AN-BP	1,96	-5,3	0,01
Familia-2	AR-SF	1,74	0,0	0,01
	AR-BL	1,78	1,9	0,01
	AR-BP	1,62	-7,0	0,01

4.5.6. Resistencia a flexión y compresión

Las Tablas 4.11 y 1.12 y las Figuras 4.14, 4.15, 4.17 y 4.18 muestran para cada una de las familias de mortero el valor medio de la resistencia a compresión y flexión a 7, 28, 90 y 180 días de edad para cada una de las cuatro repeticiones, la desviación estándar y los incrementos/decrementos con respecto a los morteros de referencia (AN-SF y AR-SF).

En la Familia-1 se observa que la sustitución del SF por las cenizas de biomasa BL y BP reduce la resistencia a compresión a 28 días un 20,3% y 34,7% respectivamente, mientras que la resistencia a flexión disminuye un 11% y 15% respectivamente. La menor pérdida de resistencia mecánica del mortero AN-BL respecto al mortero AN-BP puede estar justificada por la menor relación a/c empleada en su fabricación (Tabla 4.6) y a la mayor densidad del mortero AN-BL. La resistencia a compresión y a flexión se incrementa ligeramente con el tiempo en todos los morteros ensayados. A los 180 días las caídas de resistencia a compresión eran del 13,3% y 39,5% en los morteros AN-BL y AN-BP respectivamente, mientras que las resistencias a flexión cayeron un 14% y 38,1% respectivamente.

Tabla 4.11: Resistencia a flexión y compresión a 7, 28, 90 y 180 días en los morteros hechos con AN (Familia-1).

	AN	RESISTENCIA A FLEXIÓN			RESISTENCIA A COMPRESIÓN		
		Media (MPa)	Δ (%)	SD	Media (MPa)	Δ (%)	SD
7DIAS	AN-SF	5,5	0,0	0,5	24,6	0,0	1,4
	AN-BL	4,1	-25,8	0,3	19,6	-20,2	0,4
	AN-BP	3,7	-32,8	0,2	15,2	-38,1	0,7
28DIAS	AN-SF	6,7	0,0	0,6	27,7	0,0	1,4
	AN-BL	5,9	-11,0	0,6	22,1	-20,3	0,7
	AN-BP	5,7	-15,0	0,5	18,1	-34,7	0,8
90DIAS	AN-SF	7,1	0,0	0,6	30,0	0,0	2,6
	AN-BL	6,3	-11,2	0,4	25,4	-15,2	1,0
	AN-BP	5,2	-12,6	0,5	18,7	-37,5	0,4
180 DIAS	AN-SF	8,5	0,0	1,3	33,6	0,0	2,3
	AN-BL	7,3	-14,0	0,2	29,1	-13,3	0,9
	AN-BP	5,2	-38,1	0,8	20,3	-39,5	0,5

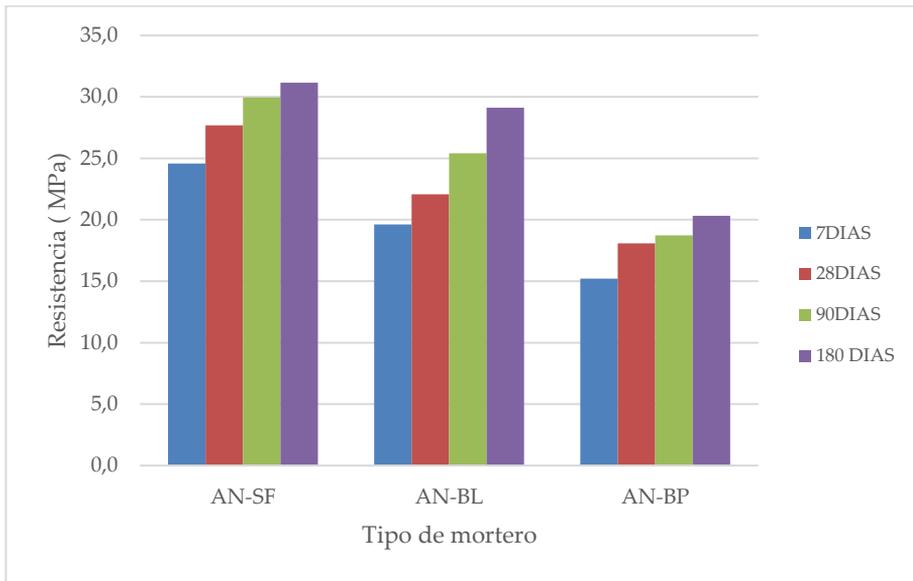


Figura 4.14: Resistencia a compresión 7, 28, 90 Y 180 días AN (Familia-1).

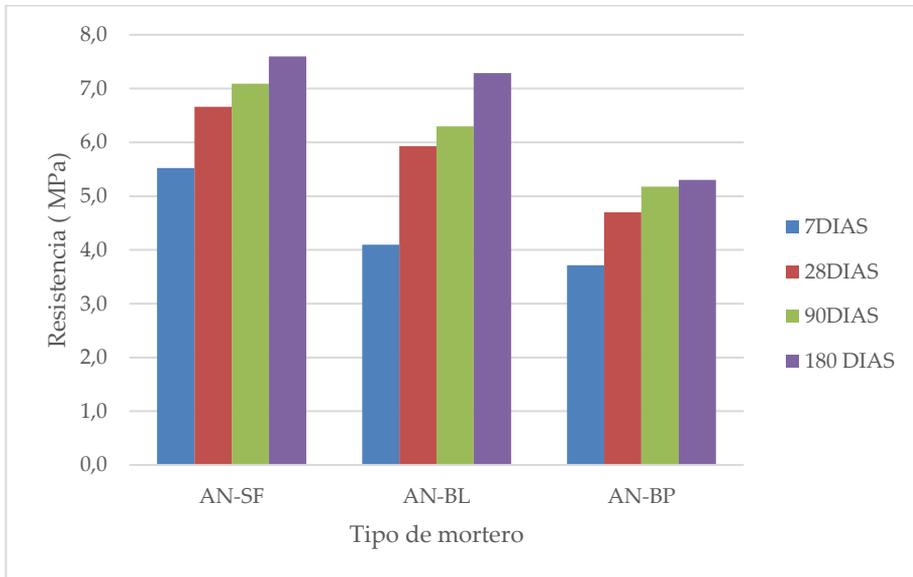


Figura 4.15 Resistencia a flexión 7, 28, 90 Y 180 días AN (Familia-1)

La resistencia mecánica está relacionada con las fases presentes en los difractogramas de rayos x (Fig. 4.16), la muestra AN-SF presenta una cantidad de cuarzo respecto a la calcita superior a la muestra AN-BL y 254

AN-BP, es por esto que su resistencia mecánica final es superior a la de las muestras AN-BL y AN-BP. Adicionalmente la muestra AN-BL presenta un contenido de cuarzo respecto a calcita mayor que la muestra AN-BP como se desprende en la relación de intensidades de los picos máximos correspondientes a las fases cuarzo y calcita en sus respectivos difractogramas. En consecuencia, el efecto puzolánico será más acusado en las muestras AN-SF y AN-BL, lo cual está de acuerdo con las pérdidas de resistencia a 180 días que son menores para la muestra AN-BL que para la muestra AN-BP respecto a la de referencia AN-SF.

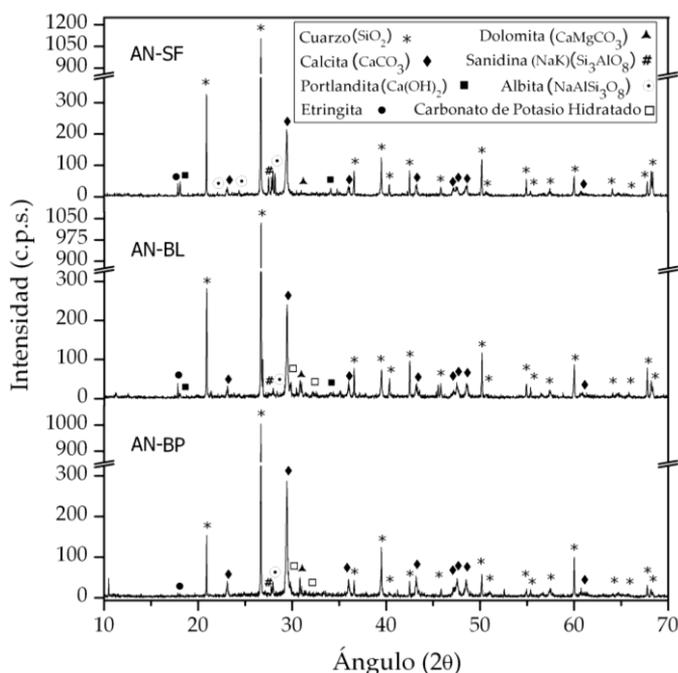


Figura 4.16: Patrón de DRX AN-SF, AN-BL, AN-BP.

Rajamma y col. (2009) observaron que al sustituir el 30% de cemento por cenizas volantes en los morteros, disminuía la resistencia, puesto que la resistencia a compresión obtenida fue en torno al 60% del mortero de referencia, mientras que las muestras que fueron reemplazadas por un 10% y 20% mostraron menor empeoramiento. Estos autores concluyeron con que el límite de sustitución de cenizas volantes de

biomasa en cemento se puede fijar en un 20% para garantizar la calidad de los morteros.

Esta misma tendencia quedó reflejada en el trabajo de Rajamma y col. (2015), quienes observaron que las resistencias mecánicas disminuían en comparación con el mortero de referencia a medida que se aumentaba el porcentaje de sustitución de cenizas volantes de biomasa. En dicho estudio, las muestras que contenían un 10% de cenizas mostraron resistencias del orden del 95% (BFA1) y 90% (BFA2) del mortero de referencia, aquellos que contenían un 20% de cenizas las resistencias estaban en torno al 80%-82% y en el caso de sustituir al 30% la resistencia era del 80%, comparándolas con el de referencia. Por lo que llegaron a la conclusión de que la incorporación de cenizas volantes de biomasa no obstaculizaba perceptiblemente la resistencia mecánica de los morteros, aunque sí la disminuía.

Cruz –Yusta y col. (2011) sustituyeron parcialmente cemento por cenizas volantes de biomasa procedentes del orujo, y observaron que tan sólo las muestras fabricadas con un 10% de sustitución de cemento presentaban una resistencia adecuada para uso comercial, debido a su baja actividad puzolánica. Con un 10% de sustitución, la caída de resistencia mecánica era de un 8% con respecto al mortero de referencia.

Maschio y col., (2011) Observaron que en aquellos materiales que contenían un 5% en peso de cenizas, la resistencia a compresión era de la misma magnitud que los de referencia; por el contrario, a medida que se aumentaban las cantidades de ceniza la resistencia disminuía progresivamente.

En otros estudios en los que se empleó BBA en lugar de BFA se veía la misma tendencia, por ejemplo, Carrasco y col. (2014) mostraron en su trabajo cómo la resistencia a la compresión disminuía en los bloques de construcción que contenían BBA. Valores similares fueron obtenidos por Beltrán y col. (2016).

En la Familia-2 la sustitución del SF por las cenizas de biomasa BL incrementa la resistencia a compresión a 28 días un 17,6% con respecto al mortero de referencia (AR-SF), mientras que el uso de BP disminuye la resistencia a compresión a 28 días un 31,9%. Desde un punto de vista físico este hecho sólo puede estar justificado por la mayor relación a/c empleada en el mortero AR-BP ($a/c = 1,31$) frente a la relación a/c empleada en el AR-BL ($a/c = 0,92$). La mayor resistencia a compresión de los morteros AR-BL se cumple para todas las edades de ensayo. A los 180 días el aumento de resistencia a compresión del AR-BL con respecto al AR-SF era del 20,6%, mientras que la pérdida de resistencia a compresión del AR-BP con respecto al AR-SF era del 30,8%.

Tabla 4.12: Resistencia a flexión y compresión 7, 28, 90 y 180 días en los morteros hechos con AR (Familia-2)

	AR	RESISTENCIA A FLEXIÓN			RESISTENCIA A COMPRESIÓN		
		Media (MPa)	Δ (%)	SD	Media(MPa)	Δ (%)	SD
7DIAS	AR-SF	4,4	0,0	0,2	18,0	0,0	1,2
	AR-BL	4,8	9,9	0,6	21,8	21,0	0,4
	AR-BP	3,4	-21,5	0,1	11,9	-34,1	0,5
28DIAS	AR-SF	4,7	0,0	0,4	19,5	0,0	1,5
	AR-BL	5,1	8,5	0,4	22,9	17,6	0,6
	AR-BP	3,7	-21,3	0,4	13,3	-31,9	0,6
90DIAS	AR-SF	5,1	0,0	0,5	19,9	0,0	1,4
	AR-BL	5,6	9,8	0,5	24,0	20,6	0,9
	AR-BP	4,1	-20,3	0,5	13,8	-30,8	0,7
180 DIAS	AR-SF	5,6	0,0	0,3	20,5	0,0	1,2
	AR-BL	6,0	7,1	0,3	24,5	19,3	0,1
	AR-BP	4,5	-19,6	0,4	14,3	-30,2	0,6

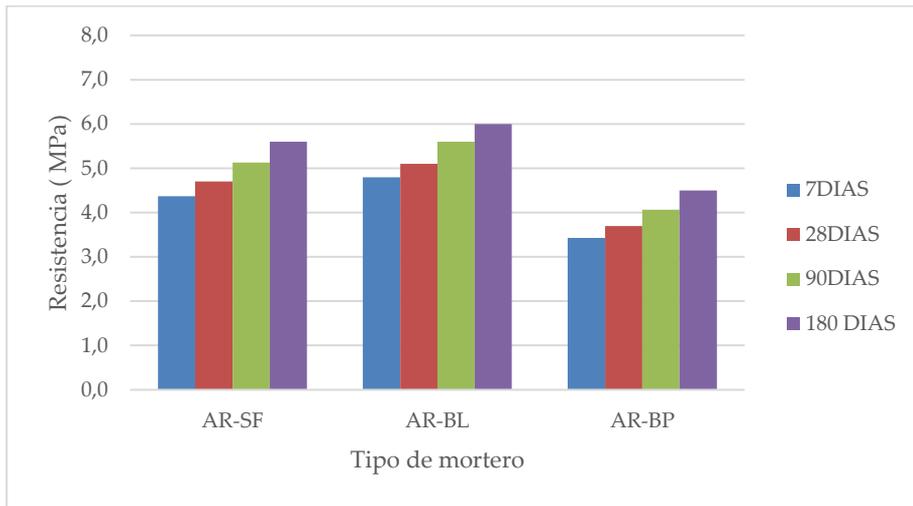


Figura 4.17: Resistencia a flexión 7, 28, 90 y 180 días AR (Familia-2).

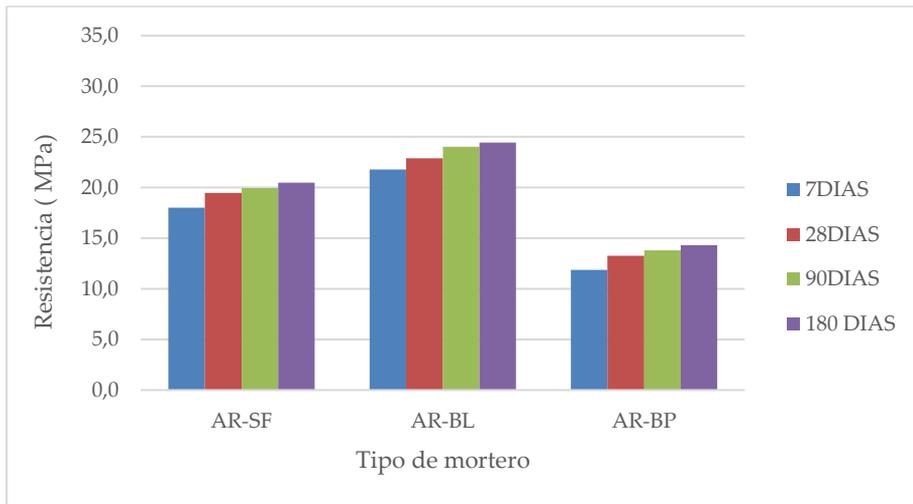


Figura 4.18: Resistencia a compresión 7, 28, 90 y 180 días AR (Familia-2).

En relación a la resistencia a flexión, el mortero AR-BL presenta valores similares al mortero de referencia AR-SF a los 7 y 180 días de edad, y ligeramente superiores a los 28 y 90 días. El mortero AR-BP presenta valores un 21,5% y 20,3% más bajos que el mortero de referencia AR-SF a los 28 y 180 días de edad respectivamente. En la

familia 2 la resistencia a compresión y a flexión se incrementa ligeramente con el tiempo en todos los morteros ensayados.

El aumento de resistencia de AR-BL frente a AR-SF puede ser debido a la menor relación a/c para la muestra AR-BL, y a la presencia de un pequeño contenido de yeso en la muestra AR-SF. La mayor caída de resistencia AR-BP respecto a las muestras AR-SF y AR-BL, está relacionado con su mayor relación a/c y el mayor contenido de carbonato cálcico observado en su difractograma de rayos x respecto a las otras dos muestras (Fig. 4.19).

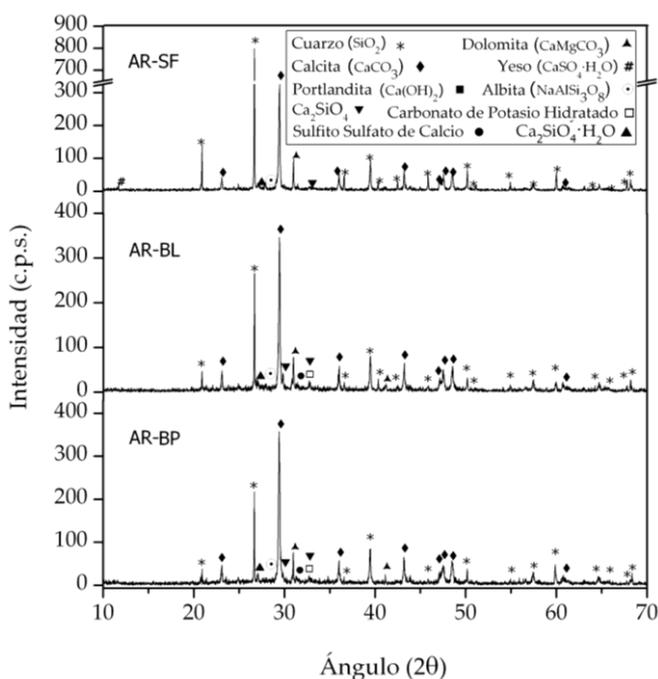


Figura 4.19: Patrón de DRX AR-SF, AR-BL, AR-BP.

Para cada una de las familias de mortero y tipo de árido empleado, existe una relación aproximadamente lineal entre la resistencia a compresión y la densidad del mortero seco. La Fig. 4.20 muestra esta relación entre ambas propiedades a 28 días de edad.

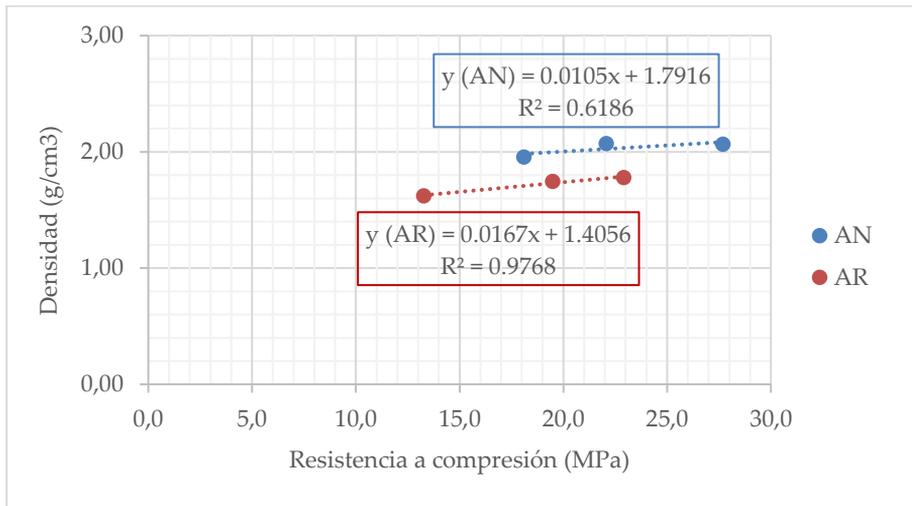


Figura 4.20: Relación entre densidad seca y resistencia a compresión a 28 días.

4.5.7. Absorción de agua por capilaridad

La evolución en el tiempo de la absorción de agua por capilaridad de las dos familias de morteros se muestra en las Fig. 4.21 y 4.22. Estos gráficos representan los resultados obtenidos para cada tipo de mortero y la función de ajuste determinada por Hall's (1989):

$$W = A + S \cdot t^{1/2} - C \cdot t$$

Donde W es la absorción de agua por capilaridad, t es el tiempo, S es la sorptivity, y A y C son constantes. Evangelista y Brito (2010) y Cartuxo y col. (2016) observaron que la absorción de agua por capilaridad en hormigones hechos con áridos reciclados se ajusta bastante bien al modelo de Halls.

La Tabla 4.13 muestra los parámetros de ajuste (A, C, S) del modelo de Halls y coeficiente de ajuste obtenido, el cual es bastante elevado, de ahí que el modelo de Halls explique muy bien la evolución de la absorción de agua por capilaridad.

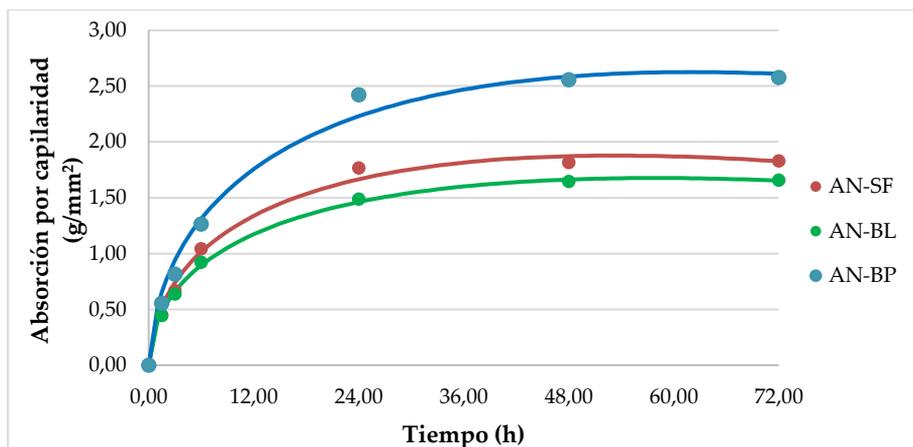


Figura 4.21: Absorción de agua por capilaridad en el tiempo AN.

En los morteros de la Familia-1, la sustitución del SF por las cenizas de biomasa BP incrementa significativamente la absorción de agua por capilaridad, mientras que la ceniza de biomasa BL la disminuye ligeramente. Esto puede estar justificado por la menor relación a/c empleada en la fabricación de los morteros AN-BL (Tabla 4.6). Así mismo, los morteros AN-BP que necesitaron una mayor relación a/c mostraron la mayor absorción de agua por capilaridad.

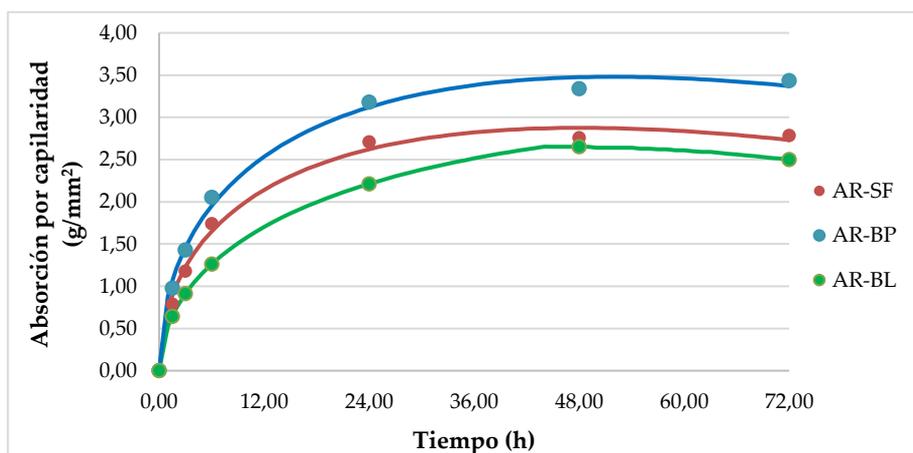


Figura 4.22: Absorción de agua por capilaridad en el tiempo AN.

En los morteros de la Familia-2, la tendencia es similar a los morteros de la Familia-1. El mortero que presenta una mayor relación

a/c (AR-BP) es el mortero con mayor absorción de agua por capilaridad, mientras que el mortero con menor relación a/c (AR-BL) es el mortero que muestra una menor absorción de agua por capilaridad.

A la vista de los resultados de la Familia-1 y Familia-2, se puede afirmar que la relación a/c influyen en la microestructura porosa del mortero y por tanto a la absorción de agua por capilaridad.

Relacionado con lo anterior, los morteros con menor resistencia mecánica (AN-BP), y menor densidad, mostraron una mayor absorción de agua por capilaridad. Maschio y col. (2011) observaron que los datos obtenidos en absorción de agua estaban relacionados con la resistencia a compresión de los morteros, siendo bajos en materiales con alta resistencia y altos en aquellos con niveles de resistencia reducidos. También hay que señalar que las composiciones con cenizas volantes (FA) FA20, FA30, BA20 y BA30 muestran valores de absorción de agua superiores al 5%, lo que revela la porosidad abierta en dichos materiales.

Tabla 4.13: Parámetros de ajuste del teorema de capilaridad de Halls.

	A	C	S	R2
AN-SF	-0,0754	0,0366	0,5347	0,9905
AN-BL	-0,0256	0,0295	0,4482	0,9983
AN-BP	-0,1422	0,0446	0,7027	0,9872
AR-SF	-0,0506	0,0607	0,8429	0,9934
AR-BL	-0,0707	0,0319	0,6222	0,9978
AR-BP	-0,0247	0,0674	0,9721	0,9957

En los morteros de la Familia-2, los valores de absorción de agua por capilaridad son mayores que en la Familia-1, debido a la mayor absorción del AR. Estos resultados coinciden con los obtenidos por Evangelista y Brito (2010) y Cartuxo y col. (2016), quienes concluyeron que la absorción de agua por capilaridad en hormigones aumentaba al incrementar el uso de arena reciclada de hormigón.

4.5.8. Permeabilidad al vapor de agua

En la Familia-1 se observa que la sustitución de SF por las cenizas de biomasa BL no afecta significativamente a la permeabilidad al vapor de agua, mientras que el uso de cenizas de biomasa BP incrementa un 26,18% la permeabilidad al vapor de agua. En los morteros de la Familia-2 se observa que la sustitución de SF por las cenizas de biomasa BL y BP incrementa la permeabilidad al vapor de agua un 4,7% y 28,19% respectivamente. Al igual que en las propiedades analizadas anteriormente, los morteros con mayor relación a/c (AN-BP y AR-BP) son los que muestran una mayor permeabilidad al vapor de agua.

Estos resultados guardan relación con los resultados obtenidos en la absorción de agua por capilaridad donde la tendencia era la misma.

Los morteros hechos con AR (Familia-2) muestran un mayor valor de permeabilidad al vapor de agua que los morteros hechos con AN (Familia-1).

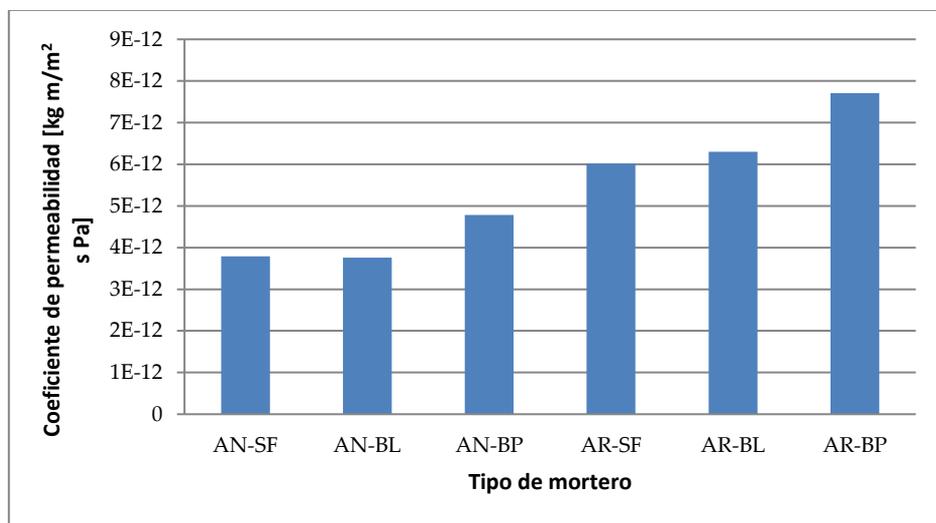


Figura 4.23: Absorción de agua por capilaridad en el tiempo AN.

4.5.9. Retracción

En la Fig. 4.24 se observa que en la Familia-1, la sustitución de SF por BL y BP afecta negativamente a la retracción, siendo la retracción del mortero AN-BP aproximadamente el doble del mortero AN-SF. Estos resultados pueden justificarse por dos razones, la mayor relación a/c utilizada en los morteros AN-BP frente al AN-SF ($a/c = 1,06$ en AN-BP frente a una relación $a/c = 0,82$ en AN-SF), y por otro lado, las menores resistencias mecánicas de los morteros AN-BL y AN-BP (Fig. 4.15) que se oponen a las tensiones de retracción.

Esta misma tendencia se observa en la Familia-2 (Fig. 4.25), destacando que al incorporar AR en dichas muestras la retracción es mayor que en el caso de las fabricadas con AN, esto podría estar basado en la mayor absorción de agua del AR frente al AN, la mayor relación a/c y la menor resistencia mecánica de los morteros hechos con AR.

Rosales y col., (2017) obtuvieron mayores valores de retracción en los morteros fabricados con un porcentaje de sustitución de cemento por cenizas de fondo de biomasa en comparación con el mortero de referencia. Sin embargo, la retracción de los morteros con un 20% de BBA a 90 días de curado mostró valores cercanos a los del mortero de referencia. También obtuvieron una buena correlación entre los valores de porosidad y retracción.

Resultados similares se perciben en otros estudios sobre el uso de ceniza de biomasa como sustituto del cemento o áridos en morteros de cemento (Modolo y col., 2013), donde la retracción fue mayor en mezclas en los morteros con cenizas de fondo de biomasa que en los morteros de referencia

Estos resultados podrían relacionarse también con los obtenidos por (Rosales y col., 2016; Beltrán y col., 2014), donde los valores de retracción se incrementaron con la incorporación de BBA, además con la

combinación de RMA y BBA se obtuvieron mayores valores de retracción en comparación con los morteros fabricados con AN.

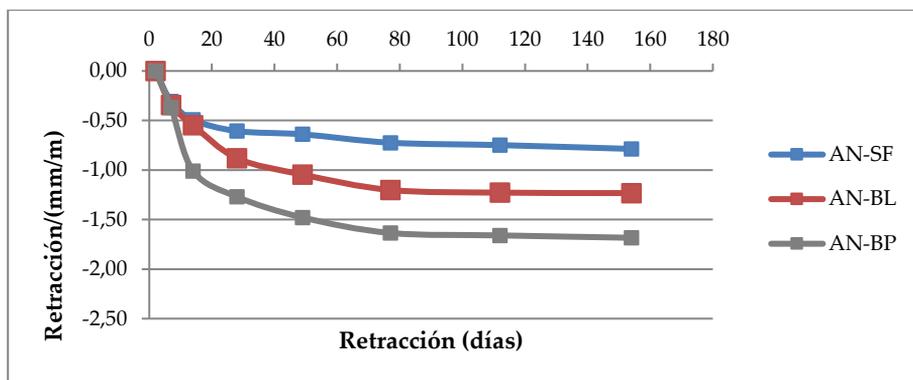


Figura 4.24: Retracción 160 días AN.

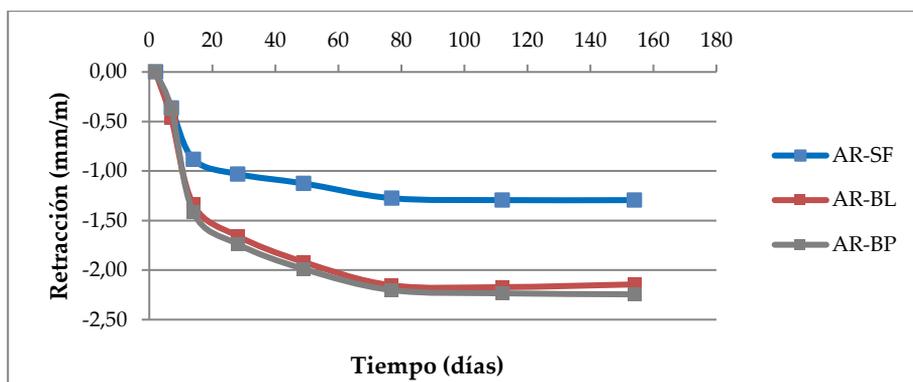


Figura 4.25: Retracción 160 días AR.

4.5.10. Resistencia de unión entre ladrillo y mortero

En este capítulo con el fin de evaluar la resistencia de unión desarrollada entre el ladrillo y una capa de mortero de 10 mm de espesor se llevó a cabo un método de ensayo derivado de la UNE EN 1052-3:2008. De esta manera se estudió el comportamiento de mampostería en ausencia de la tensión normal, lo cual corresponde con el término constante en la ley de fricción Mohr-Coulomb.

El modelo de prueba se compone de tres ladrillos y tiene una estructura simétrica para evitar así cargas excéntricas (Fig. 4.26).



Figura 4.26: Unión entre ladrillo y mortero.

Por lo general, al final del ensayo sólo se craqueaba una junta, por lo que se calculó la resistencia de unión dividiendo la carga máxima en dos veces y por la zona de fractura donde el ladrillo y el mortero estaban en contacto (aproximadamente 120 x 200 mm).

Una buena adhesión mortero-ladrillo depende principalmente de la calidad de la zona interfacial, de hecho, como se muestra en la Fig. 4.28 los morteros fabricados con árido reciclado a pesar de tener un comportamiento mecánico peor mostraron mejores resistencias de unión de mortero-ladrillo que el mortero de referencia.

En la Fig. 4.27, se contempla que en la Familia-1, la sustitución de SF por BL y BP afecta positivamente a la resistencia de unión entre el ladrillo y el mortero, esta misma tendencia se observa en la Familia-2 (Fig. 4.28),

Esta misma tendencia se muestra en el trabajo de Corinaldesi y col. (2009) donde los morteros fabricados con áridos reciclados mostraron una excelente resistencia de unión con los ladrillos a pesar de que sus

propiedades mecánicas fueran peores, lo cual se justifica por la mayor calidad de la zona interfacial.

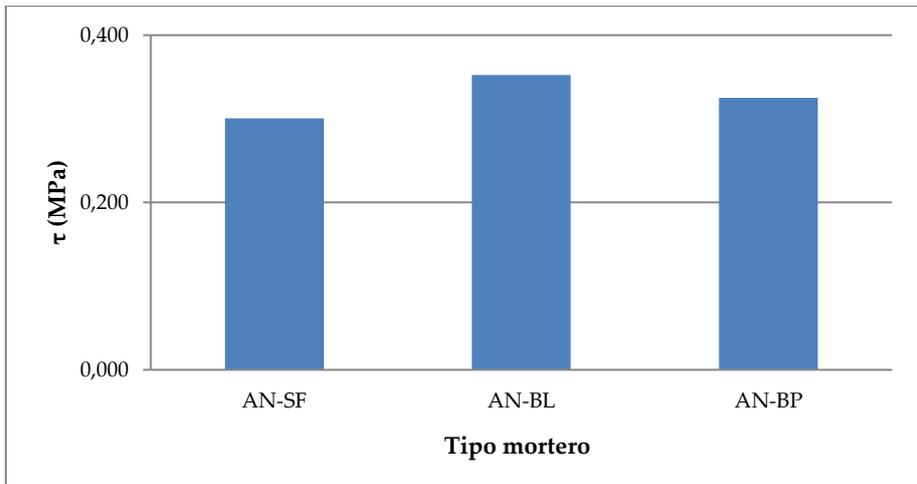


Figura 4.27: Resistencia de unión entre mortero y ladrillo para la AN.

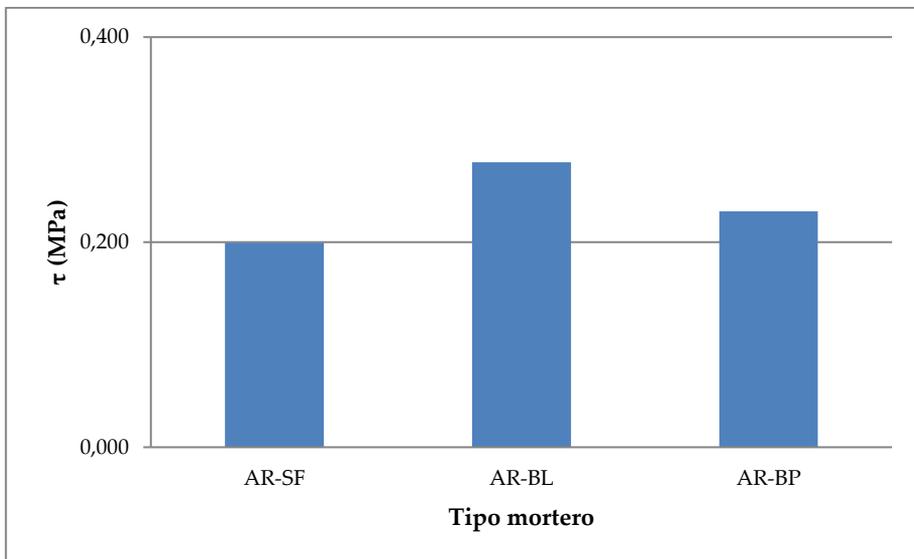


Figura 4.28: Resistencia de unión entre mortero y ladrillo para la AR.

4.6. Conclusiones

En el presente capítulo se han caracterizado dos cenizas volantes de biomasa (BL y BP) y se han fabricado dos familias de morteros, una con árido silíceo y otra con árido reciclado mixto de RCD. Las cenizas volantes de biomasa han sustituido en volumen a un filler silíceo (SF) utilizado para la fabricación de morteros de referencia. Las siguientes conclusiones se han obtenido, tanto de la caracterización de los materiales, como de las propiedades de los morteros frescos y endurecidos.

Caracterización de las cenizas de biomasa

- Las dos cenizas presentan una distribución bimodal con un máximo de pequeña intensidad en torno a 0,3 -0,4 micras y otro de gran intensidad en torno a 5 micras.
- La forma de las partículas de las cenizas volantes de biomasa es irregular.
- Las partículas de BL y BP tuvieron una superficie específica BET veinte veces mayor que la superficie del SF. En las cenizas de biomasa se observó la presencia de meso poros de tamaño pequeño y también la presencia de macro poros.
- Las cenizas volantes de biomasa presentan una gran cantidad de Potasio, Cloro y Carbono.
- La fase mayoritaria identificada con la técnica de rayos X fue cloruro potásico, seguida de otros compuestos como el carbonato potásico. Estos compuestos también han sido identificados mediante análisis de infrarrojos (FT-IR) y análisis termo gravimétrico (ATG).
- Desde un punto de vista ambiental, las elevadas concentraciones de los metales Cr, As y Se en el lixiviado, así como los cloruros y sulfatos, hacen que las cenizas volantes de biomasa deben ser clasificadas como residuos peligrosos.

Consistencia del mortero fresco y su evolución en el tiempo:

- Las dos cenizas de biomasa ensayadas han presentado un comportamiento diferente con relación a la cantidad de agua de amasado necesaria para mantener una consistencia constante en los morteros.
- El uso de las cenizas de la Planta de Linares (BL) permitió reducir la relación a/c en los morteros hechos con arena natural y arena reciclada un 6,1% y 10,7% con respecto al mortero de referencia hecho con filler silíceo (SF) respectivamente. Sin embargo, con el uso de las cenizas de la Planta de Puente Genil (BP) fue necesario incrementar la relación a/c en los morteros hechos con arena natural y arena reciclada un 29,3% y 23,6% con respecto al mortero de referencia hecho con SF.
- La evolución de la consistencia con el tiempo está íntimamente relacionada con la relación a/c de amasado, tanto en los morteros hechos con arena natural como con arena reciclada. A mayor menor relación a/c de amasado más rápidamente endurece el mortero.
- En los morteros con arena natural el uso de cenizas volantes de biomasa endurece la mezcla más rápidamente (menos tiempo de trabajabilidad), lo cual se puede compensar aumentando la relación a/c de la mezcla.
- En los morteros hechos con arena reciclada de RCD, donde es necesario emplear una mayor relación a/c para compensar la mayor absorción de la arena reciclada, el uso de la ceniza de biomasa no afecta significativamente a la evolución de la consistencia con el tiempo.

Densidad del mortero fresco y endurecido

- No se observa una influencia directa del uso de cenizas volantes de biomasa en la densidad del mortero fresco y endurecido. Si se observa claramente una influencia de la relación a/c en la

densidad. A mayor relación a/c de la mezcla, menor densidad del mortero fresco y endurecido. Las cenizas de BL requieren una relación a/c menor en el amasado y muestran una densidad del mortero ligeramente superior al de referencia, mientras que la ceniza BP requiere una relación a/c mayor en el amasado y muestran una densidad del mortero ligeramente inferior al de referencia.

- Los morteros hechos con arena reciclada muestran una menor densidad que los morteros hechos con arena natural, debido a la menor densidad de los áridos reciclados y a la mayor relación a/c necesaria para su amasado.

Aire ocluido:

- El uso de cenizas volantes disminuye el porcentaje de aire ocluido en los morteros hechos con arena natural y arena reciclada, lo cual está justificado por el menor tamaño de partícula de las cenizas volantes y su mayor capacidad de relleno de los huecos. Los morteros con árido reciclado presentan un mayor porcentaje de aire ocluido que los morteros con árido natural.

Tiempo de trabajabilidad:

- El tiempo de trabajabilidad disminuye considerablemente con el uso de cenizas de biomasa, lo cual está relacionado con su pequeño tamaño de partícula y elevada superficie, lo que le confiere un alto poder secante. Esta disminución es menor en los morteros hechos con arena natural que con los hechos con áridos reciclados. Las mezclas con menor relación a/c han mostrado un menor tiempo de trabajabilidad.

Resistencia a compresión y flexión:

- En los morteros hechos con arena natural, el uso de cenizas de biomasa BL y BP produce una caída de la resistencia a compresión y flexión con respecto al mortero hecho con SF a todas las edades ensayadas.
- En los morteros hechos con arena reciclada, el uso de cenizas de biomasa BL incrementa la resistencia a compresión. Sin embargo, el uso de ceniza de biomasa BP disminuye la resistencia a compresión y flexión con respecto al mortero hecho con SF. Los resultados pueden estar justificados por la menor relación a/c y mayor densidad de los morteros hechos con BL frente a los morteros hechos con BP. En todos los morteros se ha observado una relación lineal entre la densidad y la resistencia a compresión.
- La mayor cantidad de sílice frente a calcita de las cenizas BL en relación a las cenizas BP también puede justificar su mayor resistencia a compresión. La presencia de yeso en los AR puede justificar la menor resistencia en los morteros hechos con SF con respecto a los morteros hechos con BL.
- La resistencia a compresión y flexión se incrementan ligeramente con el tiempo (7-180 días) en todos los morteros ensayados. Las cenizas volantes no perjudican la evolución normal de los morteros base cemento.
- Los morteros fabricados con AR tienen menor resistencia que los fabricados con AN, debido a la menor resistencia mecánica de los AR.

Absorción de agua por capilaridad:

- La absorción de agua por capilaridad se ajusta bien a la fórmula propuesta por Hall's en todos los morteros ensayados.

- La relación a/c utilizada en los diferentes morteros determina la absorción de agua por capilaridad. Los morteros que incorporan cenizas de biomasa que requieren una mayor relación a/c en su fabricación (BP), mostraron una mayor absorción de agua por capilaridad. Mientras que los morteros que incorporaron cenizas de biomasa que requieren menor relación a/c en el amasado (BL) mostraron los menores valores de absorción de agua por capilaridad.
- Efecto de AR: Todos los morteros fabricados con AR mostraron mayor absorción de agua por capilaridad.

Permeabilidad al vapor de agua

- Las cenizas volantes de biomasa incrementan la permeabilidad al vapor de los morteros. Esta propiedad está relacionada con la relación a/c de amasado, a mayor relación a/c mayor permeabilidad al vapor de agua.
- Los morteros fabricados con AR tienen mayor permeabilidad al vapor de agua que los fabricados con AN.

Retracción:

- Las cenizas de biomasa aumentan la retracción de los morteros de manera significativa, lo cual puede identificarse como una propiedad limitante. Esto se justifica por la mayor relación a/c de los morteros hechos con ceniza volante de biomasa y por la menor resistencia mecánica que contrarresta las tensiones de retracción.
- Efecto de AR: Los morteros fabricados con AR retraen más que los fabricados con AN, debido a la mayor relación a/c y menor resistencia de los morteros con AR.

Resistencia de unión ladrillo y mortero

- Las cenizas volantes de biomasa consiguieron aumentar la resistencia de unión entre el mortero y el ladrillo con respecto al mortero de referencia, lo cual se atribuye a la mejor calidad de la zona interfacial ladrillo-mortero.
- Los morteros fabricados con AR mostraron mejores resistencias de unión mortero-ladrillo que el mortero de referencia.

4.7. Normas usadas en el trabajo experimental

UNE 146507-1. Ensayos de áridos. Determinación de la reactividad potencial de los áridos. Método químico. Parte 1: Determinación de la reactividad álcali-sílice y álcali-silicato. CEN; 1999 EX.

UNE 80103. Métodos de ensayos de cementos. Ensayos físicos. Determinación de la densidad real por la norma de Chatelier. CEN; 2013

UNE 83115. Áridos para hormigones. Medida del coeficiente de friabilidad de las arenas. CEN; 1989 EX

UNE 83421. Adiciones al hormigón. Cenizas volantes: toma, preparación, conservación y transporte de las muestras. CEN; 1987 EX

UNE 83831. Métodos de ensayo de los morteros para albañilería endurecidos- Determinación de la estabilidad dimensional de los morteros para albañilería endurecidos. CEN; 2010 EX.

UNE 83980. Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo. Determinación de la absorción de agua, la densidad y la porosidad accesible al agua del hormigón. CEN; 2014.

UNE-EN 12457. Caracterización de residuos. Lixiviación. Ensayo de conformidad para la lixiviación de residuos granulares y lodos. Parte 3: Ensayo por lotes de dos etapas con una relación líquido-sólido de 2 l/kg y 8 l/kg para materiales con un tamaño de partícula inferior a 4 mm (con o sin reducción de tamaño). CEN; 2003.

UNE-EN 197-1. Cemento. Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes. CEN; 2011

UNE-EN 1097-2. Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos - Parte 2: Métodos para la determinación de la resistencia a la fragmentación. CEN; 2010.

UNE-EN 1097-3. Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 3: Determinación de la densidad aparente y la porosidad. CEN; 1999

UNE-EN 1097-6. Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos- Parte 6: Determinación de la densidad de partículas y la absorción de agua. CEN; 2014.

UNE-EN 13139. Áridos para morteros. CEN; 2003.

UNE-EN 1744-1. Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos. Parte 1: análisis químico. CEN; 2010.

UNE-EN 196-2. Métodos de ensayo de cementos - Parte 2: Análisis químico de cementos. CEN; 2014

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. CEN; 2012.

UNE-EN 933-8. Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 8: Evaluación de los finos. Ensayo del equivalente de arena. CEN; 2012.

UNE-EN 933-10. Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos- Parte 10: Evaluación de los finos – Granulometría de los fillers (tamizado en corriente de aire). CEN; 2010.

UNE-EN 933-11. Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos - Parte 11: Ensayo de clasificación de los componentes de los áridos gruesos reciclados. CEN; 2009.

UNE-EN 450-1. Cenizas volantes para hormigón - Parte 1: Definiciones, especificaciones y criterios de conformidad. CEN; 2013

UNE-EN 450-2. Cenizas volantes para hormigón - Parte 2: Evaluación de la conformidad. CEN; 2006.

NLT 176. Densidad aparente de polvo mineral en tolueno. 1992

UNE-EN 1015-3. Métodos de ensayo para morteros de albañilería. Parte 3: Determinación de la consistencia del mortero fresco (por la mesa de sacudidas). CEN; 2000.

UNE-EN 1015-6. Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 6: Determinación de la densidad aparente del mortero fresco. CEN; 1999

UNE-EN 1015-7. Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 7: Determinación del contenido en aire en el mortero fresco. CEN. 1999

UNE-EN 1015-9. Métodos de ensayo de los morteros para albañilería - Parte 9: Determinación del período de trabajabilidad y del tiempo abierto del mortero fresco. CEN; 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. CEN; 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. CEN; 2000.

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. CEN; 2003.

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 endurecidos de revoco y enlucido. CEN; 1999.

UNE-EN 1052-3. Métodos de ensayo para fábricas de albañilería. Parte 3: Determinación de la resistencia inicial a cortante. CEN; 2003

4.8. Referencias bibliográficas

Agencia Andaluza de la Energía

https://www.agenciaandaluzadelaenergia.es/sites/default/files/documentos/la_biomasa_en_andalucia_noviembre_2016.pdf

Beltrán, M. G., Agrela, F., Barbudo, A., Ayuso, J., & Ramírez, A. (2014). Mechanical and durability properties of concretes manufactured with biomass bottom ash and recycled coarse aggregates. *Construction and Building Materials*, 72, 231-238.

Beltrán, M. G., Barbudo, A., Agrela, F., Jiménez, J. R., & de Brito, J. (2016). Mechanical performance of bedding mortars made with olive biomass bottom ash. *Construction and Building Materials*, 112, 699-707.

Cabrera, M., Galvin, A. P., Agrela, F., Carvajal, M. D., & Ayuso, J. (2014). Characterisation and technical feasibility of using biomass bottom ash for civil infrastructures. *Construction and Building Materials*, 58, 234-244.

Cabrera, M., Agrela, F., Ayuso, J., Galvin, A. P., & Rosales, J. (2015). Feasible use of biomass bottom ash in the manufacture of cement treated recycled materials. *Materials and Structures*, 1-12.

Cabrera, M., Galvin, A. P., Agrela, F., Beltran, M. G., & Ayuso, J. (2016). Reduction of leaching impacts by applying biomass bottom ash and recycled mixed aggregates in structural layers of roads. *Materials*, 9(4), 228.

Capablo, J., Jensen, P. A., Pedersen, K. H., Hjuler, K., Nikolaisen, L., Backman, R., & Frandsen, F. (2009). Ash properties of alternative biomass. *Energy & Fuels*, 23(4), 1965-1976.

Calvo, J. L. G., Moreno, M. S., Alonso, M. C. A., López, A. H., & Olmo, J. G. (2013). Study of the Microstructure Evolution of Low- pH Cements Based on Ordinary Portland Cement (OPC) by Mid- and Near-Infrared Spectroscopy and Their Influence on Corrosion of Steel Reinforcement Materials, 6(6), 2508.

Carrasco, B., Cruz, N., Terrados, J., Corpas, F. A., & Pérez, L. (2014). An evaluation of bottom ash from plant biomass as a replacement for cement in building blocks. *Fuel*, 118, 272-280.

Cartuxo, F., de Brito, J., Evangelista, L., Jiménez, J. R., & Ledesma, E. F. (2016). Increased Durability of Concrete Made with Fine Recycled Concrete Aggregates Using Superplasticizers. *Materials*, 9(2), 98.

CEDEX, 2014 (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas). Catálogo de residuos utilizables en construcción. Ficha técnica. Disponible en:

http://www.cedexmateriales.es/upload/docs/es_CENIZASPROCEDENTEDELAINCINERACIONDEBIOMASADIC2014.pdf

Coda, B., Cieplik, M. K., de Wild, P. J., & Kiel, J. H. (2007). Slagging behaviour of Wood ash under entrained-flow gasification conditions. *Energy & Fuels*, 21(6), 3644-3652.

Corinaldesi, V., & Moriconi, G. (2009). Behaviour of cementitious mortars containing different kinds of recycled aggregate. *Construction and building materials*, 23(1), 289-294.

Cuenca, J., Rodríguez, J., Martín-Morales, M., Sánchez-Roldán, Z., & Zamorano, M. (2013). Effects of olive residue biomass fly ash as filler in self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 40, 702-709.

Da Luz Garcia, M., & Sousa-Coutinho, J. (2013). Strength and durability of cement with forest waste bottom ash. *Construction and building Materials*, 41, 897-910.

Del Rey, I., Ayuso, J., Galvín, A. P., Jiménez, J. R., López, M., & García-Garrido, M. L. (2015). Analysis of chromium and sulphate origins in construction recycled materials based on leaching test results. *Waste Management*, 46, 278-286.

Demis, S., Tapali, J. G., & Papadakis, V. G. (2014). An investigation of the effectiveness of the utilization of biomass ashes as pozzolanic materials. *Construction and Building Materials*, 68, 291-300.

Directiva 2003/33/CE de 19 de Diciembre de 2002, por la que se establece los criterios y procedimientos de admisión de residuos en los vertederos con arreglo al artículo 16 y al anexo II de la Directiva 1999/31/CEE.

Directiva 1999/31/CE del consejo de 26 de abril de 1999 relativa al vertido de residuos. Consejo de Europa.

Directiva 2008/98 / CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de Abril de 2009, relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables y por la que se modifican y se derogan de las Directivas 2001/77/CE y 2003/30/CE. Diario oficial de la Unión Europea, 2009, vol.5, p.06-09.

Directiva del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de noviembre de 2008, sobre los residuos y por la que se derogan determinadas Directivas.

Esteves, T. C., Rajamma, R., Soares, D., Silva, A. S., Ferreira, V. M., & Labrincha, J. A. (2012). Use of biomass fly ash for mitigation of alkali-silica reaction of cement mortars. *Construction and Building Materials*, 26(1), 687-693.

European Climate Foundation.

<https://europeanclimate.org/category/news/publications/>

Evangelista, L., & De Brito, J. (2010). Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 32(1), 9-14.

Evangelista, L., & De Brito, J. (2014). Concrete with fine recycled aggregates: a review. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 18(2), 129-172.

Evangelista, L., Guedes, M., De Brito, J., Ferro, A. C., & Pereira, M. F. (2015). Physical, chemical and mineralogical properties of fine recycled aggregates made from concrete waste. *Construction and building materials*, 86, 178-188.

Farmer, V. C. (1974). *Mineralogical Society Monograph 4: The Infrared Spectra of Minerals*, the Mineralogical Society.

Fernández-Ledesma, E., Jiménez, J. R., Ayuso, J., Corinaldesi, V., & Iglesias-Godino, F. J. (2016). A proposal for the maximum use of recycled concrete sand in masonry mortar design. *Materiales de Construcción*, 66(321), 075.

Guo, Y., Zhao, C., Chen, X., & Li, C. (2015). CO₂ capture and sorbent regeneration performances of some wood ash materials. *Applied Energy*, 137, 26-36.

Hall, C. (1989). Water sorptivity of mortars and concretes: a review. *Magazine of concrete research*, 41(147), 51-61.

Hidalgo, A., Domingo, C., Garcia, C., Petit, S., Andrade, C., & Alonso, C. (2008). Microstructural changes induced in Portland cement-based materials due to natural and supercritical carbonation. *Journal of Materials Science*, 43(9), 3101-3111.

IDAE. *Plan de Energías Renovables en España 2011-2020*.

International Center for Diffraction Data, Inorganic Phases (Joint Committee on Powder Diffraction Standards, Swarthmore, PA), *Power Diffraction File*, 1995.

Jiménez, J. R. (2013). Recycled aggregates (RAs) for roads. Pacheco-Torgal, F., Tam, VWY, Labrincha, JA, Ding, Y. de Brito, J. (Eds.), Handbook of recycled concrete and demolition waste. Woodhead Publishing Limited, Cambridge, UK, 351-376.

K. Nakamoto, Infrared and Raman Spectra of Inorganic and Coordination Compounds, J. Wiley and Sons, New York, 2008

Ledesma, E. F., Jiménez, J. R., Fernández, J. M., Galvín, A. P., Agrela, F., & Barbudo, A. (2014). Properties of masonry mortars manufactured with fine recycled concrete aggregates. *Construction and building materials*, 71, 289-298.

Ledesma, E. F., Jiménez, J. R., Ayuso, J., Fernández, J. M., & de Brito, J. (2015). Maximum feasible use of recycled sand from construction and demolition waste for eco-mortar production–Part-I: ceramic masonry waste. *Journal of Cleaner Production*, 87, 692-706.

Lehman, R. L., Gentry, J. S., & Glumac, N. G. (1998). Thermal stability of potassium carbonate near its melting point. *Thermochimica Acta*, 316(1), 1-9.

Maschio, S., Tonello, G., Piani, L., & Furlani, E. (2011). Fly and bottom ashes from biomass combustion as cement replacing components in mortars production: Rheological behaviour of the pastes and materials compression strength. *Chemosphere*, 85(4), 666-671.

Maslehuddin, M., Sharif, A. M., Shameem, M., Ibrahim, M., & Barry, M. S. (2003). Comparison of properties of steel slag and crushed limestone aggregate concretes. *Construction and building materials*, 17(2), 105-112.

Modolo, R. C. E., Ferreira, V. M., Tarelho, L. A., Labrincha, J. A., Senff, L., & Silva, L. (2013). Mortar formulations with bottom ash from biomass combustion. *Construction and Building Materials*, 45, 275-281.

Modolo, R. C. E., Silva, T., Senff, L., Tarelho, L. A. C., Labrincha, J. A., Ferreira, V. M., & Silva, L. (2015). Bottom ash from biomass combustion

in BFB and its use in adhesive-mortars. *Fuel Processing Technology*, 129, 192-202.

Rajamma, R., Ball, R. J., Tarelho, L. A., Allen, G. C., Labrincha, J. A., & Ferreira, V. M. (2009). Characterisation and use of biomass fly ash in cement-based materials. *Journal of hazardous materials*, 172(2), 1049-1060.

Rajamma, R., Senff, L., Ribeiro, M. J., Labrincha, J. A., Ball, R. J., Allen, G. C., & Ferreira, V. M. (2015). Biomass fly ash effect on fresh and hardened state properties of cement-based materials. *Composites Part B: Engineering*, 77, 1-9.

Rosales, J., Beltrán, M. G., Cabrera, M., Velasco, A., & Agrela, F. (2016). Feasible Use of Biomass Bottom Ash as Addition in the Manufacture of Lightweight Recycled Concrete. *Waste and Biomass Valorization*, 7(4), 953-963.

Rosales, J., Cabrera, M., Beltrán, M. G., López, M., & Agrela, F. (2017). Effects of treatments on biomass bottom ash applied to the manufacture of cement mortars. *Journal of Cleaner Production*.

Sata, V., Tangpagasit, J., Jaturapitakkul, C., & Chindaprasirt, P. (2012). Effect of W/B ratios on pozzolanic reaction of biomass ashes in Portland cement matrix. *Cement and Concrete Composites*, 34(1), 94-100.

Vassilev, S. V., Baxter, D., Andersen, L. K., & Vassileva, C. G. (2013). An overview of the composition and application of biomass ash. Part 1. Phase–mineral and chemical composition and classification. *Fuel*, 105, 40-76.

Vazquez-Moreno, T., & Blanco-Varela, M. T. (1981). Table of infrared frequencies and absorption spectra of compound related to cement chemistry. *Materiales de Construcción*, 182, 31-48.

Wang, S., & Baxter, L. (2007). Comprehensive study of biomass fly ash in concrete: Strength, microscopy, kinetics and durability. *Fuel Processing Technology*, 88(11), 1165-1170.

Wang, S., Miller, A., Llamazos, E., Fonseca, F., & Baxter, L. (2008). Biomass fly ash in concrete: mixture proportioning and mechanical properties. *Fuel*, 87(3), 365-371.

CONCLUSIONES

Relativo al capítulo 1: Árido reciclado cerámico finamente triturado como filler en morteros

El uso de áridos reciclados mixtos de RCD con alto porcentaje de partículas cerámicas finamente triturados (FRMA) para la fabricación de morteros de albañilería es una alternativa viable que mejora la mayoría de las propiedades físico-mecánicas de los morteros.

La utilización de FRMA aumentó la densidad del mortero fresco con respecto al de referencia, sin embargo, tanto el porcentaje de aire ocluido como el tiempo de trabajabilidad disminuyó, aunque no lo hicieron de manera significativa, por lo que los resultados obtenidos en las propiedades del mortero fresco fueron satisfactorios

La utilización del FRMA mejoró las propiedades del mortero endurecido tales como la densidad y resistencias mecánicas. La resistencia mecánica se incrementó significativamente a lo largo del tiempo. La retracción se vio afectada negativamente al utilizar el FRMA. La absorción de agua por capilaridad disminuyó linealmente.

Esto favorece el aumento de la tasa de reciclaje y da un mayor valor añadido a la fracción fina de los RCD, permite reducir ligeramente el consumo de recursos naturales y la cantidad de cemento necesario en la dosificación de los morteros, con la consiguiente disminución de CO₂ emitido a la atmósfera y efecto favorable sobre el cambio climático.

Relativo al capítulo 2: Uso combinado de cenizas volantes no conformes y áridos reciclados mixtos en mortero.

El uso de cenizas no conformes de centrales termoeléctricas en morteros de albañilería es una alternativa viable debido a que mejora las propiedades físico-mecánicas y de durabilidad de los morteros. Su incorporación en la dosificación permitiría reducir ligeramente la

cantidad de cemento empleada y fabricar un mortero más amigable con el medio ambiente.

El efecto combinado de arena reciclada mixta de RCD con alto contenido en partículas cerámicas, como es la procedente de los derribos de obras de mampostería y las cenizas volantes no conformes de centrales termoeléctricas de carbón es también una alternativa viable ya que se consiguen unas propiedades físico-mecánicas y de durabilidad aceptables en los morteros de albañilería. Como punto débil está el tiempo de trabajabilidad, que aumenta considerablemente, aunque este aspecto puede corregirse con el uso de aditivos.

El uso de los áridos reciclados mixtos de RCD con alto contenido en partículas cerámicas finamente triturados junto con morteros hechos con áridos reciclados de RCD no es una alternativa viable, ya afecta negativamente de manera significativa a las propiedades de los morteros en estado fresco y endurecido.

Relativo al capítulo 3: Aditivos para morteros con áridos reciclados.

El aditivo aireante-plastificante en las dosis ensayadas no se considera válido para mejorar las propiedades de los morteros de albañilería hechos con áridos reciclados de RCD.

El aditivo aireante-retenedor en las dosis ensayadas no se considera válido para mejorar las propiedades de los morteros de albañilería hechos con áridos reciclados de RCD.

El aditivo retardante-plastificante en las dosis ensayadas se considera buena opción para mejorar las propiedades de los morteros de albañilería hechos con áridos reciclados de RCD utilizados a humedad ambiente (sin pre-saturación).

El aditivo superplastificante en las dosis ensayadas puede ser una buena opción para mejorar las propiedades de los morteros de albañilería con áridos reciclados de RCD, pero no utilizando los áridos

secos a humedad ambiente (sin pre-saturación) ya que afecta negativamente a la trabajabilidad de los morteros.

Relativo al capítulo 4: Uso de cenizas volantes de plantas de biomasa en la fabricación de morteros

Las cenizas volantes de biomasa están compuestas principalmente por cloro, potasio y carbono. La fase mayoritaria identificada con la técnica de rayos X es el cloruro potásico seguido del carbonato potásico. Con respecto a la distribución del tamaño de partículas destacar que las cenizas de biomasa tienen un tamaño mayoritario de 5 micras, tienen una superficie específica veinte veces mayor que la del filler silíceo de referencia y además en el lixiviado se observaron elevadas concentraciones de Cr, As y Se, además de cloruros y sulfatos lo que conlleva a clasificar las cenizas volantes como residuos peligrosos.

Con respecto a las propiedades del mortero fresco, con el uso de cenizas volantes de biomasa, no se observa una influencia directa en la densidad del mortero fresco. Si se observa claramente una influencia de la relación a/c, afectando también a la evolución en el tiempo de la consistencia del mortero fresco. Disminuye el porcentaje de aire ocluido y el tiempo de trabajabilidad. Se observa claramente la influencia de la relación a/c.

De acuerdo a las propiedades del mortero endurecido, las cenizas volantes de biomasa de la planta de Linares (BP) se obtienen mejores resultados que las cenizas volantes de biomasa de la planta de Puente Genil (BP), lo cual está relacionado con la relación a/c. Las cenizas BP mejoraron propiedades como la resistencia a compresión y flexión al usarse combinadas con árido reciclado mixto de RCD. Las cenizas volantes de biomasa consiguieron aumentar la resistencia de unión entre el mortero y el ladrillo con respecto al mortero de referencia, lo cual justifica que puedan emplearse en morteros de base para tabiquería.

Por lo tanto y en base a la investigación desarrollada, podemos concluir de manera general lo siguiente:

Los residuos empleados en nuestra investigación son productos industriales con un elevado potencial de utilización en el ámbito de la Construcción Sostenible. Lo que conlleva a una reducción del consumo de recursos naturales, siendo una alternativa viable para la sociedad actual.

Futuras líneas de investigación:

A modo de línea de investigación a desarrollar en el futuro, se presentan aquellos aspectos que no han surgido y no se han podido abordar en la presente tesis doctoral y que sería muy interesante su estudio en futuras investigaciones.

Optimizar la dosificación de aditivo retardante-plastificante como mejor opción para mejorar las propiedades físico-mecánicas de los morteros hechos con AR y aumenta la trabajabilidad de estos. Estudiar el efecto de la pre-saturación de los áridos reciclados de RCD. Estudiar la interacción de este tipo de aditivo con las cenizas volantes no conformes de central termoeléctrica y plantas de biomasa.

Optimizar la dosificación de aditivo superplastificante como mejor opción para compensar los efectos negativos que el uso de AR tiene sobre las propiedades físico-mecánicas de los morteros. Estudiar el efecto de la pre-saturación de los áridos reciclados de RCD. Estudiar la interacción de este tipo de aditivo con las cenizas volantes no conformes de central termoeléctrica y plantas de biomasa.

Las cenizas volantes de biomasa se han clasificado como residuos peligrosos. La cantidad de cloruro potásico puede limitar su uso en materiales base cemento. Sería necesario llevar a cabo una campaña extensa de caracterización de dichas cenizas volantes e identificar sus

propiedades limitantes. La tesis se ha limitado al estudio de dos cenizas de biomasa.

En función del porcentaje de sustitución y relación a/c empleada, se puede mejorar las propiedades mecánicas de los morteros de albañilería. Se propone investigar en profundidad la influencia del porcentaje de sustitución de árido/cemento con ceniza de biomasa y la relación a/c empleada.

Realizar ensayos a escala real de tabiquerías con morteros de referencia y morteros con uso combinado de áridos reciclados mixtos, cenizas no conformes de centrales termoeléctricas y cenizas volantes de biomasa de diferente procedencia.

INDICIOS DE CALIDAD

En el transcurso de la presente Tesis Doctoral se han publicado dos artículos, uno en la revista “**Materials**”, indexada en el JCR con un factor de impacto en 2016 de 2,654 y situada en la posición 82/275 dentro de la categoría Materials Science, Multidisciplinary (Q2). Y otro en la revista “**European Journal of Environmental and Civil Engineering**” indexada en el JCR con un factor de impacto en 2016 de 0,897 y situada en la posición 80/125 dentro de la categoría Engineering, Civil (Q3) y la posición 26/35 dentro de la categoría Engineering, Geological (Q3).

Torres-Gómez, A. I., Ledesma, E. F., Otero, R., Fernández, J. M., Jiménez, J. R., & de Brito, J. (2016). Combined Effects of Non-Conforming Fly Ash and Recycled Masonry Aggregates on Mortar Properties. *Materials*, 9(9), 729.

Ledesma, E. F., Torres Gómez, A. I., López, M., Ayuso, J., & Jiménez, J. R. (2016). Effect of powdered mixed recycled aggregates on bedding mortar properties. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 20(sup1), s1-s17.

Además, se ha presentado una comunicación al Congreso Internacional “SECOND INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONCRETE SUSTAINABILITY” celebrado del 13-15 de junio en Madrid (España).

Cingolani, C., Gómez, A. T., Jiménez, J. R., Corinaldesi, V., & Ledesma, E. F. (2016, June). Study of the use of different chemical admixtures in mortars manufactured with recycled sand from CDW. In *Book of Abstracts* (p. 113).

Están previstas tres nuevas publicaciones en revistas indexadas JCR y una comunicación aceptada al Congreso Internacional “International Symposium on Inorganic and Environmental Materials 2018 (ISIEM-2018) que se celebrará en Ghent (Bélgica) los días 17-21 de Junio 2018.



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA