



UTILIZACIÓN DE ÁRIDO RECICLADO PARA LA FABRICACIÓN DE PIEZAS DE HORMIGÓN PREFABRICADO DE MOBILIARIO URBANO

TESIS DOCTORAL

Zoraida Sánchez Roldán

Programa Oficial de Doctorado en Ingeniería Civil (B23.56.1)

Granada, febrero de 2019

Directores:

Dña. Montserrat Zamorano Toro

D. Ignacio Valverde Espinosa



**UNIVERSIDAD
DE GRANADA**

Editor: Universidad de Granada. Tesis Doctorales
Autor: Zoraida Sánchez Roldán
ISBN: 978-84-1306-191-7
URI: <http://hdl.handle.net/10481/55703>

“Si no estamos preparados para cometer errores, jamás seremos capaces de generar algo original. El error es parte del aprendizaje”.

Sir Ken Robinson

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que me han ayudado y apoyado, de una forma u otra, a lo largo de este proceso que culmina con la presentación de esta Tesis Doctoral.

En el ámbito profesional, quiero comenzar dando las gracias a mis directores de tesis y tutores, trabajando con ellos he aprendido, y seguiré haciéndolo, que la investigación tiene que apasionarte, pero aún más importante es comprenderla para que así dé sus frutos.

A Montserrat Zamorano Toro, por su orientación, conocimiento y exigencia para que el trabajo siempre sea perfecto.

A Ignacio Valverde Espinosa, por sus recomendaciones e inestimable ayuda.

A María Martín Morales, por sus “palabras” que me han permitido darme cuenta de los errores cometidos y así poder corregirlos. Su confianza y apoyo en este viaje han sido muy importantes.

A Nacho Valverde Palacios, por el conocimiento aportado y el apoyo recibido en mis largas horas de trabajo de laboratorio.

A Gloria María Cuenca Moyano, por ser mi compañera, mi amiga, mi consejera, mi apoyo en momentos difíciles, por todo... sin ella este camino hubiese sido totalmente distinto.

Al Departamento de Construcciones Arquitectónicas de la Universidad de Granada y, en especial, al Laboratorio de Materiales de Construcción, así como a los técnicos colaboradores del mismo, Enrique, Antonio y, principalmente, a Rafael Núñez y a Luís Jiménez, que han constituido la mano de obra de la parte de laboratorio y que han "sufrido" conmigo toda la realización de los ensayos, estando siempre a mi disposición cuando los he necesitado.

Al Departamento de Mineralogía y Petrología de la Universidad de Granada y, en particular, a Giuseppe Cultrone, por el uso y manejo del aparato de microscopía por intrusión de mercurio.

A las empresas y, especialmente, a su personal, que han colaborado de manera desinteresada para hacer posible la ejecución de este trabajo de investigación.

Destacando a Prefabricados López, en particular a Javier López, por su colaboración en la fase inicial de laboratorio; a Prefadur, en especial a Juan Padial y sus trabajadores, por su gran ayuda en la fase final de producción de las piezas prefabricadas; y, sobre todo, a Inertes Guhilar, concretamente a Miguel Ángel Donaire, a Manolo y demás personal colaborador, por la ayuda proporcionada en el procesamiento y suministro de los áridos reciclados utilizados durante todo este trabajo.

En el ámbito personal, son infinitas las palabras de agradecimiento para mi familia, madre, padre, hermanas y hermano, por apoyarme en esta experiencia que ha sido una gran carrera de fondo.

A mi gran familia, compuesta por Juan y nuestras niñas, Valeria y Alejandra. Para ellos me faltan palabras de gratitud, porque son ellos los que han tenido que soportar la peor parte de mí en todo este proceso... pero aun así han sido pacientes y me han dado apoyo y ánimo hasta el final.

A mi gente, a mis amigas y amigos, a todos los que participan en mi día a día, a los que siempre han estado ahí, con los que he compartido pequeños o grandes momentos y que siempre manifestaron su interés por mi trabajo.

A todos los seres visibles e invisibles que han estado a mi lado durante este largo camino.

Y nuevamente a mi madre, por enseñarme a creer en mí misma, a confiar en que todo es posible, por darme esperanza incluso en tiempos de desesperación, por proporcionarme siempre el consejo perfecto en el momento adecuado.

¡¡GRACIAS!!

Granada, 26 de febrero de 2019

Reflexión final:

"A todos los que como yo están dedicados total o parcialmente a su Doctorado, tan solo decirles que no se pierdan las pequeñas alegrías que les ofrece la vida mientras aguardan la gran felicidad de finalizar su ansiada Tesis"

Dedicado a:

A Teresa, mi madre, que me dio la vida y que me enseña día a día cómo vivirla para sacarle siempre el mejor partido.

A Juan, Valeria y Alejandra, por estar siempre a mi lado y enseñarme constantemente que toda dificultad es una nueva posibilidad para crecer.



**UNIVERSIDAD
DE GRANADA**

E.T.S. INGENIERÍA DE EDIFICACIÓN

Programa Oficial de Doctorado en Ingeniería Civil

***UTILIZACIÓN DE ÁRIDO RECICLADO PARA LA
FABRICACIÓN DE PIEZAS DE HORMIGÓN
PREFABRICADO DE MOBILIARIO URBANO***

TESIS DOCTORAL

para la obtención del título de

DOCTORA POR LA UNIVERSIDAD DE GRANADA

Zoraida Sánchez Roldán

Granada, febrero de 2019

Directores de Tesis:

Dña. Montserrat Zamorano Toro. Dra. Ingeniera de Caminos, Canales y Puertos. Catedrática UGR

D. Ignacio Valverde Espinosa. Dr. en Ciencias Geológicas. Catedrático E.U. UGR



ÍNDICE

COMPROMISO DE RESPETO DE LOS DERECHOS DE AUTOR	<i>i</i>
AGRADECIMIENTOS	<i>iv</i>
ÍNDICE	<i>xi</i>
ÍNDICE TABLAS	<i>xv</i>
ÍNDICE DE FIGURAS	<i>xvi</i>
RESUMEN	<i>xxi</i>
1. INTRODUCCIÓN, MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS	1
1.1. Motivación y justificación del trabajo	1
1.2. Objetivos y metodología	5
2. FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN Y ESTADO DEL CONOCIMIENTO	
9	
2.1. Los residuos de construcción y demolición	9
2.2. Composición de los residuos de construcción y demolición	13
2.3. Generación de residuos de construcción y demolición	16
2.4. Problemática ambiental de los residuos de construcción y demolición.....	19
2.5. Gestión de los residuos de construcción y demolición.....	21
2.5.1. De residuos a recursos	25
2.5.2. Tratamiento de los residuos de construcción y demolición	28
2.6. Marco regulador de residuos de la construcción y demolición.....	33
2.6.1. Ámbito europeo.....	34
2.6.2. Ámbito español.....	38
2.6.3. Ámbito autonómico andaluz	39
2.6.4. Ámbito provincial	42
2.7. Los áridos reciclados.....	43
2.7.1. Definición y tipología	43
2.7.2. Producción del árido reciclado.....	44
2.7.3. Marco técnico aplicable a los áridos reciclados	49
2.7.4. Aplicaciones de los áridos reciclados	52
2.7.4.1. Hormigón reciclado.....	53
2.7.4.1.1. Microestructura del hormigón reciclado	54



2.7.4.1.2.	El premojado de los áridos como técnica para mejorar las propiedades del hormigón	59
2.7.4.2.	Aplicaciones.....	63
2.7.4.2.1.	Hormigón estructural.....	63
2.7.4.2.2.	Hormigón de uso no estructural.....	66
2.7.4.2.3.	Hormigón de alta resistencia / alto rendimiento	67
2.7.4.2.4.	Hormigón autocompactante.....	70
2.7.4.3.	Morteros	72
2.7.4.4.	Obras de carreteras.....	74
2.7.4.4.1.	Bases y subbases.....	75
2.7.4.4.2.	Capas de rodadura.....	79
2.7.4.4.3.	Terraplenes, rellenos y otros usos.....	80
2.7.4.5.	Prefabricados de hormigón	82
2.7.4.5.1.	La prefabricación.....	82
2.7.4.5.2.	Prefabricados de uso no estructural	83
2.7.5.	Mobiliario urbano y ecodiseño.....	89
2.7.5.1.	Requisitos normativos.....	91
3.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	93
3.1.	Materiales	93
3.1.1.	Áridos	93
3.1.2.	Cemento.....	94
3.1.3.	Agua.....	95
3.1.4.	Aditivo.....	95
3.1.5.	Acero	96
3.2.	Métodos	96
3.2.1.	Caracterización de los áridos.....	97
3.2.2.	Estudios de dosificación del hormigón para la obtención de piezas para mobiliario urbano	100
3.2.2.1.	Dosificación del hormigón	100
3.2.2.2.	Caracterización del hormigón fresco y endurecido	100
3.2.2.3.	Tratamiento previo del árido reciclado: premojado	102
3.2.2.3.1.	Técnica de microscopía óptica.....	106
3.2.3.	Fabricación y viabilidad técnica de las piezas de mobiliario urbano.....	107
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	113
4.1.	Caracterización de los áridos	113
4.1.1.	Requisitos geométricos de los áridos.....	113
4.1.1.1.	Análisis granulométrico.....	114

4.1.1.2.	Evaluación de los finos.....	118
4.1.2.	Requisitos físico-mecánicos de los áridos	120
4.1.2.1.	Composición de los áridos gruesos reciclados	120
4.1.2.2.	Densidad de partículas	122
4.1.2.3.	Resistencia a la fragmentación	123
4.1.2.4.	Absorción de agua	123
4.1.3.	Requisitos químicos de los áridos	124
4.1.3.1.	Contenido en cloruros	125
4.1.3.2.	Contenido en sulfatos.....	126
4.1.3.3.	Contenido en compuestos de azufre	127
4.1.3.4.	Contenido en materia orgánica y partículas ligeras.....	128
4.1.4.	Consideraciones de la caracterización de los áridos.....	128
4.2.	Estudios de dosificación del hormigón para la obtención de piezas para mobiliario urbano	130
4.2.1.	Dosificación inicial	130
4.2.1.1.	Resultados de la dosificación inicial.....	132
4.2.1.2.	Consistencia del hormigón fresco.....	132
4.2.1.3.	Resistencia del hormigón endurecido.....	134
4.2.1.4.	Consideraciones particulares de la dosificación inicial	135
4.2.2.	Estudio de premojado.....	137
4.2.2.1.	Resultados obtenidos	138
4.2.2.1.1.	Consistencia del hormigón fresco.....	138
4.2.2.1.2.	Resistencia del hormigón endurecido	141
4.2.2.1.3.	Microscopía óptica y análisis digital de imágenes	144
4.2.2.1.4.	Porosimetría por intrusión de mercurio	158
4.2.2.2.	Consideraciones particulares del estudio de premojado	160
4.2.3.	Dosificación definitiva	162
4.2.3.1.	Propiedades del hormigón fresco.....	163
4.2.3.1.1.	Contenido de aire.....	164
4.2.3.1.2.	Densidad en fresco.....	165
4.2.3.2.	Propiedades físicas	166
4.2.3.2.1.	Absorción de agua	167
4.2.3.2.2.	Densidad del hormigón endurecido	168
4.2.3.2.3.	Velocidad de los impulsos ultrasónicos.....	169
4.2.3.3.	Propiedades mecánicas	171
4.2.3.3.1.	Resistencia a compresión	171
4.2.3.3.2.	Resistencia a flexión.....	175
4.2.3.3.3.	Módulo de elasticidad.....	176
4.2.3.4.	Ensayos de durabilidad	180



4.2.3.4.1.	Absorción de agua, porosidad accesible y densidad aparente	180
4.2.3.4.2.	Penetración de agua bajo presión	183
4.2.3.4.3.	Absorción por capilaridad	185
4.2.3.4.4.	Velocidad de carbonatación	187
4.2.3.4.5.	Resistencia al envejecimiento por niebla salina	191
4.2.3.5.	Consideraciones de la caracterización del hormigón no estructural fabricado con la dosificación definitiva	194
4.3.	Fabricación y viabilidad técnica de piezas de mobiliario urbano	196
4.3.1.	Características geométricas y superficiales.....	196
4.3.2.	Densidad.....	197
4.3.3.	Absorción de agua.....	199
4.3.4.	Comportamiento mecánico.....	202
4.3.5.	Carbonatación por exposición a la intemperie.....	205
4.3.6.	Ensayos no destructivos	208
4.3.7.	Consideraciones de la fabricación y puesta en uso de piezas	210
5.	CONCLUSIONES.....	213
6.	FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	217
	ANEXO: DIFUSIÓN DE RESULTADOS	219
	BIBLIOGRAFÍA	221

ÍNDICE TABLAS

Tabla 1. Capítulo 17 de la “Lista Europea de Residuos” sobre RCD	12
Tabla 2. Generación de RCD en los Estados miembros durante el periodo 2010-2016 (datos en toneladas). Fuente: Eurostat (env_wasgen)	17
Tabla 3. Marco regulador en materia de residuos en Europa	35
Tabla 4. Regulaciones en materia de vertido, estadística y gestión de residuos en Europa	35
Tabla 5. Regulaciones europeas en materia de medio ambiente	36
Tabla 6. Documentos informativos en materia de sostenibilidad y economía circular en la Unión Europea	37
Tabla 7. Disposiciones relacionadas con los residuos, en general, y con los residuos de construcción y demolición, en particular, en España	38
Tabla 8. Regulaciones españolas específicas de los RCD.....	39
Tabla 9. Legislación relacionada con el medio ambiente en España.....	39
Tabla 10. Regulaciones específicas en materia de los residuos en Andalucía	41
Tabla 11. Ficha técnica del cemento BL II/ A-L 42,5R UNE 80305.....	95
Tabla 12. Composición y características del aditivo Chryso®fluid Optima 227	96
Tabla 13. Ensayos geométricos de los áridos.....	97
Tabla 14. Ensayo de clasificación de los componentes de los áridos gruesos reciclados	98
Tabla 15. Ensayos físico-mecánicos de los áridos	98
Tabla 16. Ensayos químicos de los áridos	99
Tabla 17. Designación de los hormigones estudiados.....	100
Tabla 18. Ensayos del hormigón fresco	101
Tabla 19. Ensayos característicos del hormigón endurecido: propiedades físicas.....	101
Tabla 20. Ensayos característicos del hormigón endurecido: propiedades mecánicas.....	101
Tabla 21. Ensayos de durabilidad del hormigón endurecido	102
Tabla 22. Ensayos de porosidad del hormigón endurecido	104
Tabla 23. Ensayos de control efectuados a los bancos de hormigón.....	110
Tabla 24. Resultados geométricos de los áridos y categoría asignada (EHE-08 y UNE-EN 12620).....	114
Tabla 25. Requisitos granulométricos de los áridos y resultados (EHE-08 y UNE-EN 12620)	115
Tabla 26. Resultados de la clasificación de los componentes de los áridos gruesos reciclados (UNE-EN 12620).....	121
Tabla 27. Resultados de los ensayos físico-mecánicos realizados a los áridos (EHE-08 y UNE-	



EN 12620)	122
Tabla 28. Resultados ensayos químicos realizados a los áridos	125
Tabla 29. Contenido de agua de los hormigones fabricados	137
Tabla 30. Resultados cuantitativos obtenidos del análisis de imágenes (valores medios)	147
Tabla 31. Resultados obtenidos del coeficiente de absorción capilar	185
Tabla 32. Dimensiones de los bancos fabricados (valores medios y desviación); valor declarado por el fabricante (Figura 18a)	198

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Composición de los residuos generados en el sector constructivo en la UE-28 (2016). Los datos de Irlanda y Grecia corresponden a los publicados en 2014. Fuente: Eurostat, (env_wasgen)	13
Figura 2. Composición típica de los RCD en España. Fuente: PNRCD 2001-2006 (Ministerio de Medio Ambiente, 2001)	15
Figura 3. Composición de los RCD en Andalucía (2008). Fuente: PDTGRNP 2010-2019 (Consejería de Medio Ambiente, 2010)	15
Figura 4. Generación de residuos en el sector de la construcción en los diez países de la UE más productores (periodo 2010-2016). Fuente: Eurostat (env_wasgen)	18
Figura 5. Evolución en la generación de residuos en la construcción en los Estados miembros, periodo 2010-2016. Fuente: Eurostat (env_wasgen)	18
Figura 6. Datos de producción de RCD por CCAA en el periodo 2010-2015. Fuente: Asociación Española de reciclaje de residuos de construcción y demolición	19
Figura 7. Ciclo cerrado de los materiales de construcción en una economía circular	27
Figura 8. Nivel de tratamiento de la fracción mineral de los RCD no peligrosos generados en los países de la UE en 2016, en toneladas (a) y en porcentaje acumulado (b). Fuente: Eurostat (env_wastrt)	29
Figura 9. Evolución del tratamiento de residuos entre 2010 y 2016 en Europa (datos numéricos en millones de toneladas). Fuente: Eurostat (env_wastrt)	30
Figura 10. RCD valorizados (reciclaje) en cada CCAA en 2015 (en toneladas y en porcentaje). Fuente: Asociación española de reciclaje de RCD	31
Figura 11. Residuos valorizados en Andalucía en toneladas y el porcentaje correspondiente respecto al total producido entre 2010 y 2015. Fuente: Asociación española de reciclaje de RCD	32
Figura 12. Esquema de funcionamiento de una planta fija de tratamiento de RCD. Fuente: Elaboración propia	45

Figura 13. Secuencia de imágenes del proceso de triaje y clasificación secundaria.....	48
Figura 14. Estructura interna de un árido reciclado que forma parte de un nuevo hormigón (5x)	55
Figura 15. Material procesado para obtener las muestras de ensayo y reductor de muestras utilizado	97
Figura 16. Procedimiento de fabricación de los hormigones reciclados.....	105
Figura 17. Proceso de preparación de las muestras de hormigón para el análisis por microscopía óptica	106
Figura 18. Dimensiones técnicas de un banco de hormigón (a). Curado de prefabricados (b), puesta en servicio (c) y extracción de testigos (d)	108
Figura 19. Proceso de seguimiento realizado desde la fabricación hasta el análisis de los prefabricados.....	111
Figura 20. Distribución granulométrica de todos los áridos estudiados.....	116
Figura 21. Huso granulométrico de la arena según la EHE-08 y curvas de los áridos finos ensayados.....	116
Figura 22. Huso granulométrico para la grava según lo recogido en la normativa (EHE-08 y UNE-EN 12620) y distribución por tamaños de los áridos gruesos analizados	117
Figura 23. Distribución granulométrica de la curva de Fuller y de los áridos utilizados para la fabricación de hormigones	130
Figura 24. Procedimiento de fabricación de muestras de hormigón según la dosificación inicial (en peso)	131
Figura 25. Consistencia de los hormigones fabricados con la dosificación inicial	133
Figura 26. Resistencia a compresión de los hormigones fabricados con la dosificación inicial a 7 y a 28 días.....	135
Figura 27. Consistencia de los hormigones producidos según el estudio de premojado	139
Figura 28. Relación entre la consistencia y el tiempo de premojado de las series de hormigón fabricadas con áridos gruesos reciclados premojados.....	140
Figura 29. Resistencia a compresión a 7 días (barra rayada) y a 28 días (barra lisa) de los hormigones producidos.....	141
Figura 30. Desarrollo de la resistencia del hormigón hasta los 28 días de edad	142
Figura 31. Relación entre resistencia a compresión y contenido de agua total de los hormigones premojados	143
Figura 32. Submuestras embutidas y pulidas de cada tipo de hormigón fabricado, a escala 1:100	145
Figura 33. Ejemplo de partículas de árido de naturaleza distinta presentes en el hormigón natural (a) y en los reciclados (a-f) fabricados en este estudio, 5x con luz polarizada plana	146



Figura 34. Análisis de imágenes de las muestras del hormigón natural, con luz polarizada y nícoles cruzados.....	148
Figura 35. Análisis de imágenes de la muestra de hormigón no premojado (HR-G-0), con luz polarizada y nícoles cruzados.....	149
Figura 36. Análisis de imágenes de la muestra del hormigón reciclado HR-G-1, con luz polarizada y nícoles cruzados.....	150
Figura 37. Análisis de imágenes de la muestra HR-G-2, con luz polarizada y nícoles cruzados	151
Figura 38. Análisis de imágenes de la muestra HR-G-4, con luz polarizada y nícoles cruzados	152
Figura 39. Análisis de imágenes de la muestra HR-G-3, con luz polarizada y nícoles cruzados	153
Figura 40. Análisis de imágenes de la muestra HR-G-5, con luz polarizada y nícoles cruzados	154
Figura 41. Porosidad de los hormigones observados mediante microscopía óptica (MO) ...	156
Figura 42. Porosidad accesible al mercurio de los hormigones analizados según la técnica de porosimetría de mercurio (PIM).....	159
Figura 43. Porcentaje de poros en el intervalo comprendido entre 0,01 y 100 μm , obtenido por porosimetría	160
Figura 44. Proceso de elaboración de hormigones según la dosificación definitiva (en peso)	163
Figura 45. Contenido de aire en el interior de los hormigones fabricados.....	164
Figura 46. Densidad en estado fresco de los hormigones ensayados	165
Figura 47. Absorción de agua de los hormigones ensayados, junto con la limitación exigible	167
Figura 48. Densidad tras secado en estufa de los hormigones ensayados	168
Figura 49. Velocidad de ultrasonidos a 7, 28 y 120 días de los hormigones fabricados.....	170
Figura 50. Resistencia a compresión a 7, 28 y 120 días de los hormigones fabricados, junto con el valor exigido más restrictivo (AEN/CTN 127, 2004a)	172
Figura 51. Desarrollo de las resistencias de los hormigones ensayados y de las recomendadas por la EHE-08	173
Figura 52. Resistencia a flexión a 28 días de los hormigones fabricados.....	175
Figura 53. Relación entre la resistencia a compresión y la de flexión de los hormigones evaluados	176
Figura 54. Módulo de elasticidad dinámico (E_d) y estático (E_s) de los hormigones ensayados a 28 y 120 días.....	178
Figura 55. Relación entre el módulo de elasticidad estático y el dinámico.....	179

Figura 56. Absorción y porosidad accesible al agua a 28 días de los hormigones estudiados	181
Figura 57. Densidad aparente de los hormigones estudiados a 28 días	183
Figura 58. Profundidad media de penetración de agua de los hormigones estudiados y especificación máxima y media de la Instrucción (Ministerio de Fomento, 2008)	184
Figura 59. Profundidad de penetración de agua medida en probetas normalizadas de 150 mm de diámetro y 300 mm de alto (partidas mediante el ensayo brasileño después de 72h horas bajo penetración de agua a presión)	184
Figura 60. Absorción de agua por capilaridad de los hormigones ensayados a 28 y 90 días, respecto del tiempo	186
Figura 61. Ejemplo de la carbonatación obtenida en probetas de hormigón ensayadas, identificada mediante la aplicación de fenolftaleína al 1% (zonas no coloreadas de rosa)	187
Figura 62. Velocidad de carbonatación en los hormigones evaluados, a 14, 28 y 56 días.....	188
Figura 63. Resistencia a compresión de muestras sometidas a 56 días de carbonatación acelerada y sin carbonatar (con 120 días de edad).....	189
Figura 64. Comparativa entre el coeficiente de absorción por capilaridad de los hormigones sometidos a CO ₂ y sin someter, con 90 días.....	190
Figura 65. Probetas sometidas a alteración por niebla salina; comparación antes (a) y después del ensayo (b)	192
Figura 66. Porcentaje de variación de la masa de las probetas sometidas a envejecimiento salino (tras la eliminación de la sal depositada con agua desionizada).....	193
Figura 67. Resistencia a compresión de las muestras sometidas salinidad y resultados comparativos de las muestras ensayadas a 120 días	194
Figura 68. Coeficiente de absorción por capilaridad de los hormigones sometidos a salinidad y del ensayo realizado a 90 días	194
Figura 69. Apariencia de los bancos a dos metros de distancia.....	197
Figura 70. Densidad de los testigos ensayado.....	199
Figura 71. Absorción de agua de los hormigones ensayados en los testigos extraídos. Límite máximo del 6% para uso menos favorable (AEN/CTN 127, 2004a).....	199
Figura 72. Condiciones climáticas en la ciudad de Granada, precipitaciones (mm y días) y humedad relativa máxima en el periodo junio-2016 a junio-2018 (http://www.ugr.es/~velilla/meteo-albayzin/resumen.htm)	200
Figura 73. Resistencia de probetas normalizadas para los hormigones fabricados para rotura a 7 y 28 días. Límite mínimo de resistencia de 35 MPa para la condición de uso más desfavorable (AEN/CTN 127, 2004a)	202
Figura 74. Resistencia de los testigos extraídos de cada hormigón analizado. Límite mínimo de resistencia de 35 MPa para la condición más desfavorable (AEN/CTN 127, 2004a) 203	



Figura 75. Módulo de elasticidad de los hormigones evaluados calculado sobre las probetas testigo 205

Figura 76. Profundidad de carbonatación natural de los testigos extraídos del asiento de los bancos fabricados..... 206

Figura 77. Velocidad y profundidad de carbonatación de los testigos ensayados a 12 y 24 meses 207

Figura 78. Índice de rebote de los hormigones ensayados obtenido in-situ 208

Figura 79. Velocidad de propagación del sonido determinada in-situ sobre los bancos ensayados..... 209

RESUMEN

El sector de la construcción se considera el mayor consumidor de recursos naturales no renovables, además de encontrarse entre los que más residuos producen en Europa, generando con ello importantes impactos sobre el medio ambiente. La valorización y reciclado de estos residuos se presenta como una gran oportunidad para transformar el sector y hacerlo más sostenible, al incorporarlos nuevamente al sistema productivo como materias primas secundarias, en el marco de la economía circular.

El uso de los áridos reciclados en sustitución de los naturales en la construcción ha sido ampliamente estudiado en diferentes aplicaciones (hormigones, morteros o en obras de carreteras), a pesar de su heterogeneidad, mayor capacidad de absorción de agua y contenido en impurezas. No obstante, en aplicaciones de tipo estructural los requerimientos normativos para su uso son bastante exigentes, lo que dificulta el máximo aprovechamiento de estos materiales granulares. En consecuencia, se justifica la necesidad de evaluar el potencial de utilización de los áridos reciclados en aplicaciones con menores requerimientos como la fabricación de hormigón no estructural para piezas de mobiliario urbano, un campo en el que prácticamente no hay estudios.

Para comprobar la aptitud de uso de los áridos reciclados en hormigón no estructural para la aplicación indicada, se ha llevado a cabo una primera fase de estudio a escala de laboratorio consistente en la caracterización de los materiales granulares, tanto naturales como reciclados (procedentes de residuos de hormigón) y el estudio de dosificaciones; para ello se han tenido en cuenta las particularidades técnicas del material reciclado, y la posterior caracterización de los hormigones producidos, con la finalidad de obtener hormigones reciclados con similares prestaciones que las del natural de acuerdo al tipo de elemento a confeccionar.

Los resultados obtenidos han permitido, en una segunda fase, fabricar bancos para mobiliario urbano a escala industrial. La caracterización de dichos productos, así como su seguimiento durante dos años, han puesto de manifiesto que, tras la optimización de la dosificación proporcionada por el fabricante y la utilización de los áridos reciclados sin premojar, los hormigones reciclados presentaron unas características



técnicas adecuadas para la fabricación de dichas piezas. Finalmente, el comportamiento físico-mecánico y los ensayos de durabilidad de las piezas colocadas en un área pública han permitido concluir que, tanto la fracción gruesa del árido reciclado seleccionado como la totalidad del mismo, son viables para esta aplicación, aunque los bancos fabricados únicamente con árido grueso reciclado mostraron un mejor comportamiento.

ABSTRACT

The construction sector is considered the largest consumer of non-renewable natural resources and one of the major waste generators in Europe; these activities have a major impact on the environment. Recovering and recycling this waste gives the sector a great opportunity to transform and reduce its environmental footprint by re-incorporating these resources into the chain of production as secondary raw materials in the framework of the circular economy.

Replacing natural aggregates with recycled aggregates in different applications (concrete, mortar, or material for road works) has been widely studied, despite the heterogeneity, greater water absorption capacity and higher impurity levels that characterise these products. However, these materials have not been put to their full use due to the strict requirements that govern the use of recycled aggregates in structural applications. Therefore, the potential of recycled aggregates in less stringently regulated applications, such non-structural concrete for urban furniture, has scarcely been studied and needs to be explored.

A preliminary laboratory study was performed to ascertain the suitability of recycled aggregates in non-structural concrete for the foregoing application. Both the natural and recycled granular materials (obtained from concrete waste) were characterised and tested different dosages. The concretes produced on the basis of the technical characteristics of the recycled material were subsequently characterised with the aim of obtaining recycled concretes that perform as well as natural concretes according to the type of element manufactured.

In a second phase, based on the results obtained, benches were manufactured for urban furniture on an industrial scale. The characterisation of the products obtained, and their performance over a 2-year monitoring period, showed that after optimising the manufacturer's recommended dosage and using non-pre-soaked recycled aggregates, the resulting recycled concretes presented technical characteristics that were adequate for the manufacture of such benches. Finally, after testing the physical and mechanical properties and the durability of the benches placed in a public area, it was concluded that both the coarse fraction of the selected recycled aggregate and the



total fraction thereof are suitable for this application, although better performance was observed in benches manufactured using only coarse recycled aggregate.

1.INTRODUCCIÓN, MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS

1.1. Motivación y justificación del trabajo

La industria de la construcción en la Unión Europea (UE) consume alrededor de la mitad de los materiales que se extraen, además de ser una importante fuente de producción de residuos. La cantidad de residuos de la construcción (RCD) generados en Europa en el año 2016 fue de algo más de 924 millones de toneladas (Eurostat, 2018a), lo que supone en torno a un tercio del total generado, de los cuales se trataron 294 millones de toneladas, correspondientes a la fracción mineral no peligrosa. Se puede por tanto afirmar que el sector de la construcción contribuye a la problemática ambiental derivada de las diferentes fases del ciclo de vida, desde la extracción de materiales, producción de productos, construcción, uso y mantenimiento, hasta la demolición, dando lugar a importantes impactos debido a la generación de residuos en cada una de sus fases. En consecuencia se hace necesario reducir los efectos negativos sobre el medio ambiente derivados de la actividad de la construcción mediante la aplicación de medidas que garanticen la gestión adecuada de los residuos de construcción y demolición de acuerdo con los conceptos de desarrollo sostenible y economía circular, base de los modelos productivos actuales (Comisión Europea, 2014b, 2015, 2018).

En el núcleo del desarrollo sostenible, integrado en la Estrategia Europea 2020 desde el 2010 (Comisión Europea, 2010a), se pretende satisfacer las necesidades de las



generaciones actuales sin poner en peligro la capacidad de las generaciones futuras de cumplir las suyas propias (Informe Brundtland, 1987), ofreciendo un enfoque completo que aúna consideraciones económicas, sociales y medioambientales, de forma que se refuercen mutuamente. La UE parte de una sólida posición en materia de desarrollo sostenible y ha manifestado su firme compromiso de ser, junto con sus países miembros, una de las pioneras en la aplicación de la Agenda 2030 de las Naciones Unidas (Comisión Europea, 2016a). Además, el uso eficiente de los recursos requiere de la conversión de los residuos generados en nuevas materias primas mediante su valorización y reciclaje (Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea, 2008; Jefatura del Estado, 2011) y, como consecuencia de ello, se incorporan al sistema productivo como materias primas secundarias. Para ello ha surgido el concepto de economía circular, entendida como una economía en la que *“el valor de los productos, los materiales y los recursos se mantenga en la economía durante el mayor tiempo posible, y en la que se reduzca al mínimo la generación de residuos”* (Comisión Europea, 2015). Se trata de una gran oportunidad para transformar la economía y hacerla más sostenible, contribuir a los objetivos climáticos y a la conservación de los recursos mundiales, crear puestos de trabajo a escala local y generar ventajas competitivas para Europa en un mundo que está experimentando cambios profundos. Además, contribuirá a cumplir con los objetivos de la Agenda 2030 de Desarrollo Sostenible (Comisión Europea, 2018).

La sostenibilidad del sector de la construcción es crucial para impulsar a la sociedad hacia una economía circular, y para que esto sea posible, prima la aplicación del principio de jerarquía de residuos (prevención, preparación para la reutilización, el reciclado, la valorización y, como última opción, la eliminación). Dicho principio está establecido en la normativa comunitaria de residuos e incluido en la legislación española a través de la Ley de residuos (Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea, 2008; Jefatura del Estado, 2011). Consecuentemente, se obtienen importantes beneficios ambientales asociados a la correcta gestión de los residuos, a la protección del suelo, de las aguas, del aire o del clima y también proporciona beneficios económicos (ahorro en materias primas) y sociales (creación de empleo).

Con el objeto de transformar los residuos de construcción y demolición generados en una oportunidad económica y social, la Comisión Europea ha elaborado el Protocolo

de gestión de residuos de construcción y demolición (Comisión Europea, 2016c). Éste se enmarca en la Estrategia de Construcción 2020 (Comisión Europea, 2012), así como en la comunicación 445 sobre oportunidades para un uso más eficiente de los recursos en el sector de la construcción (Comisión Europea, 2014b), además de formar parte del paquete sobre la economía circular de la Comisión Europea (Comisión Europea, 2015, 2017). Junto al Protocolo se publica una guía sobre mejores prácticas para evaluar los residuos que deben retirarse de edificios e infraestructuras antes de su demolición o renovación (European Commission, 2018a), contribuyendo con ello a una mejor gestión de los residuos y a alcanzar el objetivo de reciclaje propuesto por la UE a los Estados miembros para el 2020, del 70% (Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea, 2008). De esta forma el reciclado de los residuos de construcción y demolición, compuestos mayoritariamente por hormigón, cerámicos, pétreos, asfalto y/o tierras de excavación, aunque también pueden contener una pequeña cantidad de impurezas (yeso, maderas, plásticos, aceros o papel), se considera de suma importancia, ya que puede dar lugar a los beneficios comentados (Comisión Europea, 2014b).

En la actualidad, el uso de los áridos reciclados está ampliamente estudiado y pone de manifiesto diferencias entre el árido natural y el reciclado que radican, fundamentalmente, en la mayor capacidad de absorción de agua de este último, debido al mortero de cemento adherido a su superficie (McNeil y Kang, 2013; Behera et al., 2014; Shi et al., 2016), además de a la presencia de material cerámico e impurezas (Medina et al., 2015; González-Taboada, González-Fonteboa, Martínez-Abella y Carro-López, 2016). Esta propiedad física está considerada como uno de los grandes problemas a la hora de utilizar el árido reciclado en la fabricación de hormigón, y aún más su fracción más fina (mayor concentración de mortero). La absorción influye en la reducción de la cantidad de agua disponible para combinarse con el cemento, con la consecuente pérdida de fluidez del hormigón reciclado, además de afectar a su comportamiento mecánico, entre otras deficiencias (Seara-Paz, 2015; Eckert y Oliveira, 2017); por ello está limitada tanto al árido como al hormigón (Ministerio de Fomento, 2008).

En consecuencia, el uso de áridos reciclados requiere del diseño de una mezcla óptima que haga que éstos se comporten de forma adecuada en función del uso y de los



requisitos específicos que conlleve (López Gayarre et al., 2017; Juan-Valdés et al., 2018). Esto ha permitido que se empleen satisfactoriamente en la fabricación de diferentes tipos hormigones (Safiuddin et al., 2013; Behera et al., 2014; Saini y Ashish, 2015; Karim et al., 2016; Kisku et al., 2017; Tam et al., 2018), en morteros (Naganathan et al., 2014; Cuenca-Moyano et al., 2014), además de como material granular en obras de carreteras (Vieira y Pereira, 2015; Cardoso et al., 2016), entre otras aplicaciones.

No obstante, su uso en determinadas aplicaciones, como es el caso del hormigón estructural (Ministerio de Fomento, 2008), requiere del cumplimiento de una serie de requisitos técnicos, entre ellos, limitaciones relacionadas con el porcentaje de reemplazo y la fracción utilizada (máximo del 20% en peso del árido grueso reciclado), así como con la naturaleza del material (exclusivamente procedente del machaqueo de residuos de hormigón). Todo ello dificulta su utilización e impide el máximo aprovechamiento de los recursos contenidos en los residuos de la construcción y demolición, entre otros beneficios (Tam et al., 2018). En consecuencia, se justifica la necesidad de explorar otras posibles aplicaciones constructivas en las que el tipo y las características de los áridos reciclados no sean tan limitantes. En este sentido se han publicado estudios dirigidos a analizar el uso de estos áridos en prefabricados vibrocompridos de hormigón, como puede ser en adoquines, bordillos, bloques o bovedillas (Poon et al., 2002; López Gayarre et al., 2013; Rodríguez et al., 2016; Martín-Morales et al., 2017; Guo, Zhanggen et al., 2018). Sin embargo, hasta la fecha, se observa que son prácticamente inexistentes los trabajos publicados sobre su utilización en la producción de elementos prefabricados de uso decorativo, como bancos, jardineras, balaustradas y barandillas, con una gran presencia en cualquier entorno urbano. Este tipo de prefabricados, por sus menores exigencias técnicas, garantizaría el mayor uso posible de materiales reciclados, sin comprometer los requisitos del producto final, todo ello, con la finalidad de ampliar su mercado, incrementar las tasas de reciclaje y reducir el consumo de árido natural, así como el volumen de residuos depositados en vertederos.

Se puede por tanto concluir que el uso de los áridos reciclados para la fabricación de mobiliario urbano contribuye al uso eficiente de los recursos existentes, tras la conversión de los residuos de construcción y demolición en áridos reciclados con el objeto de cerrar el ciclo productivo de estos elementos constructivos en el marco de

una economía circular. En este sentido, la presente tesis queda enmarcada dentro de los claros objetivos establecidos en el marco legislativo comunitario (Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea, 2008), además de en la política nacional y autonómica de residuos (Consejería de Medio Ambiente, 2010; Jefatura del Estado, 2011; Ministerio de Agricultura, 2015) y más concretamente en la de los residuos de construcción y demolición (Ministerio de la Presidencia, 2008).

1.2. Objetivos y metodología

Teniendo en cuenta la exposición anterior, el objetivo principal de este trabajo es el estudio de la utilización de árido reciclado para la fabricación de piezas de hormigón prefabricado de mobiliario urbano. Para la consecución del mismo se han definido los siguientes objetivos secundarios:

- Establecimiento del estado del conocimiento en el uso de los áridos reciclados en la construcción en general y en fabricación de piezas de mobiliario urbano en particular.
- Caracterización de los áridos que se utilizarán en el estudio.
- Desarrollo de estudios de dosificación del hormigón para la obtención de piezas para mobiliario urbano.
- Fabricación y viabilidad técnica de piezas de mobiliario urbano.

Para alcanzar los objetivos planteados anteriormente se han desarrollado las siguientes tareas:

1. Establecimiento del estado del conocimiento en el uso de los áridos reciclados en la construcción en general y en la fabricación de piezas de mobiliario urbano en particular.

1.1. Estudio bibliográfico y recopilación de datos sobre el reciclado de residuos de la construcción. Tiene como finalidad la actualización de conocimientos sobre la aplicación de áridos reciclados en diferentes aplicaciones, con el objeto de detectar campos poco o nada explorados.

1.2. Estudio del sector del prefabricado en el ámbito del mobiliario urbano. Tiene por objeto conocer la tipología de piezas, los requisitos normativos



establecidos a las mismas, además de posibles limitaciones que, en general, éstas puedan presentar a la hora de utilizar áridos reciclados en el proceso productivo. Igualmente se analizará la experiencia desarrollada en este ámbito al usar áridos reciclados.

2. Caracterización de los áridos que se utilizarán en el estudio

2.1. Caracterización de los áridos. Permitirá conocer las características de los áridos naturales y reciclados, de acuerdo a las prescripciones exigibles, para posteriormente ser utilizados en la fabricación de las piezas de hormigón.

2.2. Preparación de mezclas. Una vez conocidas las características de los áridos, se seleccionará, la fracción o fracciones del material reciclado más viables para sustituir al natural, siendo necesario que las mezclas resultantes presenten unas características granulométricas semejantes a las utilizadas en el proceso industrial (según los datos facilitados por el fabricante).

3. Estudios de dosificación del hormigón para la obtención de piezas para mobiliario urbano

3.1. Fabricación de hormigones. Se fabricarán hormigones a escala de laboratorio, tanto con árido natural como con reciclado (según las fracciones seleccionadas anteriormente). Teniendo en cuenta las particularidades técnicas del material reciclado, con posterioridad se estudiarán las dosificaciones más adecuadas para obtener hormigones reciclados con similares prestaciones que las del natural de acuerdo al tipo de prefabricado a confeccionar.

3.2. Caracterización de los hormigones fabricados. Se llevarán a cabo los ensayos que, según las normas establecidas, son exigibles tanto al material como a las piezas fabricadas, lo que permitirá conocer su nivel de cumplimiento, tanto con áridos naturales como con reciclados, en relación a su comportamiento físico-mecánico y de durabilidad.

1. Fabricación y viabilidad técnica de piezas de mobiliario urbano

1.1. Fabricación de piezas. Con los reemplazos más adecuados y la dosificación más óptima utilizada a escala de laboratorio se fabricarán las piezas a escala real.

1.2. Caracterización del producto acabado. Se llevarán a cabo los ensayos oportunos, de acuerdo con lo establecido en la normativa correspondiente a las piezas fabricadas.

1.3. Seguimiento de las piezas de mobiliario urbano. Finalmente, para evaluar el comportamiento de las piezas en condiciones de uso real, los prefabricados serán colocados en un área pública para hacer un programa de seguimiento a largo plazo y establecer su aceptabilidad.

Teniendo en cuenta los objetivos que se han pretendido alcanzar en este trabajo, así como las tareas planificadas para ello, este documento se ha estructurado de acuerdo a los capítulos que se indican a continuación. En el siguiente capítulo se recogen los fundamentos de la investigación y el estado del conocimiento. En el capítulo 3 se hace una presentación de los materiales y métodos aplicados para obtener los resultados presentados y discutidos en el capítulo 4. Por último, las conclusiones del trabajo, así como las líneas futuras de investigación se recogen en los capítulos 5 y 6, respectivamente. En el Anexo final de este trabajo se recogen los trabajos que, hasta el momento, han difundido los resultados obtenidos.



2. FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN Y ESTADO DEL CONOCIMIENTO

2.1. Los residuos de construcción y demolición

La Directiva (UE) 2018/851 del Parlamento europeo y del Consejo por la que se modifica la Directiva 2008/98/CE sobre los residuos (Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea, 2018b), define **residuos de construcción y demolición (RCD)** como aquellos *residuos generados por las actividades de construcción y demolición*¹. En el marco legal español, este término se define por primera vez en el Real Decreto 105/2008, de 1 de febrero por el que se regula la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición (Ministerio de la Presidencia, 2008), como "*cualquier sustancia u objeto que, cumpliendo la definición de «Residuo» incluida en el artículo 3.a de la Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados (Jefatura del Estado, 2011) se genere en una obra de construcción o demolición*", considerándose ésta como la actividad consistente en:

¹ El sector que origina a estos residuos coincide básicamente con las actividades agrupadas en la Sección F de la clasificación europea de actividades económicas, NACE Rev.2 (Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea, 2006), así como en la nacional, CNAE-2009 (Ministerio de Economía y Hacienda, 2007), bajo el epígrafe de "Construcción".



1. *La construcción, reparación, reforma o demolición de un bien inmueble, tal como un edificio, carretera, puerto, aeropuerto, ferrocarril, canal, presa, instalación deportiva o de ocio, u otro análogo de ingeniería civil.*
2. *La realización de trabajos que modifiquen la forma o sustancia del terreno o del subsuelo, tales como excavaciones, inyecciones, urbanizaciones u otros análogos, con exclusión de aquellas actividades a las que sea de aplicación la Directiva 2006/21/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 15 de marzo, sobre la gestión de los residuos de industrias extractivas. Se considerará parte integrante de la obra toda instalación que dé servicio exclusivo a la misma, y en la medida en que su montaje y desmontaje tenga lugar durante la ejecución de la obra o al final de la misma, tales como: Plantas de machaqueo, plantas de fabricación de hormigón, grava-cemento o suelo-cemento, plantas de prefabricados de hormigón, plantas de fabricación de mezclas bituminosas, talleres de fabricación de encofrados, talleres de elaboración de ferralla, almacenes de materiales y almacenes de residuos de la propia obra y plantas de tratamiento de los residuos de construcción y demolición de la obra.*

Dentro del concepto de residuo de construcción y demolición se incluye un conjunto de residuos que se engloban, en su mayor parte, en el capítulo 17 de la Lista Europea de Residuos, LER (Ministerio de Medio Ambiente, 2002; Comisión Europea, 2014c), con exclusión de los residuos peligrosos y del material en estado natural clasificado en la categoría 17 05 04 (tierras y piedras distintas de las especificadas en el código 17 05 03). En la Tabla 1 se incluye una descripción del flujo de estos residuos. En cambio, el protocolo de gestión de residuos de construcción y demolición en la UE (Comisión Europea, 2016c), considera que estos residuos son los generados en las actividades de las empresas pertenecientes al sector de la construcción e incluidos en la categoría 17 de la citada lista de residuos; es decir, a todos los procedentes de trabajos de construcción, reforma y demolición (peligrosos y no peligrosos, inertes, orgánicos e inorgánicos), aunque excluye de su ámbito de aplicación a la tierra excavada (17 05).

No obstante, en el ámbito de planificación del Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos, PEMAR 2016-2022 (Ministerio de Agricultura, 2015), así como de la regulación específica (Ministerio de la Presidencia, 2008), quedan excluidos de su ámbito de aplicación: *(i) las tierras y piedras no contaminadas por sustancias peligrosas reutilizadas en la misma obra, en una obra distinta o en una actividad de restauración,*

acondicionamiento o relleno, siempre y cuando pueda acreditarse de forma fehaciente su destino a reutilización, identificadas en el LER en el capítulo 17 05; (ii) los residuos de industrias extractivas regulados por la Directiva 2006/21/CE, de 15 de marzo, identificados en el LER en el capítulo 01; y (iii) los lodos de dragado no peligrosos reubicados en el interior de las aguas superficiales derivados de las actividades de gestión de las aguas y de las vías navegables, de prevención de las inundaciones o de mitigación de los efectos de las inundaciones o las sequías, reguladas por el Texto Refundido de la Ley de Aguas, por la Ley 48/2003, de 26 de noviembre, de régimen económico y de prestación de servicios de los puertos de interés general, y por los tratados internacionales de los que España sea parte, incluidos en el LER en el capítulo 17 05.

La clasificación de este conjunto de residuos suele hacerse atendiendo a su naturaleza distinguiendo: peligrosos, inertes o no peligrosos (Villoria Sáez, 2014). Los residuos peligrosos de construcción y demolición *se definen como escombros con propiedades peligrosas que pueden resultar perjudiciales para la salud humana o el medio ambiente. Esto comprende el suelo contaminado y dragado, materiales y sustancias que pueden incluir componentes adhesivos, sellantes o másticos (inflamables, tóxicos o irritantes), alquitrán (tóxico, cancerígeno), materiales a base de amianto que contienen fibras que pueden pasar a las vías respiratorias (tóxico, cancerígeno), madera tratada con fungicidas, pesticidas, etc. (tóxico, ecotóxico, inflamable), revestimientos halogenados ignífugos (tóxico, ecotóxico, cancerígeno), equipamiento que consta de policlorobifenilos (ecotóxico, cancerígeno), sistemas de iluminación que contienen mercurio (tóxico, ecotóxico), sistemas con clorofluorocarbonos (líquido de enfriamiento de equipos de aire acondicionado), material de aislamiento que contiene clorofluorocarbonos (170603), contenedores para sustancias peligrosas (solventes, pinturas, adhesivos, etc.) y el embalaje de residuos que puedan haber sido contaminados (Comisión Europea, 2016c). Los inertes son aquellos residuos que no se someten a ninguna transformación física, química o biológica significativa (por ejemplo, hormigón, ladrillo, mampostería, baldosas). Los residuos inertes no son solubles ni combustibles, ni reaccionan física ni químicamente ni de ninguna otra manera, no son biodegradables, ni afectan negativamente a otros materiales con los cuales entran en contacto de forma que puedan provocar la contaminación del medio ambiente o perjudicar la salud humana (Ministerio de la Presidencia, 2008). Finalmente, los residuos no peligrosos engloban a aquellos que no están incluidos en la definición de residuos inertes ni en la de peligrosos (Consejo de la Unión Europea, 2002; Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea, 2018a).*



Tabla 1. Capítulo 17 de la “Lista Europea de Residuos” sobre RCD

17 01	Hormigón, ladrillos, tejas y materiales cerámicos
17 01 01	Hormigón
17 01 02	Ladrillos
17 01 03	Tejas y materiales cerámicos
17 01 06*	Mezclas, o fracciones separadas, de hormigón, ladrillos, tejas y materiales cerámicos que contienen sustancias peligrosas
17 01 07	Mezclas de hormigón, ladrillos, tejas y materiales cerámicos, distintas de las especificadas en el código 17 01 06
17 02	Madera, vidrio y plástico
17 02 01	Madera
17 02 02	Vidrio
17 02 03	Plástico
17 02 04*	Vidrio, plástico y madera que contienen sustancias peligrosas o están contaminados por ellas
17 03	Mezclas bituminosas, alquitrán de hulla y otros productos alquitranados
17 03 01*	Mezclas bituminosas que contienen alquitrán de hulla
17 03 02	Mezclas bituminosas distintas de las especificadas en el código 17 03 01
17 03 03*	Alquitrán de hulla y productos alquitranados
17 04	Metales (incluidas sus aleaciones)
17 04 01	Cobre, bronce, latón
17 04 02	Aluminio
17 04 03	Plomo
17 04 04	Zinc
17 04 05	Hierro y acero
17 04 06	Estaño
17 04 07	Metales mezclados
17 04 09*	Residuos metálicos contaminados con sustancias peligrosas
17 04 10*	Cables que contienen hidrocarburos, alquitrán de hulla y otras sustancias peligrosas
17 04 11	Cables distintos de los especificados en el código 17 04 10 Tierra
17 05	Tierra (incluida la excavada de zonas contaminadas), piedras y lodos de drenaje
17 05 03*	Tierra y piedras que contienen sustancias peligrosas
17 05 04	Tierra y piedras distintas de las especificadas en el código 17 05 03
17 05 05*	Lodos de drenaje que contienen sustancias peligrosas
17 05 06	Lodos de drenaje distintos de los especificados en el código 17 05 05
17 05 07*	Balasto de vías férreas que contiene sustancias peligrosas
17 05 08	Balasto de vías férreas distinto del especificado en el código 17 05 07
17 06	Materiales de aislamiento y materiales de construcción que contienen amianto
17 06 01*	Materiales de aislamiento que contienen amianto
17 06 03*	Otros materiales de aislamiento que consisten en sustancias peligrosas o contienen dichas sustancias
17 06 04	Materiales de aislamiento distintos de los especificados en los códigos 17 06 01 y 17 06 03
17 06 05*	Materiales de construcción que contienen amianto
17 08	Materiales de construcción a partir de yeso
17 08 01*	Materiales de construcción a base de yeso contaminados con sustancias peligrosas 17
17 08 02	Materiales de construcción a base de yeso distintos de los especificados en el código 17 08 01
17 09	Otros residuos de construcción y demolición
17 09 01*	Residuos de construcción y demolición que contienen mercurio
17 09 02*	Residuos de construcción y demolición que contienen PCB
17 09 03*	Otros residuos de construcción y demolición (incluidos los residuos mezclados) que contienen sustancias peligrosas
17 09 04	Residuos mezclados de construcción y demolición distintos de los especificados en los códigos 17 09 01, 17 09 02 y 17 09 03

* Residuos peligrosos

2.2. Composición de los residuos de construcción y demolición

Con carácter general, los residuos que se generan en actividades de construcción y demolición están compuestos principalmente por hormigón, cerámicos, pétreos, asfalto y tierras de excavación; además pueden contener otros materiales como yeso, maderas, plásticos, aceros, papel y cartón, considerados como impurezas (Ministerio de Fomento, 2008). La mayor parte de ellos se pueden calificar como inertes y no suelen revestir características de peligrosidad en su forma original, pero durante la etapa de demolición pueden volverse peligrosos debido a su mezclado, procesamiento o eliminación. Así mismo, puede provocar la contaminación de los residuos en su conjunto, lo que impide someterlos a un aprovechamiento apropiado de reutilización o reciclado, presentando un gran riesgo para la salud humana (de la Hoz-Torres et al., 2018) y para el medio ambiente (Tam et al., 2018).

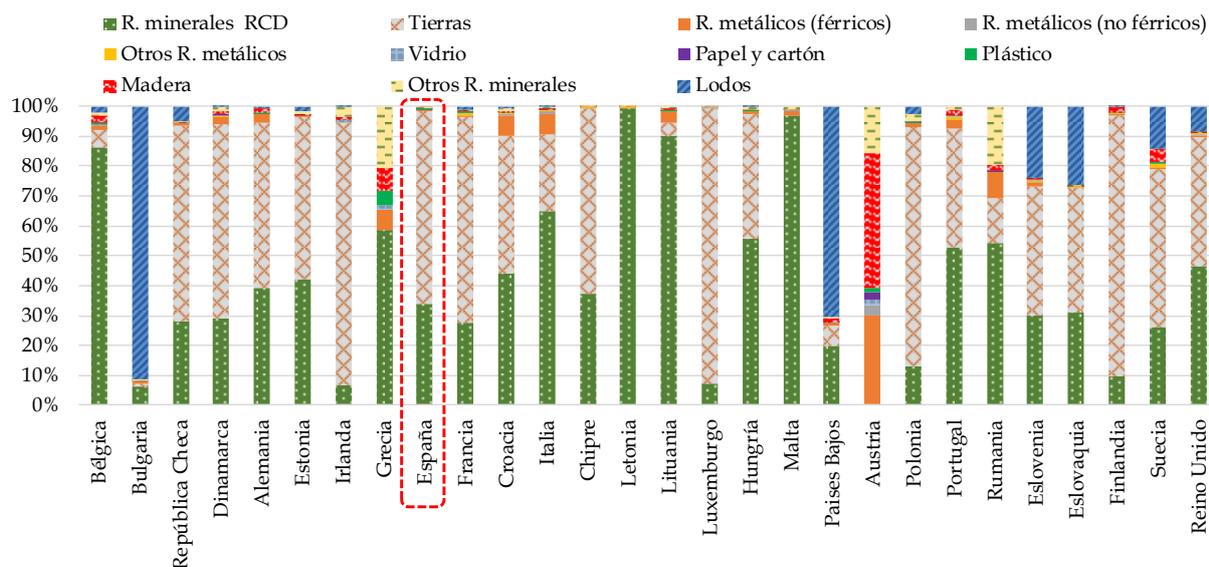


Figura 1. Composición de los residuos generados en el sector constructivo en la UE-28 (2016). Los datos de Irlanda y Grecia corresponden a los publicados en 2014. Fuente: Eurostat, (env_wasgen)

Algunos de los materiales y sustancias que pueden encontrarse en los residuos de construcción y demolición tienen alguna característica de peligrosidad al ser utilizadas junto con el hormigón en la estructura y en los acabados, pudiendo en este caso dar lugar a que los residuos sean caracterizados como peligrosos, de acuerdo con los criterios establecidos en el Reglamento (UE) 1357/2014 de la Comisión por el que se sustituye el anexo III de la Directiva 2008/98/CE y en la Decisión de la Comisión que



modifica la lista de residuos (Comisión Europea, 2014c, 2014d). Entre estos materiales y sustancias destacan (IHOBE, 2009): amianto (localizado en aislamientos, techos y baldosas y sellado resistente al fuego), pinturas a base de plomo (en techos, tejas y cables eléctricos), fenoles (en revestimientos a base de resina, adhesivos y otros materiales), policlorobifenilos (en el sellado de juntas y pinturas/abrigos ignífugos, así como en artículos eléctricos) e hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH) (frecuentemente presentes en fieltros para techos y pisos).

En Europa (Figura 1), en general, el mayor porcentaje de residuos producidos corresponde a los categorizados como no peligrosos, principalmente materiales minerales y a la tierra, frente al 2% clasificados como peligrosos (Eurostat, 2018a). Las diferencias en la composición de estos residuos entre unos países y otros puede ser reflejo de la tipología, tradición y técnicas de construcción local (Fischer y Werge, 2009; Villoria Sáez, 2014), condiciones climáticas, actividades económicas y desarrollo tecnológico de un área (Silva et al., 2014), además de a las características económicas del país (Eurostat, 2017). No obstante, también se explica por las grandes variaciones en la calidad de los datos y los años de referencia, la falta de control y de criterios específicos que permitan obtener un registro uniforme de los residuos de construcción y demolición generados en cada país; y falta de homogenización de las definiciones referentes a residuos de construcción y demolición (Fischer y Werge, 2009; Villoria Sáez, 2014).

En España, los residuos generados en las actividades de la construcción y demolición en el año 2016 (Figura 1) estaban compuestos de un 64% de material natural excavado, un 34% de residuos minerales (hormigón, cerámicos o áridos tratados) y un porcentaje minoritario de otros materiales (2%), siendo la cantidad correspondiente a residuos clasificados como peligrosos insignificante (0,22% en peso del total). En la Figura 2 se muestran los datos que se publicaron en el primer Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición, PNRCDC 2001-2006 (Ministerio de Medio Ambiente, 2001), y que posteriormente no fueron actualizados en el II Plan Nacional Integrado de Residuos, PNRCDC 2007-2015 (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2009), ni en el PEMAR 2016-2022 (Ministerio de Agricultura, 2015). Estos datos se basaron en estudios estadísticos realizados en obras reales, y mostraron que la mayor parte de ellos son residuos inertes (75%), estando integrada la principal fracción por

ladrillos, tejas y otros tipos de cerámica (54% del total generado), seguida del hormigón que constituye un 12%, los áridos no tratados y la piedra natural representan un 9%, mientras que el resto son cantidades variables de residuos de madera, metal, yesos, plásticos, entre otros.

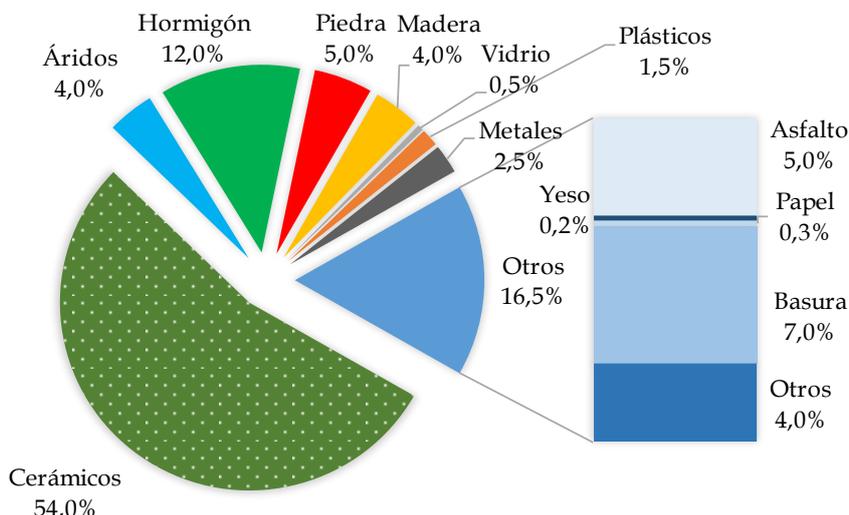


Figura 2. Composición típica de los RCD en España. Fuente: PNRCD 2001-2006 (Ministerio de Medio Ambiente, 2001)

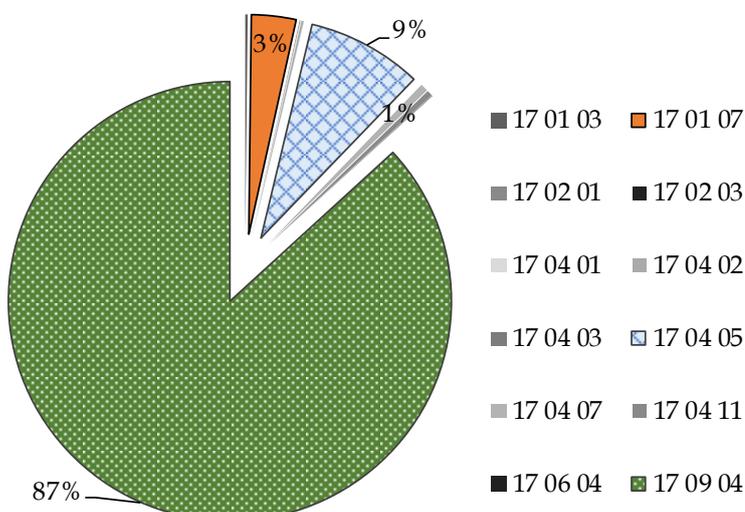


Figura 3. Composición de los RCD en Andalucía (2008). Fuente: PDTGRNP 2010-2019 (Consejería de Medio Ambiente, 2010)

En el ámbito andaluz, al igual que en otros casos, la información, y en consecuencia la composición de los residuos de construcción y demolición, es muy variable, lo que se explica por la generalizada insuficiencia de datos y la dificultad para efectuar mediciones adecuadas. No obstante el Plan Director Territorial de Residuos No Peligrosos de Andalucía 2010-2019, PDTGRNP 2010-2019 (Consejería de Medio



Ambiente, 2010) proporciona datos sobre la composición de los residuos según su clasificación mediante el código LER (Orden MAM/304/2002 2002; Decisión 2014/955/UE 2014). En la Figura 3 se observa que el 87% de los residuos han sido codificados como 17 09 04, que se corresponden con *Residuos mezclados de construcción y demolición distintos de los especificados en los códigos 17 09 01, 17 09 02 y 17 09 03*", seguidos por los codificados como 17 04 05, los *Residuos procedentes del hierro y acero* que representan un 9%, y la *Mezcla de hormigón, ladrillos, tejas y otros materiales cerámicos* (con código 17 01 07) presentes en un 3%; el resto de fracciones son minoritarias, con porcentajes inferiores al 1%.

2.3. Generación de residuos de construcción y demolición

El sector de la construcción genera una gran cantidad de residuos. Desde que en los años 90 se publicara el primer informe que estableció una visión general sobre los residuos de construcción y demolición (Symonds et al., 1999) hasta la actualidad, las estadísticas publicadas ofrecen una información heterogénea sobre la generación de los mismos en los países miembros de la UE.

Los principales resultados estadísticos estimados por Eurostat conforme al Reglamento (UE) 849/2010 de la Comisión de 27 de septiembre (Comisión Europea, 2010b), indicaron que en 2016 la cantidad total de residuos generados en la EU-28 por la totalidad de actividades económicas y hogares ascendió a 2535 millones de toneladas (última actualización a 7/11/2018). De esta cantidad el 36% correspondió con los generados en actividades del sector de la construcción, que supuso un total de 923 millones de toneladas de residuos. La participación del resto de actividades económicas fue del 25% para la minería y canteras, del 10% para la industria manufacturera, del 8% en los hogares, del 3% en los servicios de la energía y el 16% restante correspondió a los residuos procedentes de otras actividades económicas (Eurostat, 2018a).

La Tabla 2 recoge la cantidad de residuos generados en el sector de la construcción en los países de la UE en el periodo 2010-2016, mostrándose los diez más productores en la Figura 4. En la Figura 5 se refleja la evolución mantenida en dicho periodo por cada uno de los Estados miembros, la cual siguió diferentes tendencias a lo largo del tiempo,

en relación con la población, el volumen económico y la actividad extractiva de un país determinado. Unos países (Alemania, Reino Unido, Países Bajos o Austria) notificaron, en términos generales, un crecimiento en los residuos generados, debido al bajo grado de implementación de las políticas preventivas en algunos estados miembros (Akhtar y Sarmah, 2018); mientras que otros (Francia, Italia o Finlandia) tendieron a generar cada vez menos residuos.

Tabla 2. Generación de RCD en los Estados miembros durante el periodo 2010-2016 (datos en toneladas). Fuente: Eurostat (env_wasgen)

	2010	2012	2014	2016
UE-28	848.690.000	821.160.000	868.060.000	923.910.000
Francia	260.699.131	246.702.428	227.607.180	224.355.946
Alemania	190.990.217	197.527.868	206.466.169	220.499.432
Reino Unido	102.231.321	100.230.495	120.393.877	136.196.492
Países Bajos	78.063.887	81.354.111	90.734.851	98.551.957
Italia	59.340.134	52.965.743	51.683.579	54.576.762
España	37.946.523	26.129.151	20.418.071	35.827.923
Austria	9.010.097	19.470.934	40.265.570	44.914.816
Bélgica	18.164.920	24.570.406	26.383.330	19.573.150
Finlandia	24.645.393	16.033.874	16.296.811	13.825.168
Polonia	20.818.234	15.367.995	17.010.251	18.890.577
República Checa	9.353.673	8.592.900	9.409.944	10.141.985
Luxemburgo	8.866.757	7.079.473	5.979.235	7.614.894
Suecia	9.381.226	7.655.935	8.866.720	9.810.987
Dinamarca	3.142.215	3.867.209	10.572.098	12.224.799
Irlanda	1.609.762	365.723	1.884.390	-
Hungría	4.072.214	4.038.081	3.439.941	3.591.612
Grecia	2.086.080	812.519	479.999	-
Letonia	21.551	7.509	454.281	111.133
Portugal	1.779.897	928.394	1.512.950	1.710.703
Eslovaquia	1.786.430	806.184	1.386.685	967.275
Malta	988.070	1.040.846	1.241.079	1.354.892
Bulgaria	78.880	1.032.651	1.340.467	2.089.131
Eslovenia	1.509.476	535.154	815.010	541.574
Chipre	1.068.282	965.177	634.801	876.525
Rumania	237.502	1.325.341	1.050.434	323.461
Estonia	436.289	657.089	671.347	1.173.517
Lituania	356.772	419.136	434.737	505.758
Croacia	7.656	682.058	621.307	1.291.506

En España, en el año 2016 se generaron en torno a 129 millones de toneladas de residuos, de los cuales un 35,8 millones de toneladas corresponden a los residuos de construcción y demolición (Eurostat, 2018a). La evolución observada en el tiempo

(Figura 4) siguió un patrón totalmente diferente al observado en toda la UE, con una disminución considerable del 46% entre el año 2010 y el 2014, relacionada con la inestabilidad económica de España que se inició en el año 2007 (Ministerio de Agricultura, 2015); además de como consecuencia del avance en el grado de aplicación y de cumplimiento de la normativa vigente. A pesar de ello, la evolución correspondiente a la totalidad del periodo evaluado, desde 2010 a 2016 (Figura 5), muestra tan solo un descenso del 5,6%.

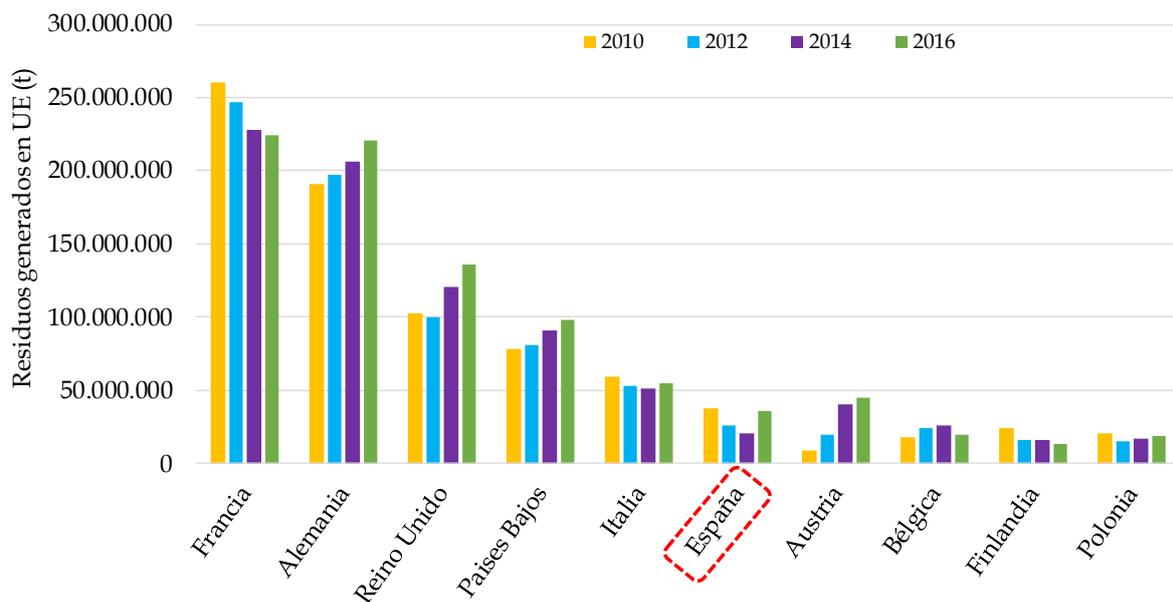


Figura 4. Generación de residuos en el sector de la construcción en los diez países de la UE más productores (periodo 2010-2016). Fuente: Eurostat (env_wasgen)

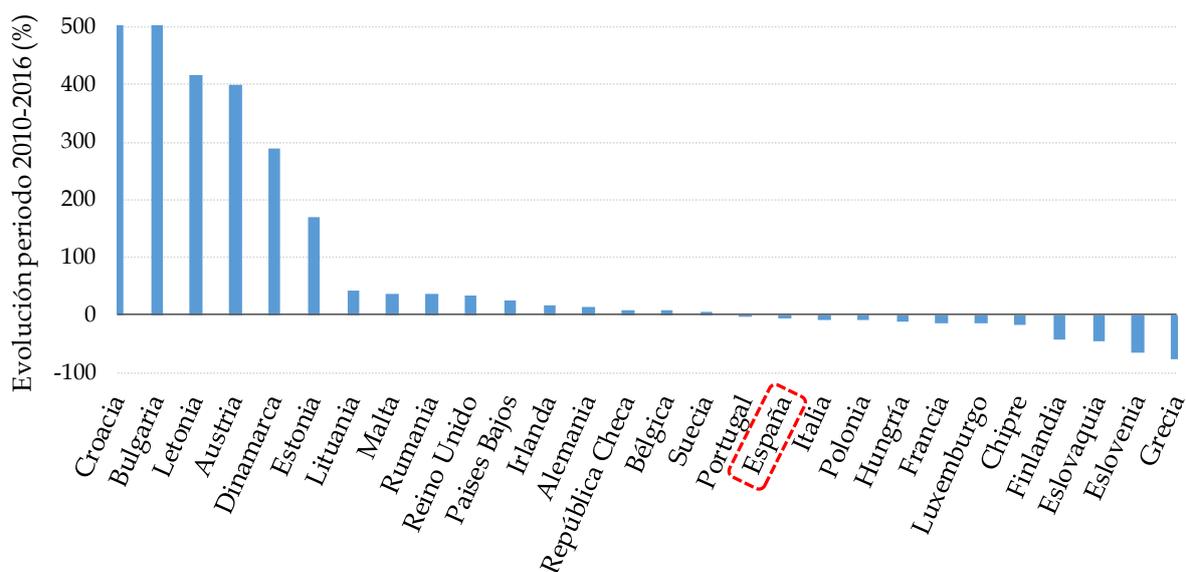


Figura 5. Evolución en la generación de residuos en la construcción en los Estados miembros, periodo 2010-2016. Fuente: Eurostat (env_wasgen)

Si se analizan los datos de producción por comunidades autónomas en el período 2010-2015, proporcionados por la federación y la asociación española de reciclado de residuos de construcción y demolición (Federación española de gestores de residuos de construcción y demolición, 2015; Asociación española de reciclaje de residuos de construcción y demolición, 2017), se observa en la Figura 6 que las comunidades con mayor generación de residuos son aquellas que han presentado una mayor actividad constructiva, como es el caso de Cataluña, Andalucía y Madrid; igualmente se muestra una disminución en la cantidad de residuos generados de forma generalizada con el paso del tiempo, hecho justificable por las mismas causas comentadas anteriormente. En el caso concreto de Andalucía se generaron en 2015 cerca de 3 millones de toneladas, cifra que decreció en un 58% con respecto a los residuos producidos en 2010 (Figura 6).

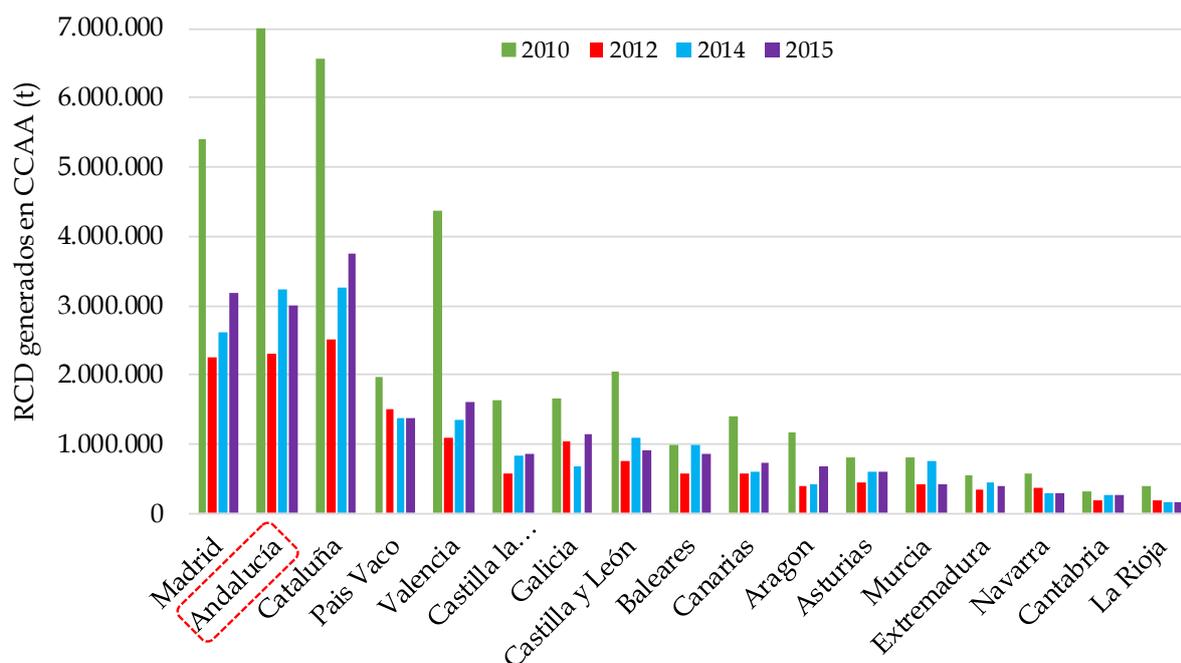


Figura 6. Datos de producción de RCD por CCAA en el periodo 2010-2015. Fuente: Asociación Española de reciclaje de residuos de construcción y demolición

2.4. Problemática ambiental de los residuos de construcción y demolición

El sector de la construcción, con un 10% del PIB, ocupa un lugar importante en la economía europea, por lo que se considera como el mayor consumidor de recursos



naturales no renovables, demandando cada año cerca de 2700 millones de toneladas de áridos (UEPG, 2017), además de generar importantes impactos sobre el medio ambiente, entre ellos la producción de grandes cantidades de residuos, siendo por ello un sector prioritario en la política ambiental de la UE (Comisión Europea, 2015; European Environment Agency, 2017).

Las materias primas utilizadas en la construcción pueden causar efectos negativos en el medio ambiente durante todas las fases de su ciclo de vida. Si se tiene en cuenta la fase de adquisición de las mismas, los efectos más comunes son aquellos vinculados a la minería, así como a las prácticas de explotación que pueden afectar a los hábitats y a la eliminación de la vegetación que aumenta la escorrentía, la pérdida de la capa superior del suelo y la sedimentación de los cursos de agua. Las emisiones y residuos generados durante la fase de producción repercuten directamente sobre la calidad del aire, del agua y del suelo. Así mismo, el transporte de los materiales hasta el lugar de producción, utiliza combustibles no renovables y genera emisiones contaminantes al aire (Suárez Silgado, 2015).

Con respecto al volumen de residuos que se generan en este sector, el problema ambiental deriva no solo de la abundancia de los mismos, sino de su inadecuado tratamiento, en la mayor parte de los casos. A la insuficiente prevención de la producción de residuos en origen se une el impacto ecológico negativo derivado del despilfarro de materias primas cuando no se contempla el reciclaje (Carpio et al., 2016). Según el informe de producción y gestión de residuos de construcción y demolición realizado en España en el periodo 2011-2015 (Asociación española de reciclaje de residuos de construcción y demolición, 2017), un 30% de los residuos producidos pueden considerarse incontrolados y depositados en lugares no autorizados, mientras que el 24% de los que sí acceden a instalaciones de gestores autorizados (plantas de tratamiento y/o vertederos), terminan eliminándose por no ser valorizables. En este caso, los efectos negativos están relacionados con la ocupación del suelo, el impacto visual en el medio, la contaminación de suelos, acuíferos y aire en vertederos incontrolados y la eliminación de estos residuos sin aprovechamiento de sus recursos valorizables.

En cuanto a las consideraciones medioambientales asociadas al uso de materiales procedentes del tratamiento de los residuos de la construcción y demolición, se destaca

el riesgo de contaminación de suelos, corrientes de agua superficial y acuíferos por lixiviación. Esto se debe a que los áridos reciclados pueden contener elementos tóxicos, tales como metales pesados, sulfatos, cloruros y compuestos orgánicos, que al entrar en contacto con el agua pueden disolverse en mayor o menor extensión y ser arrastrados a través de aguas de filtración. Es por ello que la cantidad de compuestos perjudiciales en los áridos reciclados debe ser muy baja (principalmente, de sulfatos) y que los materiales utilizados en proyectos de construcción e ingeniería (como firmes de carreteras) deben tener un comportamiento de lixiviación aceptable (Jiménez et al., 2012; Barbudo, 2012).

Con el objetivo de reducir el impacto derivado de la gestión de los residuos en el medio ambiente, la Directiva Marco de residuos (Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea, 2008) tiene en cuenta no sólo la fase de residuo sino todo el ciclo de vida de los productos y materiales, desde la generación hasta la destrucción, reforzando así el valor económico de los residuos. En este contexto, la aplicación del análisis de ciclo de vida se utiliza como uno de los principios rectores de la gestión de los residuos, donde los impactos medioambientales generados por los productos y por su proceso de producción se consideran dentro del ciclo de vida de los mismos, al objeto de minimizar, en la medida de lo posible, la carga ambiental que producen (Serres et al., 2016; López Gayarre et al., 2016; Cuenca-Moyano et al., 2018).

Se puede, por tanto, concluir que los impactos negativos asociados directa o indirectamente al sector de la construcción se pueden aliviar gestionando de forma eficiente los residuos generados y utilizándolos como materiales secundarios que puedan ser reincorporados a la actividad constructiva (Juan-Valdés et al., 2018; González-Fonteboa et al., 2018).

2.5. Gestión de los residuos de construcción y demolición

Se entiende por gestión de residuos al camino definido por el residuo, desde su generación hasta su disposición final de forma controlada y segura para el medio ambiente. De acuerdo a las definiciones incluidas en la normativa de residuos, la *“gestión de residuos”* engloba la recogida, el transporte, la valorización (incluida la clasificación), y la eliminación de los residuos, incluida la vigilancia de estas operaciones, así



como el mantenimiento posterior al cierre de los vertederos, incluidas las actuaciones realizadas en calidad de negociante o agente (Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea, 2008; Jefatura del Estado, 2011; Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea, 2018b). En este sentido, la gestión de los residuos constituye el eje fundamental de cualquier procedimiento que intente reducir el impacto que los mismos producen sobre el medio ambiente y, particularmente, los procedentes de la construcción y demolición (Bustillo Revuelta, 2010).

El proceso de gestión parte de la planificación de las actividades encaminadas a la retirada de los residuos generados en cualquier obra de construcción o demolición (en el caso de los residuos procedentes de la industria constructiva), pasando por su correcta identificación, recogida, transporte y finalizando en el tratamiento de los mismos. Con el objeto de aumentar la confianza en dicho proceso, así como en la calidad de los materiales resultantes del tratamiento de estos residuos, se publicó el protocolo de gestión de residuos de construcción y demolición de la UE (Comisión Europea, 2016c).

En base a esto, antes de cualquier proyecto de reforma o demolición, así como para cualquier material a reutilizar o reciclar, incluidos los peligrosos, debe llevarse a cabo una auditoría previa (Comisión Europea, 2016c; European Commission, 2018a). Ésta contribuye a identificar los residuos de construcción y demolición generados, a realizar una desconstrucción adecuada y a especificar las prácticas de desmantelamiento y demolición. Todo ello garantizará la seguridad de los trabajadores y conllevará al aumento de la cantidad y calidad de los productos reciclados.

Por su parte, la logística de residuos, conlleva la recogida separada de residuos (cada flujo de residuos se mantiene separado debido a su tipología y naturaleza) y el transporte adecuado de los mismos a una instalación de tratamiento específica, que en el caso de materiales voluminosos (asfalto, hormigón, etc.) no pueden transportarse por carretera durante largas distancias, máximo 35 km, ya que en caso contrario se reducirían los beneficios medioambientales asociados a su reciclaje.

El posterior procesamiento y tratamiento de los residuos requiere de la plena aplicación del principio de jerarquía, el cual ofrece beneficios de amplio alcance en

cuanto a la eficiencia de los recursos, la sostenibilidad y el ahorro de costes (Comisión Europea, 2015). Este principio está consolidado en la normativa comunitaria de residuos desde el año 2008 (Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea, 2008) e incorporado a la legislación española a través de la Ley de residuos (Jefatura del Estado, 2011), manteniendo el siguiente orden de prioridad: (i) prevención (disminución de los residuos que se generan, así como de su peligrosidad y establecer medidas de ecodiseño para los nuevos productos); (ii) preparación para la reutilización o reparación de residuos; (iii) reciclado (obtención de materiales con los que se fabricarán nuevos productos); (iv) otras formas de valorización de residuos, incluida la valorización energética; y (v) eliminación de residuos sin aprovechamiento alguno (depósito en vertederos y la incineración sin recuperación de energía). Concretamente, a nivel nacional, los instrumentos fundamentales de planificación de la estrategia de gestión de residuos son el Real Decreto 105/2008 (Ministerio de la Presidencia, 2008), el Programa Estatal de Prevención de Residuos 2014-2020 (Ministerio de Agricultura, 2013) y el PEMAR (Ministerio de Agricultura, 2015).

En lo relativo a la **prevención** en materia de residuos, ésta debe entenderse como las *medidas adoptadas antes de que una sustancia, material o producto se haya convertido en residuo, para reducir: (i) la cantidad de residuo, incluso mediante la reutilización de los productos o el alargamiento de la vida útil de los productos; (ii) los impactos adversos sobre el medio ambiente y la salud humana de la generación de residuos, o (iii) el contenido de sustancias nocivas en materiales y productos* (Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea, 2008). La prevención en la generación de residuos es la apuesta de la política de residuos que más beneficios ambientales proporciona, por ello ocupa la primera posición en la jerarquía de residuos. En el caso de los residuos de la construcción, las medidas prácticas de prevención de los mismos deben incorporarse en las diversas fases del proceso constructivo, es decir, desde la fabricación de los materiales de construcción, hasta el desarrollo de la obra, pasando por las fases en las que las obras se planifican y proyectan (Bustillo Revuelta, 2010).

La **reutilización** consiste en *cualquier operación mediante la cual productos o componentes que no sean residuos se utilizan de nuevo con la misma finalidad para la que fueron concebidos* (Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea, 2008). Las operaciones de preparación para la reutilización requieren siempre de operaciones previas de



comprobación, limpieza o reparación de los productos, mediante las cuales los productos o componentes de los mismos que se hayan convertido en residuos se preparan para que puedan reutilizarse con escaso o ningún tipo procesamiento. En teoría, una vez originado el residuo de la construcción, la reutilización ofrece aún más ventajas medioambientales que el reciclaje, ya que no surgen los impactos relacionados con la reelaboración.

El **reciclado** se define como *toda operación de valorización mediante la cual los materiales de residuos son transformados de nuevo en productos, materiales o sustancias, tanto si es con la finalidad original como con cualquier otra finalidad. Incluye la transformación del material orgánico, pero no la valorización energética ni la transformación en materiales que se vayan a usar como combustibles o para operaciones de relleno* (Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea, 2008). El reciclado presenta una gran diferencia con respecto a la reutilización que radica en el carácter transformado del nuevo producto reciclado. Las razones de ser del reciclaje son diversas, aunque siempre directamente relaciones con el medio ambiente, entre ellas cabe destacar la disminución en el vertido directo de los residuos del sector constructivo y el aumento del ciclo de vida de los materiales de construcción (Bustillo Revuelta, 2010).

La **valorización energética** solo se realiza a aquellos residuos que no se han podido evitar y que no sean ni reutilizables ni reciclables (con alto poder calorífico), en cuyo caso lo que se aprovecha no son los materiales que componen los residuos sino la energía contenida en ellos, a través del tratamiento térmico del residuo (madera, plástico y papel o cartón). Aunque esta es una opción preferible antes que el vertido, en el caso de los residuos de la construcción es prácticamente desechable, por un lado, porque éstos apenas poseen componentes valorizables energéticamente (como pueden ser las maderas); y, por el otro, porque su incineración causa problemas ambientales (como es el caso de los plásticos).

La Directiva 851 de 2018 (Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea, 2018b), que modifica a la Directiva Marco, introduce la definición de **valorización de materiales**, como *toda operación de valorización distinta de la valorización energética y de la transformación en materiales que se vayan a usar como combustibles u otros medios de generar energía. Incluye la preparación para la reutilización, el reciclado y el relleno y otras formas de valorización de materiales, tales como la transformación de residuos en materias primas*

secundarias con fines de ingeniería en la construcción de carreteras u otras infraestructuras.

La opción de **eliminación**, como último escalón dentro del citado principio de jerarquía, es la menos ecológica en la gestión de los residuos, y queda definida en la Directiva Marco, como *cualquier operación que no sea la valorización, incluso cuando la operación tenga como consecuencia secundaria el aprovechamiento de sustancias o energía*. Cuando se habla de eliminación se entiende como el vertido de residuos, sin embargo, existe una segunda modalidad de eliminación, como es la incineración sin recuperación de energía. El depósito en vertedero de los residuos de la construcción está prohibido en el Real Decreto de 2008 que regula su producción y gestión (Ministerio de la Presidencia, 2008), siempre que éstos no hayan sido sometidos a alguna operación de tratamiento previo.

Finalmente, dado que la vía más óptima para recuperar los residuos, en general, y de los derivados del sector de la construcción, en particular, es mediante el reciclaje, a continuación, se introduce el concepto de gestión relacionado con tratar el material de desecho como un recurso para ser nuevamente explotado, además del tratamiento recibido a los residuos de la construcción y demolición (según los últimos datos publicados).

2.5.1. De residuos a recursos

Teniendo en cuenta que la transformación de la UE en una economía hipocarbónica y eficiente en el uso de los recursos es una de las prioridades de la actual política comunitaria (Comisión Europea, 2013), el objetivo de la gestión de los residuos va encaminado a maximizar la utilización de los recursos disponibles, mediante la conversión de los residuos en nuevas materias primas.

La reincorporación al proceso productivo de los materiales contenidos en los residuos está incluida en la Directiva Europea de Residuos (Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea, 2008), así como en su última modificación (Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea, 2018b), en la legislación nacional (Jefatura del Estado, 2011) y en la normativa autonómica (Consejería de Medio Ambiente, 2012), a través del concepto "*fin de la condición de residuo*". Su desarrollo y aplicación tiene como



objetivo fomentar el uso de materiales de una alta calidad, procedentes de residuos, en las condiciones de máxima garantía para la protección de la salud humana y del medio ambiente. Dichas regulaciones en materia de residuos, indican que determinados residuos, como los procedentes de la construcción y demolición, dejarán de serlo cuando hayan sido objeto de reciclado u otras operaciones de valorización y cumplan los siguientes requisitos:

- las sustancias u objetos resultantes se deben usar para finalidades específicas;
- exista un mercado o una demanda para dichas sustancias u objetos;
- las sustancias u objetos resultantes cumplan los requisitos técnicos para finalidades específicas, la legislación existente y las normas aplicables a los productos; y
- el uso de la sustancia u objeto resultante no genere impactos adversos para el medio ambiente o la salud.

En este contexto, a medida que la sociedad se encamina hacia una economía circular todos aquellos materiales que pueden reciclarse se reinvierten como nuevas materias primas, en el caso concreto de los materiales minerales, éstos podrán utilizarse con mayor eficiencia en el sector constructivo, aumentando así la seguridad del suministro. Además de ser posible comercializar con ellos como "*materias primas secundarias*" y transportarlas exactamente igual que si se tratara de materias primas primarias procedentes de recursos extractivos tradicionales (Comisión Europea, 2014a, 2015).

No obstante, en la actualidad, las materias primas secundarias todavía representan una pequeña proporción de los materiales utilizados en la UE (con algunas excepciones como el acero, papel o plástico). Uno de los obstáculos a que se enfrentan los operadores que deseen utilizar este tipo de materias es la incertidumbre sobre la calidad de las mismas. En consecuencia, las prácticas de gestión sostenible de los residuos (Ministerio de Agricultura, 2015) tienen una repercusión directa en la cantidad y la calidad de estos materiales y, por lo tanto, es esencial contar con medidas para mejorar dichas prácticas. Entre ellas se encuentran las recogidas en el protocolo de gestión de los residuos de construcción (Comisión Europea, 2016c), entre las medidas propuestas, incluye que los materiales obtenidos de la construcción pueden reciclarse in situ o en un centro de reciclaje y transformarse en nuevos recursos.

Por tanto, la conversión de los residuos de construcción y demolición en recursos o áridos reciclados, constituye una parte esencial en el uso eficiente de los mismos y permite cerrar del círculo de los productos que dieron lugar a estos residuos (Figura 7), logrando consecuentemente niveles más elevados de reciclado, así como una menor eliminación en vertedero y reduciendo el impacto sobre el medio ambiente y la salud (Comisión Europea, 2011a, 2011b, 2014b, 2015 ; Parlamento Europeo, 2015; Comisión Europea, 2017).

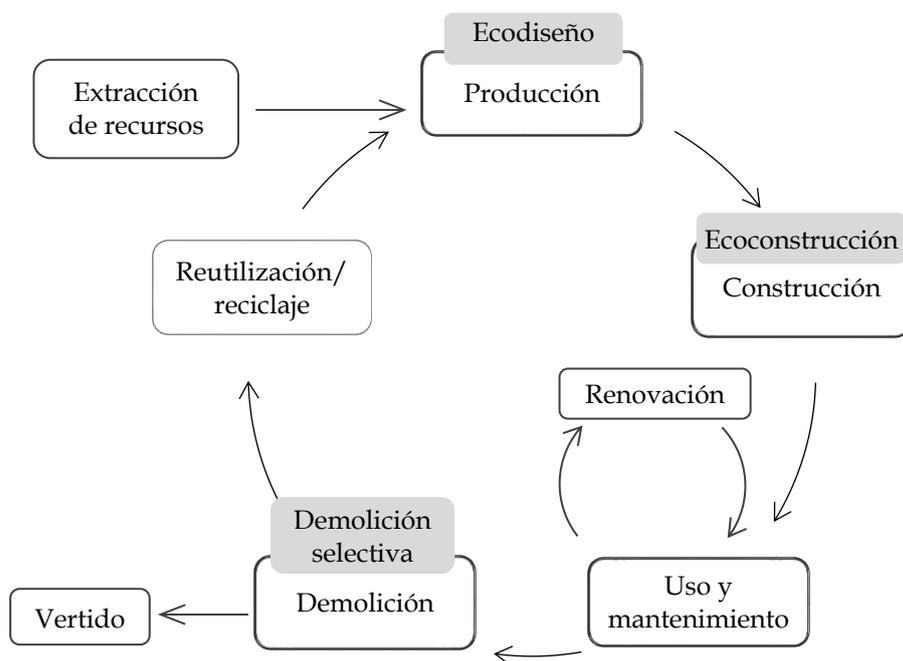


Figura 7. Ciclo cerrado de los materiales de construcción en una economía circular

A nivel europeo se fomenta la utilización de materiales reciclados para la construcción mediante la contratación pública ecológica (Comisión Europea, 2017); y a nivel nacional, el reglamento regulador de los residuos procedentes del sector constructivo (Ministerio de la Presidencia, 2008) y el PEMAR 2016-2022 (Ministerio de Agricultura, 2015) fomentan la reutilización y reciclado de los residuos, junto con el desarrollo y potenciación del mercado de los recursos obtenidos, impulsando la utilización de áridos reciclados, un porcentaje mínimo del 5%, tanto en obra pública y privada.

Según el último informe anual publicado por la asociación europea de áridos, 2016-2017 (UEPG, 2017), el sector del árido produjo en torno a 277 millones de toneladas de



materiales secundarios en 2015, incluidos los áridos reciclados, reutilizados y fabricados, que corresponde al 10,4% de la producción total en la UE. Sin embargo, la contribución de los materiales reciclados a la demanda global de materias primas sigue siendo relativamente pequeña, que según el indicador correspondiente (Comisión Europea, 2018; European Commission, 2018b), los áridos reciclados cubren tan sólo un 8% de la demanda total de materiales. En España el mercado de este tipo de áridos se encuentra también entre los menos desarrollados. Según las estimaciones de ANEFA en 2016 se consumieron algo más de un millón de toneladas de áridos reciclados, que corresponde tan sólo al 1% del total (ANEFA, 2017). A pesar de ello, su uso siempre va a depender del contexto local, de las características del mercado, así como de la oferta y la demanda existente.

Por último, prima que las autoridades a todos los niveles proporcionen incentivos para promover el uso de los materiales reciclados, a través de la contratación pública, principalmente, para así reducir, en gran medida, los obstáculos relacionados con las deficiencias de mercado, equipar el coste del material reciclado con el del material virgen (integración de los costes ambientales) y dividir equitativamente los costes de gestión de los residuos de la construcción y demolición en toda la cadena de valor de los mismos.

2.5.2. Tratamiento de los residuos de construcción y demolición

La Directiva Marco de residuos (Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea, 2008), así como el PEMAR (Ministerio de Agricultura, 2015) como instrumentos de la política de residuos en el ámbito europeo y nacional, establecen los objetivos mínimos a cumplir antes de 2020. En el caso específico de los residuos de la construcción y demolición se recoge que la cantidad destinada a la preparación para la reutilización, el reciclado y otras formas de valorización, con exclusión de los residuos peligrosos y los materiales en estado natural definidos en la categoría 17 05 04 de la lista de residuos, deberá alcanzar como mínimo el 70% en peso del total producido.

De acuerdo a los datos publicados por Eurostat conforme al Reglamento (UE) 849/2010 de la Comisión de 27 de septiembre (Comisión Europea, 2010b), en la UE-28 en el año 2016 se trataron alrededor de 295 millones de toneladas correspondientes a

la fracción mineral de los residuos no peligrosos de construcción y demolición (hormigón, ladrillos, azulejos, cerámica y piedra). La mayor parte de estos residuos se destinó a operaciones de reciclaje (83,8%), frente a un 5,8% utilizado en operaciones de relleno de zonas excavadas, un 10% se llevaron a vertedero y un insignificante porcentaje se destinó a la incineración (0,4%), ya sea con recuperación de energía o sin ella.

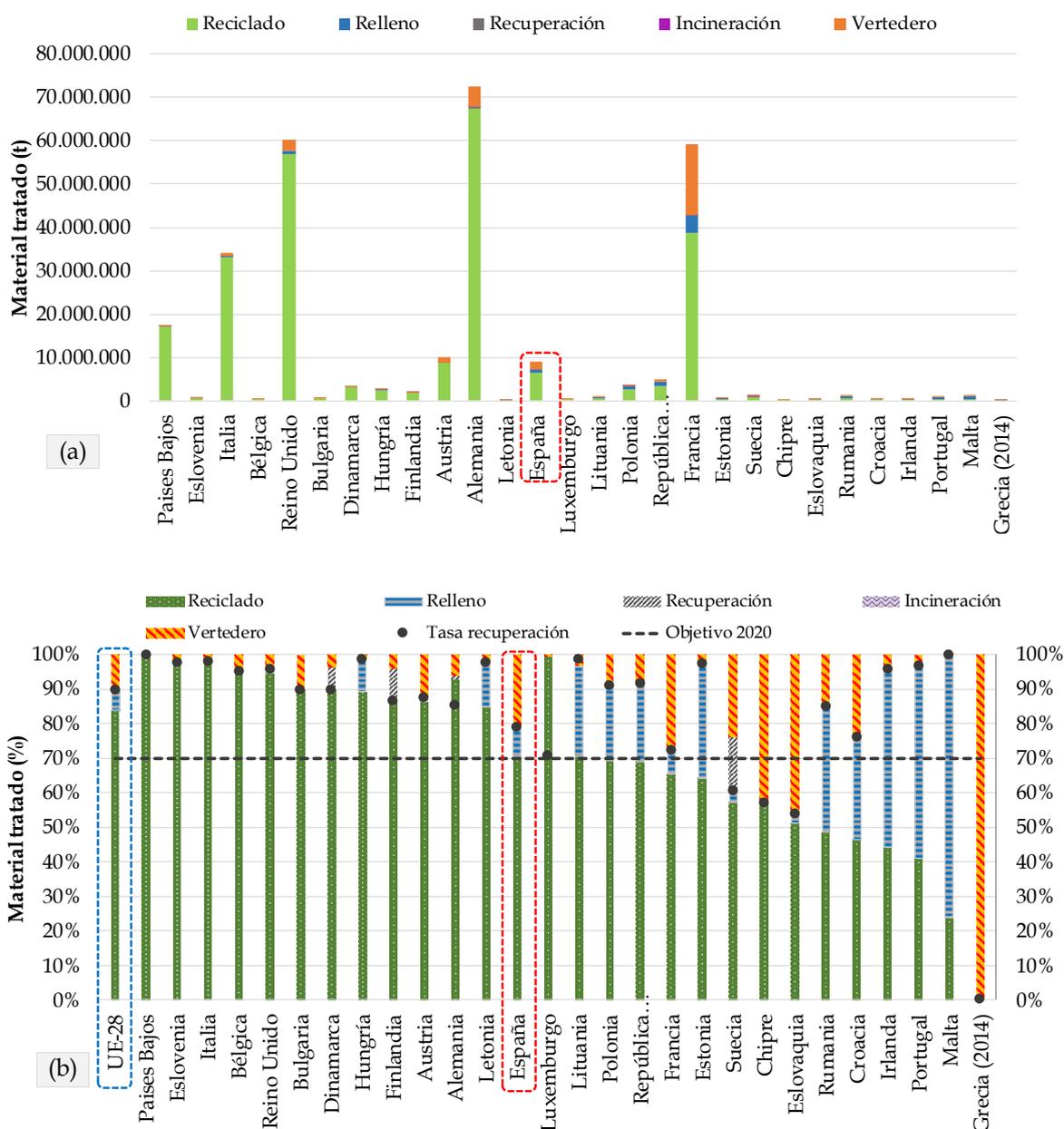


Figura 8. Nivel de tratamiento de la fracción mineral de los RCD no peligrosos generados en los países de la UE en 2016, en toneladas (a) y en porcentaje acumulado (b). Fuente: Eurostat (env_wastrt)

Los datos analizados de la Figura 8a muestran diferencias significativas entre los países de la UE en cuanto al uso que hacen de los métodos de tratamiento, siendo el reciclado la operación de valorización más realizada. Por ejemplo, tal y como se observa en la Figura 8b, unos Estados miembros presentan porcentajes de reciclaje entre el 100% (Países Bajos, Eslovenia o Italia) y el 40% (Croacia, Irlanda o Portugal), mientras que otros optan por el depósito en vertederos, con valores totales (Grecia) o superiores al 40% (Eslovaquia y Chipre) frente a porcentajes inferiores al 1% (Luxemburgo, Malta y Países Bajos).

Sin embargo, si se tiene en cuenta que el objetivo de recuperación también incluye la operación de relleno, la UE recuperó cerca del 90% de los residuos generados en el sector de la construcción (fracción mineral no peligrosa) y, en el caso de los Estados miembros, el objetivo del 70% fue alcanzado por la gran mayoría de ellos (Figura 8b). Este hecho depende principalmente de las políticas de gestión de residuos de cada país, de los instrumentos económicos disponibles, así como de los avances tecnológicos (Oliveira Neto et al., 2017).

En cuanto a la evolución en el tiempo, Eurostat tan sólo recoge los datos relativos al tratamiento de estos residuos (reciclaje) desde el año 2010 hasta el 2016 (Figura 9). En ellos se observa que la UE ha experimentado en este periodo un aumento paulatino en el porcentaje de residuos valorizados del 21%, además de una considerable disminución en la cantidad de residuos eliminados en verteros (52%).

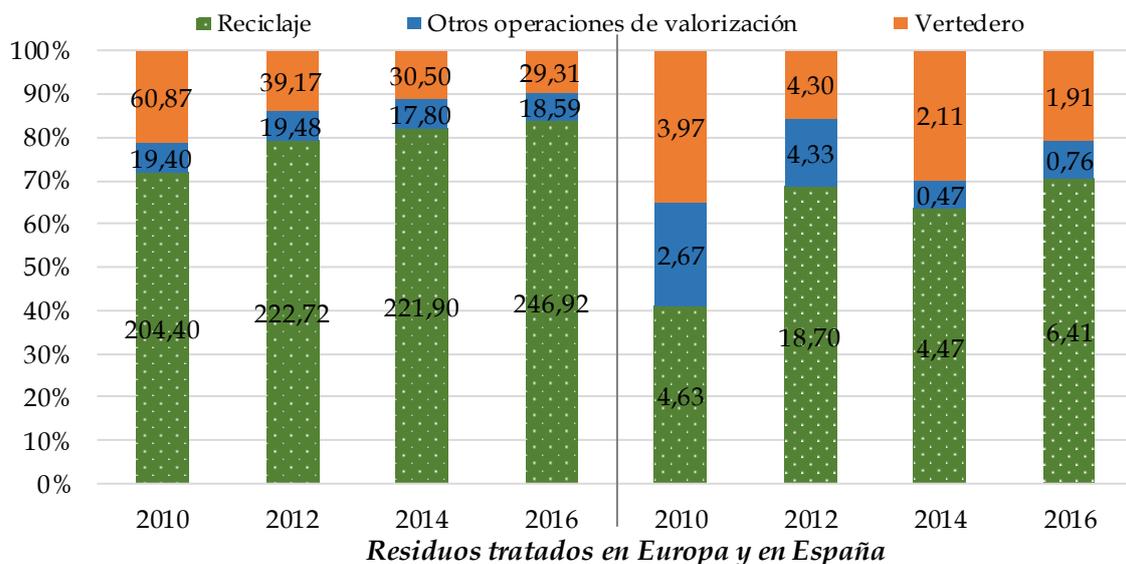


Figura 9. Evolución del tratamiento de residuos entre 2010 y 2016 en Europa (datos numéricos en millones de toneladas). Fuente: Eurostat (env_wastrt)

En España en 2016 se trató un volumen de residuos minerales procedentes de los residuos de construcción y demolición de 9,08 millones de toneladas (excluidos los residuos peligrosos y la tierra de excavación). De ellos un 70,6% se destinó a reciclaje, un 8,4% a operaciones de relleno, mientras que el depósito de residuos en vertedero alcanzó el 21% restante; en total el porcentaje de valorización de estos residuos fue del 79%, alcanzando con ello el objetivo marcado para 2020 (Figura 8b). En relación con el avance en el tratamiento de los mismos experimentado en el tiempo, se observa en la Figura 9 que la cantidad de residuos de la construcción y demolición reciclados creció considerablemente desde 2010 a 2012 en 14 millones de toneladas y después decreció en los siguientes periodos bianuales, hasta un 66%; a pesar de ello, en el 2016 se depositaron en vertedero, aproximadamente, la mitad de los residuos registrados en 2012 y en 2010 (Eurostat, 2018b).

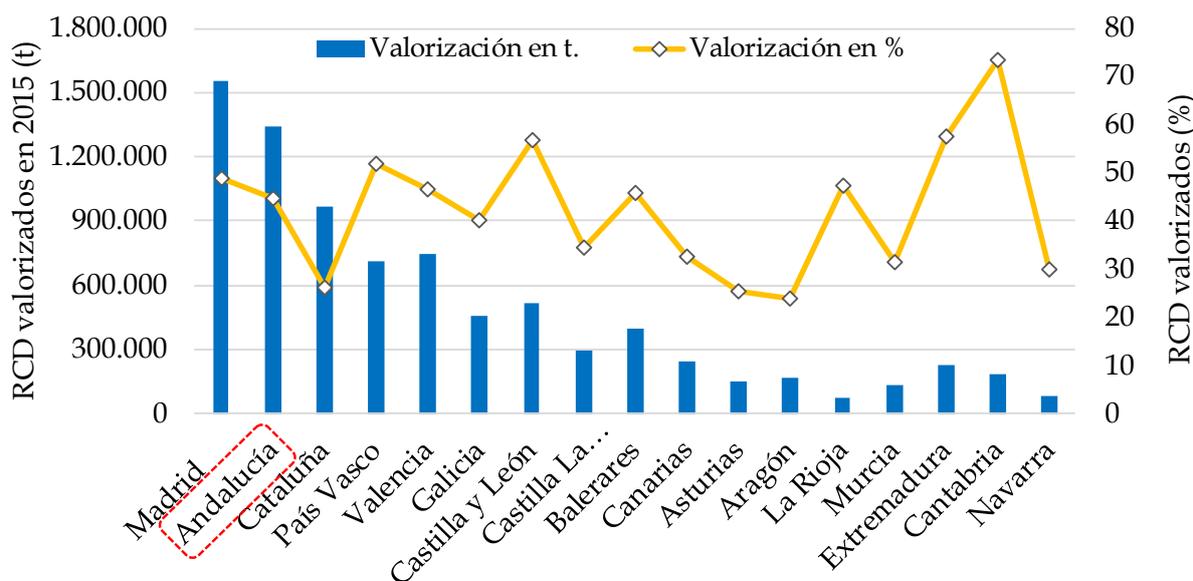


Figura 10. RCD valorizados (reciclaje) en cada CCAA en 2015 (en toneladas y en porcentaje). Fuente: Asociación española de reciclaje de RCD

En lo relativo al tratamiento de estos residuos a nivel de CCAA, la Asociación española de reciclaje de residuos de construcción y demolición ha publicado los datos correspondientes hasta el año 2015 (Asociación española de reciclaje de residuos de construcción y demolición, 2017), los cuales se muestran en la Figura 10. En ella se observa que Madrid es la comunidad que más toneladas de residuos valorizó y La Rioja la que menos; sin embargo, en relación con el total de residuos de construcción

generados, Cantabria y Aragón fueron las comunidades que presentaron el mayor y el menor porcentaje en peso, del 74 y 24%, respectivamente. Cabe destacar la puesta cero en operaciones destinadas a otras formas de valorización (incineración y recuperación de energía) en todas las CCAA, debido al déficit de instalaciones para cubrir las necesidades de tratamiento de los residuos procedentes del sector de la construcción generados en cada comunidad. En Andalucía, la cantidad de residuos de construcción y demolición destinados a operaciones de valorización fue de 1,34 millones de toneladas en 2015, equivalente a un 45% del total generado (3 millones de toneladas); el porcentaje correspondiente a las operaciones destinadas a vertido y almacenado en stock fue del 11% y del 4%, respectivamente, mientras que el 40% restante representa a los residuos incontrolados.

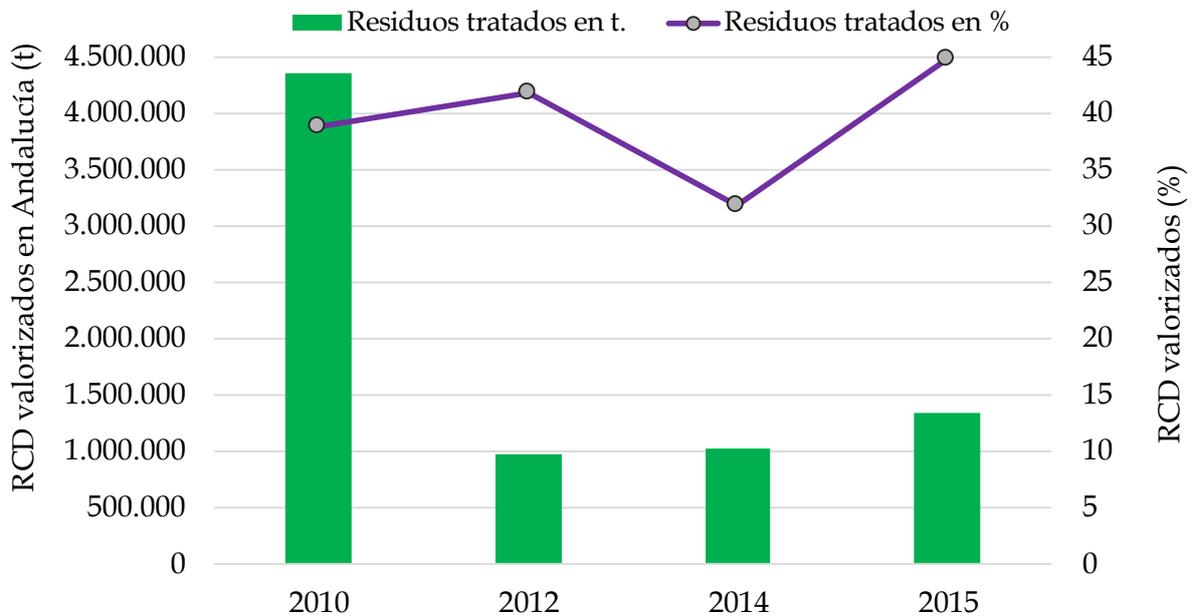


Figura 11. Residuos valorizados en Andalucía en toneladas y el porcentaje correspondiente respecto al total producido entre 2010 y 2015. Fuente: Asociación española de reciclaje de RCD

En la Figura 11 se muestra la evolución del tratamiento de los residuos (reciclaje) en esta comunidad durante el periodo comprendido entre 2010 y 2015 (Federación española de gestores de residuos de construcción y demolición, 2015; Asociación española de reciclaje de residuos de construcción y demolición, 2017). Se observa que la cantidad de residuos reciclados en 2015 creció en 318 mil toneladas (31%) con respecto al año anterior, aunque decreció considerablemente en relación con el total tratado al inicio de dicho periodo (69%). Aún así el porcentaje de valorización en

Andalucía, en relación a la cantidad generada, fue del 39% en 2010 y del 45% en 2015. Se puede por tanto concluir que la aplicación de medidas comunitarias, nacionales y autonómicas en materia de residuos está progresando, lo que indica que la transición hacia una economía circular se está llevando a cabo y más teniendo en cuenta que el flujo de estos residuos es el más importante de la UE. Sin embargo, cabe señalar que el objetivo cuantitativo de valorización de los residuos de la construcción propuesto para 2020, del 70% en peso, incluye el reciclaje, la reutilización y otras formas de valorización, además de la operación del relleno, la cual no conlleva el mantenimiento del valor de los materiales en la economía y que, por lo tanto, no debería contabilizarse a efectos de la consecución de los objetivos de reciclado (Comisión Europea, 2018; European Commission, 2018b; Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea, 2018b). Este hecho se ha tenido en consideración en la nueva Directiva 2018/851 que modifica a la Directiva Marco (Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea, 2018b), en la que se establecen normas para el cálculo de la consecución de los objetivos de preparación para la reutilización y de reciclado.

2.6. Marco regulador de residuos de la construcción y demolición

Ante la problemática surgida en las últimas décadas por el creciente volumen de los residuos procedentes del sector de la construcción, se ha venido desarrollando un proceso, tanto de legislación como de normalización técnica, que ha conformado el actual panorama reglamentario sobre estos residuos. Una gestión satisfactoria de los residuos de construcción y demolición solo puede llevarse a cabo si existen las condiciones marco y las políticas adecuadas. Para que esto sea posible, es de vital importante el dialogo entre los entes públicos (a nivel local, regional, nacional y europeo) y privados en el ámbito de la gestión de los mismos.

En los siguientes subcapítulos se presenta una recopilación de los aspectos legislativos y/o normativos, en los ámbitos europeo, nacional, autonómico y provincial, que afectan a los residuos de construcción y demolición, comentándose exclusivamente las aportaciones que los textos jurídicos más importantes hagan sobre este tipo de residuos.



2.6.1. Ámbito europeo

Los asuntos medioambientales constituyen una prioridad para los poderes públicos y los agentes económicos de la Comunidad Europea. En la década de los 70 surge inicialmente la preocupación por el medio ambiente, que está en la raíz de las primeras iniciativas comunitarias en esta materia, y desde finales de los años 90 la UE considera a los residuos de construcción y demolición como un flujo prioritario de residuos. Con la puesta en marcha de los diferentes Programas de Acción Comunitarios, la estrategia de la UE para el manejo de residuos se ha centrado en el uso sostenible de los recursos existentes, destacando en la prevención de los residuos, la utilización de material reciclado y la reconversión energética, con el fin de minimizar los efectos negativos sobre el medio ambiente. Además, la UE ha propuesto como objetivo convertirse, de aquí a 2020, en una economía inteligente, sostenible e integradora, por medio de una serie de políticas y actuaciones dirigidas a avanzar hacia una economía hipocarbónica y eficiente en el uso de los recursos (Comisión Europea, 2010a; Consejo Europeo, 2010; Comisión Europea, 2013). En este sentido, se han ido publicando sucesivos **Programas de acción en materia de medio ambiente (PMA)** que han proporcionado el marco para la actuación medioambiental de la UE desde 1973 hasta el tiempo presente.

En la actualidad, el marco regulador en materia de residuos en la UE está formado por las disposiciones que se relacionan en la Tabla 3. Así mismo, se enumera la regulación existente en otras materias sobre las que especialmente repercuten los residuos, como lo relativo al vertido, listado, estadística y gestión de residuos (Tabla 4), además de a la sostenibilidad, economía circular y al medio ambiente (Tabla 5 y Tabla 6).

La Directiva Marco (Directiva 2008/98/CE) tiene como objetivo la protección del medio ambiente y la salud humana mediante la prevención de los efectos nocivos que suponen la producción y la gestión de residuos (Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea, 2008). Esta Directiva introduce un enfoque destinado a tener en cuenta no sólo la fase de residuos, sino todo el ciclo de vida de los productos y materiales. Este enfoque se plasma, entre otros, en el requisito general de adoptar medidas para garantizar que cualquier persona física o jurídica que desarrolle, fabrique, procese, trate, venda o importe productos de forma profesional vea ampliada su responsabilidad como productor del producto.

La Directiva Marco, además, da respuesta a la necesidad de aclarar aspectos relacionados con la gestión cotidiana de residuos, tales como el almacenamiento temporal, la distinción entre residuos y subproductos o la diferenciación de operaciones de reciclado, valorización y eliminación. Finalmente, la Directiva Marco establece una serie de objetivos, con la finalidad de avanzar hacia una sociedad europea del reciclado con un alto nivel de eficiencia de los recursos, que antes de 2020 deberá aumentarse hasta un mínimo del 70% de su peso la preparación para la reutilización, el reciclado y otra valorización de materiales, incluidas las operaciones de relleno que utilicen residuos como sucedáneos de otros materiales, como los residuos no peligrosos procedentes de la construcción y de las demoliciones.

Tabla 3. Marco regulador en materia de residuos en Europa

Residuos
Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de noviembre de 2008, sobre los residuos
Decisión 2011/753/UE de la Comisión, de 18 de noviembre de 2011, por la que se establecen normas y métodos de cálculo para la verificación del cumplimiento de los objetivos previstos en el artículo 11, apartado 2, de la Directiva 2008/98/CE.
Decisión de ejecución 2013/727/UE de la Comisión, de 6 de diciembre de 2013, por la que se establece el formato para la notificación de la información sobre la adopción y las revisiones sustanciales de los planes de gestión de residuos y de los programas de prevención de residuos, dictada de conformidad con el art. 33.2 de la Directiva 2008/98/CE.
Reglamento (UE) 1357/2014 de la Comisión, de 18 de diciembre de 2014, por el que se sustituye el anexo III de la Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, sobre los residuos y por la que se derogan determinadas Directivas, y en particular, su artículo 38, apartado 2, con relación a las características de los residuos que permiten calificarlos de peligrosos.
Directiva (UE) 2015/1127 de la Comisión de 10 de julio de 2015 por la que se modifica el anexo II de la Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, sobre los residuos y por la que se derogan determinadas Directivas.
COM (2015) 595 , propuesta de Directiva del Parlamento Europeo y del Consejo 2015/0275 (COD), de 2 de diciembre de 2015, por la que se modifica la Directiva 2008/98/CE, sobre los residuos.
DOUE (L) 42 de 18/02/2017 . Corrección de errores del Reglamento (UE) 1357/2014 de la Comisión, de 18 de diciembre de 2014, por el que se sustituye el anexo III de la Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, sobre los residuos y por la que se derogan determinadas Directivas.
DOUE 2018/C 124/01 . Comunicación de la Comisión – Orientaciones técnicas sobre la clasificación de los residuos.
Directiva (UE) 2018/851 del Parlamento europeo y del Consejo de 30 de mayo de 2018 por la que se modifica la Directiva 2008/98/CE sobre los residuos.

En diciembre de 2015 la Comisión Europea publicó un paquete sobre la economía circular (Comisión Europea, 2015), que incluye propuestas legislativas sobre residuos, con el objetivo a largo plazo de reducir los depósitos en vertederos y aumentar el



reciclado y la reutilización. Para cerrar el ciclo de vida de los productos, incluye un plan de acción en cada etapa de la cadena de valor, desde la producción hasta el consumo, la reparación y la fabricación, la gestión de los residuos y las materias primas secundarias que se reintroducen en la economía.

Tabla 4. Regulaciones en materia de vertido, estadística y gestión de residuos en Europa

Vertido de residuos
Directiva 1999/31/CE del Consejo, de 26 de abril de 1999, relativa al vertido de residuos, que tiene por objeto procedimientos y orientaciones para impedir o reducir los efectos negativos en el medio ambiente del vertido de residuos
Decisión del Consejo 2003/33/CE , de 19 de diciembre de 2002, por la que se establecen los criterios y procedimientos de admisión de residuos en los vertederos con arreglo al artículo 16 y el anexo II de la Directiva 1999/31/CE.
Directiva (UE) 2018/850 del Parlamento Europeo y del Consejo de 30 de mayo de 2018 por la que se modifica la Directiva 1999/31/CE relativa al vertido de residuos.
Lista de residuos
Decisión 2000/532/CE de la Comisión, de 3 de mayo que sustituye a la Decisión 94/3/CE por la que se establece una lista de residuos de conformidad con la letra a) del artículo 1 de la Directiva 75/442/CEE del Consejo relativa a los residuos y a la Decisión 94/904/CE del Consejo por la que se establece una lista de residuos peligrosos en virtud del apartado 4 del artículo 1 de la Directiva 91/689/CEE del Consejo relativa a los residuos peligrosos.
Decisión del Consejo 2001/573/CE , de 23 julio, por la que se modifica la Decisión 2000/532/CE, en lo relativo a la lista de residuos, concretamente su único anexo.
Decisión de la Comisión 2014/955/UE , de 18 de diciembre de 2014, por la que se modifica la Decisión 2000/532/CE, sobre la lista de residuos, de conformidad con la Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, en relación a las características de peligrosidad de ciertos residuos.
Estadísticas de residuos
Reglamento (CE) n° 2150/2002 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 25 de noviembre, relativo a las estadísticas sobre residuos.
Reglamento (UE) n° 849/2010 de la Comisión de 27 de septiembre de 2010, por el que se modifica el Reglamento (CE) n° 2150/2002 del Parlamento Europeo y del Consejo, relativo a las estadísticas sobre residuos, concretamente sustituye los anexos I, II y III del mismo.
Gestión de residuos
Protocolo gestión de residuos de construcción y demolición en la UE , publicado por la Comisión Europea en septiembre de 2016.
Diretrizes para las auditorías de residuos antes de las obras de demolición y renovación de edificios. Gestión de residuos de construcción y demolición en UE (<i>Guidelines for the waste audits before demolition and renovation works of buildings. UE Construction and Demolition Waste Management</i>), publicada por la Comisión Europea en abril de 2018.

Los residuos de construcción y demolición por su gran volumen de producción, impacto en el medio y facilidad de reciclaje, representan uno de los cinco sectores prioritarios de este paquete. Con posterioridad se presentó un informe sobre la aplicación de dicho plan de acción (Comisión Europea, 2017), además de una

comunicación que incluye un marco de seguimiento que mide los progresos alcanzados en este campo y que está formado por un conjunto de indicadores clave significativos que recogen los elementos principales de la economía circular (Comisión Europea, 2018).

Tabla 5. Regulaciones europeas en materia de medio ambiente

Medio ambiente
Decisión 1386/2013/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 20 de noviembre de 2013, relativa al Programa General de Acción de la Unión en materia de Medio Ambiente hasta 2020 « <i>Vivir bien, respetando los límites de nuestro planeta</i> » (2013-2020).
COM (2017) 63. Comunicación de la Comisión al Parlamento Europeo, al Consejo, al Comité económico y social europeo y al Comité de las regiones, de 3 de febrero de 2017. <i>Revisión de la aplicación de la normativa medioambiental de la UE: problemas comunes y cómo combinar esfuerzos para obtener mejores resultados.</i>

Tabla 6. Documentos informativos en materia de sostenibilidad y economía circular en la U. Europea

Sostenibilidad y Economía circular
COM (2010) 2020. Comunicación de la Comisión de 3 de marzo de 2010. Europa 2020. <i>Una estrategia para un crecimiento inteligente, sostenible e integrador.</i>
COM (2011) 21. Comunicación de la Comisión de 26 de enero de 2011. <i>Una Europa que utilice eficazmente los recursos - Iniciativa emblemática con arreglo a la Estrategia Europa 2020.</i>
COM (2011) 571. Comunicación de la Comisión de 20 de septiembre de 2011. <i>Hoja de ruta hacia una Europa eficiente en el uso de los recursos.</i>
COM (2012) 433. Comunicación de la Comisión de 31 de julio de 2012. <i>Estrategia para una competitividad sostenible del sector de la construcción y de sus empresas.</i>
COM (2014) 397. Propuesta de Directiva del Parlamento Europeo y del Consejo 2014/0201 (COD), del 2 de julio de 2014, por la que se modifican varias Directivas, entre ella la Directiva 2008/98/CE.
COM (2014) 445. Comunicación de la Comisión de 1 de julio de 2014. <i>Oportunidades para un uso más eficiente de los recursos en el sector de la construcción.</i>
COM (2014) 398. Comunicación de la Comisión de 25 de septiembre de 2014. <i>Hacia una economía circular: un programa de cero residuos para Europa.</i>
DOUE 2017/C 265/08. Resolución del Parlamento Europeo, de 9 de julio de 2015, sobre el uso eficiente de los recursos: avanzar hacia una economía circular (2014/2208(INI)).
COM (2015) 614. Comunicación de la Comisión de 2 de diciembre de 2015. <i>Cerrar el círculo: Un plan de acción de la UE para la economía circular.</i>
COM (2016) 739. Comunicación de la Comisión de 22 de noviembre de 2016. <i>Próximas etapas para un futuro europeo sostenible. Acción europea para la sostenibilidad.</i>
COM (2016) 773. Comunicación de la Comisión de 30 de noviembre de 2016. Plan de trabajo sobre diseño ecológico 2016-2019.
COM (2017) 33. Informe de la comisión de 26 de enero de 2017, sobre la <i>aplicación del plan de acción para la economía circular.</i>
COM (2018) 29. Comunicación de la Comisión de 16 de enero de 2018, sobre un marco de seguimiento para la economía circular.



2.6.2.Ámbito español

La normativa española ha ido resolviendo la transposición de las directrices y decisiones europeas en materia de residuos, e incluso se han promulgado regulaciones específicas, plasmadas en el desarrollo de los diferentes planes de prevención y gestión de los mismos. Actualmente, el marco regulador en materia de residuos, en general, de residuos de construcción y demolición, en particular, y de medio ambiente queda establecido a través de las disposiciones recogidas entre la Tabla 7 y la Tabla 9, respectivamente.

Tabla 7. Disposiciones relacionadas con los residuos, en general, y con los residuos de construcción y demolición, en particular, en España

Residuos
Ley 22/2011 , de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados, por la que se deroga la Ley 10/1998, de 21 de abril, de residuos y se transpone a la legislación española la Directiva 2008/98/CE, de 19 de noviembre, sobre residuos.
Orden AAA/699/2016 , de 9 de mayo, por la que se modifica la operación R1 del anexo II de la Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados, y se transpone al marco español la Directiva (UE) 2015/1127, de 10 de julio, por la que se modifica el anexo II de la Directiva 2008/98/CE que establece una lista no exhaustiva de operaciones de valorización.
Vertido de residuos
Real Decreto 1481/2001 , de 27 de diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero, resultante de la transposición de la Directiva 1999/31/CE del Consejo, del 26 de abril, relativa al vertido de residuos.
Real Decreto 1304/2009 , de 31 de julio, por el que se modifica el Real Decreto 1481/2001, de 27 de diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante el depósito en vertedero.
Lista de residuos
Orden MAM/304/2002 , de 8 de febrero, por la que se publican las operaciones de valorización y eliminación de residuos y la lista europea de residuos. Corrección de errores en BOE núm. 61, de 12 de marzo de 2002.
Prevención de residuos
Resolución de 20 de diciembre de 2013 , de la Dirección general de calidad y Evaluación Ambiental y Medio Natural, por la que se publica el Acuerdo del Consejo de Ministros de 13 de diciembre de 2013, por el que se aprueba el Programa Estatal de Prevención de Residuos 2014-2020 .
Gestión de residuos
Resolución de 16 de noviembre de 2015 , de la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental y Medio Natural, por la que se publica el Acuerdo del Consejo de Ministros de 6 de noviembre de 2015, que aprueba el Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos (PEMAR 2016-2022) .

En 2008 el ordenamiento jurídico español establece por primera vez un documento normativo referido, exclusivamente, a los residuos de construcción y demolición (Real Decreto 105/2008) y lo hace desde el punto de vista del principio de prevención,

dentro de la jerarquía de gestión de residuos derivada de las directrices europeas. Este real decreto tiene por objeto establecer el régimen jurídico de la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición, con el fin de fomentar, por este orden, su prevención, reutilización, reciclado y otras formas de valorización, asegurando que los destinados a operaciones de eliminación reciban un tratamiento adecuado, y contribuir a un desarrollo sostenible de la actividad de construcción. Establece los criterios mínimos para distinguir cuándo la utilización de residuos inertes en obras de restauración, acondicionamiento o relleno, puede considerarse una operación de valorización y no de eliminación en vertedero; además de las obligaciones del poseedor, productor y gestor de los residuos de construcción y demolición.

Tabla 8. Regulaciones españolas específicas de los RCD

Residuos de construcción y demolición
Real Decreto 105/2008 , de 1 de febrero, por el que se regula la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición
Orden APM/1007/2017 , de 10 de octubre, sobre normas generales de valorización de materiales naturales excavados para su utilización en operaciones de relleno y obras distintas a aquéllas en las que se generaron.

Tabla 9. Legislación relacionada con el medio ambiente en España

Medio ambiente
Ley 34/2007 , de 15 de noviembre de 2007, de calidad del aire y protección de la atmósfera
Ley 21/2013 , de 9 de diciembre, de evaluación ambiental.
Real Decreto Legislativo 1/2016 , de 16 de diciembre, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de prevención y control integrados de la contaminación de la atmósfera, del agua y del suelo y, a su vez, se deroga la Ley 16/2002, de 1 de julio.

Por su lado, la Ley 22/2011 de residuos y suelos contaminados establece objetivos específicos para la preparación para la reutilización, reciclado y valorización de los residuos de construcción y demolición. Esta Ley orienta la política de residuos conforme al principio de jerarquía en la producción y gestión de los mismos, maximizando el aprovechamiento de los recursos y minimizando los impactos derivados. Entre los artículos a destacar en esta Ley está el correspondiente al “*fin de la condición de residuo*” y el dedicado a “*Jerarquía de residuos*”, el cual clarifica el orden de prioridad en las actuaciones en la política de residuos (prevención, preparación para la reutilización, reciclado, otros tipos de valorización y eliminación de los residuos). Entre los objetivos específicos, la Ley marca para antes de 2020 que la



cantidad de residuos no peligrosos de construcción y demolición destinados a la preparación para la reutilización, el reciclado y otra valorización de materiales, con exclusión de los materiales en estado natural definidos en la categoría 17 05 04 de la lista de residuos, deberá alcanzar como mínimo el 70% en peso de los producidos.

2.6.3.Ámbito autonómico andaluz

Las comunidades autónomas podrán asumir competencias, según establece la Constitución Española, en su artículo 148, en diferentes materias, entre las que se destaca "*la gestión en materia de protección del medio ambiente*", pero en el caso concreto de los residuos de construcción y demolición, es la Directiva Marco europea (Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea, 2008) transpuesta a la legislación española mediante la Ley de residuos (Jefatura del Estado, 2011) la que establece la elaboración de planes nacionales marco de gestión de residuos. Las comunidades autónomas elaborarán sus respectivos planes autonómicos de gestión de residuos, además de posibilitar a las entidades locales para que realicen, por separado o de forma conjunta, sus propios programas de gestión de residuos. En consecuencia, el marco legislativo en materia de residuos de la construcción dependerá del desarrollo realizado por cada comunidad autónoma, siendo muy diferente en Andalucía, Cataluña, Madrid o Valencia con respecto al resto comunidades, por su mayor implicación en esta materia (Bustillo Revuelta, 2010; GERD, 2012; Martín-Morales, 2013).

El estatuto de autonomía para Andalucía (Ley Orgánica 2/2007, de 19 de marzo), incluye en su artículo 57, de medio ambiente, espacios protegidos y sostenibilidad, que *la regulación sobre prevención y corrección de la generación de residuos con origen o destino en Andalucía* corresponde a la Junta de Andalucía. En el caso concreto de la gestión de residuos, el marco normativo queda establecido por las disposiciones recogidas en la Tabla 10.

El Plan Director territorial de residuos no peligrosos de Andalucía 2010-2019 (Consejería de Medio Ambiente, 2010) constituye el marco político en materia de residuos no peligrosos en el que se definen objetivos y propuestas de actuación, basándose en los principios rectores, para integrar el desarrollo socioeconómico con la

conservación del medio ambiente, en general, y la correcta gestión de los residuos, en particular. En lo relativo a los residuos de construcción y demolición, incluye medidas específicas, tanto para su prevención como para su gestión. Las primeras se basan en la implicación de todos los agentes sociales y económicos que pueden influir en la reducción de dicha generación, para lo cual se contemplan una serie de medidas de actuación (20 a22): (i) elaboración y publicación de guías prácticas para la prevención de residuos de construcción y demolición en obras, que servirían de manual para la elaboración de los estudios de gestión; (ii) desarrollo de programas de formación a profesionales del sector de la construcción en materia de prevención y gestión de residuos de construcción y demolición; (iii) propuesta de aplicación de un baremo de puntuación en la evaluación de las ofertas en el que se valore el empleo de material reciclado y la minimización en la generación de residuos de construcción y demolición.

Tabla 10. Regulaciones específicas en materia de los residuos en Andalucía

Residuos
Decreto 397/2010 , de 2 de noviembre, por el que se aprueba el Plan Director Territorial de Residuos No Peligrosos de Andalucía 2010-2019 (PDTGRNP) .
Decreto 73/2012 , de 22 de marzo, por el que se aprueba el Reglamento de Residuos de Andalucía .
Medio ambiente
Decreto 153/1996 , de 30 de abril, por el que se aprueba el Reglamento de Informe Ambiental, para el desarrollo y ejecución del Capítulo III del Título II de la Ley 7/1994, de 18 de mayo, de Protección Ambiental en los preceptos referentes al Informe Ambiental.
Decreto 94/2003 , de 8 de abril, por el que se modifica puntualmente el Decreto 153/1996, de 30 de abril, por el que se aprueba el Reglamento de Informe Ambiental, entre otras modificaciones.
Ley 7/2007 , de 9 julio, de Gestión Integrada de la Calidad Ambiental (Ley GICA), por la que se derogan parcial o totalmente determinados decretos y la Ley 7/1994, de 18 de mayo, de Protección Ambiental.
Decreto 356/2010 , de 3 de agosto, por el que se regula la autorización ambiental unificada, se establece el régimen de organización y funcionamiento del registro de autorizaciones de actuaciones sometidas a los instrumentos de prevención y control ambiental, de las actividades potencialmente contaminadoras de la atmósfera y de las instalaciones que emiten compuestos orgánicos volátiles, y se modifica el contenido del Anexo I de la Ley 7/2007, de 9 de julio, de Gestión Integrada de la Calidad Ambiental.

Y en cuanto al programa de gestión, el Plan plantea los siguientes objetivos (2.18 a 2.22): (i) separación en origen y correcta gestión ambiental de las distintas fracciones de residuos contenidas en los residuos de construcción y demolición, eliminación del vertido incontrolado de los mismos, además de la erradicación de su vertido en vertederos de residuos inertes sin tratamiento previo; (ii) aplicación del principio de jerarquía a los residuos de construcción y demolición, maximización de la



valorización; (iii) separación y gestión de forma ambientalmente correcta del 100% de los residuos peligrosos procedentes de los residuos de construcción y demolición (Medidas 91 y 92); (iv) objetivos para el 2019, respecto del total generado, un 40% en operaciones de reciclado, un 25% en valorizado mediante otras operaciones, incluidas las de relleno y un máximo del 40% en eliminación en vertedero con tratamiento previo.

A su vez, el Reglamento de residuos de Andalucía (Consejería de Medio Ambiente, 2012) desarrolla la Ley GICA y da respaldo normativo a los dos planes que actualmente desarrolla la Junta para los residuos peligrosos (Plan de Prevención y Gestión de Residuos Peligrosos 2012–2020) y para los no peligrosos (Plan Director Territorial de Gestión de Residuos no Peligrosos de Andalucía 2010-2019). De acuerdo con esta planificación, fomenta e incluye la obligatoriedad de cumplir con las metas definidas en minimización de la producción, prevención, reciclado, reutilización y valorización. En lo referente a la gestión de los residuos de construcción y demolición, especifica que necesitarán de una fianza con carácter previo a la licencia municipal o, para aquellas obras exentas de la misma, la constitución de la fianza estará integrada en los instrumentos de prevención ambiental. Igualmente, establece como objetivo de gestión de residuos que antes de 2020 se prepare para la reutilización, el reciclado y otra valorización de materiales un 70% de los residuos no peligrosos procedentes de la construcción y de las demoliciones.

2.6.4.Ámbito provincial

A la estructura de competencias comentada hasta ahora se le añade el de las entidades locales las cuales, según lo establecido por la Ley de residuos (Jefatura del Estado, 2011), elaborarán, por separado o de forma conjunta, programas de gestión de residuos. En base a ello, las entidades locales cuentan con normativa específica aplicable a los residuos de construcción y demolición.

En el caso de la provincia de Granada, en mayo de 2001 se aprobó el Plan Director de Gestión de Residuos de Escombros y Restos de Obra (PDGERO). Dicho Plan tiene como objetivos principales la eliminación de los vertederos y vertidos ilegales, establecer instalaciones técnicamente preparadas para tratar este tipo de residuos y

fomentar la recuperación de subproductos, principalmente áridos para la construcción, además de otras fracciones valorizables como plásticos, maderas, férrico, etc. Todo ello se realizará bajo el principio de solidaridad entre municipios, conformando una tasa de pago global y única, establecida en función de la producción total de la provincia, e independiente del municipio que genere el residuo y del punto que lo valore. Además, establece en 25 km la premisa de cercanía entre el centro de tratamiento y el lugar de generación del residuo, con una red de 40 actuaciones sectorial.

Finalmente según establece el artículo 89 del Reglamento de residuos de Andalucía (Consejería de Medio Ambiente, 2012) "*los entes locales aprobarán una ordenanza que regule la prevención, producción, posesión, transporte, gestión y destino de los residuos de construcción y demolición en su ámbito territorial de actuación así como los mecanismos para el cálculo, la prestación y el retorno de la fianza*". En consecuencia, los municipios, en el ámbito de sus competencias aprueban Ordenanzas municipales que regulan licencias, obras y actividad en el ámbito de la construcción.

2.7. Los áridos reciclados

2.7.1. Definición y tipología

De acuerdo con la definición dada por el Comité Técnico nacional de normalización AEN/CTN 146 de "Áridos" (o CEN/TC 154, comité europeo de normalización), el árido reciclado es el *material granular resultante del procesamiento de material inorgánico utilizado previamente en la construcción*. Dicho material inorgánico hace referencia a la parte pétreo de los residuos generados en obras de demolición, construcción o rehabilitación.

Teniendo en cuenta la gran heterogeneidad de este material granular, existen diversos criterios de clasificación de los áridos reciclados: composición, granulometría, grado de limpieza del material, calidad (en función de sus propiedades técnicas) y, finalmente, atendiendo a su uso. La "*Guía española de áridos reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición*" (GERD, 2012) establece una clasificación de dichos



áridos con relación a la composición del material (AEN/CTN 146, 2009b), para la cual propone las siguientes categorías:

- **Áridos reciclados de hormigón**, aquellos que se obtienen a partir de residuos de hormigón tras un proceso de machaqueo, cribado y procesado. El contenido de hormigón y piedra natural (sin mortero adherido) es del 90% o más en peso.
- **Áridos reciclados cerámicos**, los que provienen del procesamiento de residuos mayoritariamente cerámicos (ladrillos, tejas o baldosas cerámicas). El contenido de material cerámico supera el 70%.
- **Áridos reciclados mixtos**, son áridos obtenidos a partir del tratamiento de residuos de construcción y demolición con mezcla de diferentes materiales cerámicos, de hormigón, áridos no ligados, etc. Esta categoría incluye, a su vez, dos subcategorías:
 - mixtos de hormigón, si el contenido de hormigón y piedra es menor al 90% y el de material cerámico no alcanza el 30%;
 - mixtos cerámicos, cuando el contenido de este material supera el 30%.
- **Áridos reciclados con asfalto**, aquellos que proceden de residuos de demolición con composición mayoritariamente asfáltica o que provienen del fresado de capas de firmes. El contenido de materiales bituminosos oscila entre un 5% y un 30%; más del 30% se considera como mezcla bituminosa.

El objeto de esta clasificación (GERD, 2012) ha sido conseguir un sistema general adecuado al mercado español, que pueda servir de referencia y proporcionar seguridad al mismo. Cuando un determinado material se ajuste a una de las categorías anteriores podrá indicar los niveles de calidad y el potencial de uso más adecuado para el mismo. Sin embargo, la composición es un criterio insuficiente para determinar por sí misma la calidad del árido reciclado, será el cumplimiento de los requisitos técnicos exigidos para un uso determinado el que establecerá finalmente la viabilidad del material a ese uso.

2.7.2. Producción del árido reciclado

Las plantas o instalaciones de reciclaje presentan diferencias en cuanto a los procesos utilizados, equipos y características técnicas, pudiendo distinguir desde una simple

unidad móvil de machaqueo, hasta instalaciones con varias líneas de producción y múltiples sistemas de limpieza capaces de producir una amplia gama de productos de diferentes calidades. Así, de acuerdo con el informe Symonds (Symonds et al., 1999), las plantas de gestión de residuos de construcción y demolición se clasifican en tres niveles de acuerdo con la tecnología empleada y las actividades de procesamiento que llevan a cabo:

- Plantas de nivel 1. Proporcionan operaciones de trituración y cribado en una unidad móvil; procesan áridos de demolición para ser reutilizados en la misma obra, generalmente en un uso de menor nivel cualitativo que el original.
- Plantas de nivel 2. Son fijas e incluyen separación de metales, además de las operaciones de trituración y cribado, pero con una única línea de producción.
- Plantas de nivel 3. Disponen de múltiples líneas de procesamiento, que incorporan operaciones de trituración y cribado, así como técnicas de separación más exhaustivas para diferentes impurezas (como metal, papel, plástico o yeso).

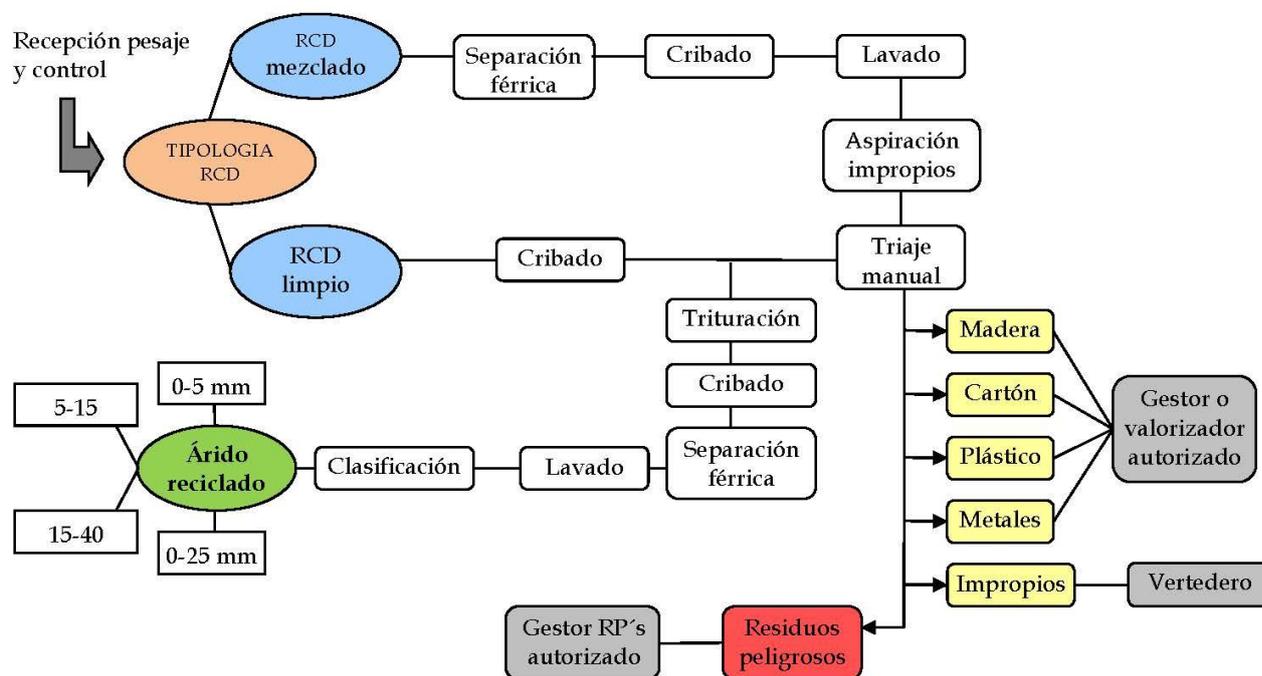


Figura 12. Esquema de funcionamiento de una planta fija de tratamiento de RCD. Fuente: Elaboración propia

Con el fin de conseguir un proceso productivo adecuado y garantizar productos de calidad durante el control de admisión de los residuos de construcción y demolición



se debe realizar una clasificación exhaustiva de los mismos que dependerá principalmente de su naturaleza, así como de su grado de contaminación o impurezas. Además el grado de procesamiento va a depender tanto del nivel inicial de contaminación de los residuos, limpio o mezclado, como del uso previsto (Hansen, 1992), para finalmente obtener áridos reciclados de una determinada calidad y composición que puedan ser utilizados nuevamente como materias primas secundarias. Así el proceso de producción de estos áridos a partir de residuos limpios es muy similar al de una cantera, aunque el reciclaje requiere de intensas técnicas de clasificación para optimizar la homogeneización del material procesado, además de la introducción de sistemas de limpieza para reducir el contenido de impropios (materiales no pétreos) y de contaminantes. En cambio, cuando el residuo de partida es de naturaleza mixta (sin demolición selectiva previa), se procesa en plantas de clasificación, donde prima la limpieza del material, frente a la trituración.

Atendiendo al sistema de procesamiento llevado a cabo para la obtención de los áridos reciclados utilizados en este trabajo de investigación, se ha considerado especialmente relevante analizar con más detenimiento el proceso de producción de una planta de reciclaje de nivel 3 que, en general, puede esquematizarse de acuerdo con las etapas presentadas en la Figura 12, muchas de las cuales se muestran en la Figura 13. Se trata de un procedimiento muy automatizado, que requiere de los siguientes procesos básicos (GERD, 2012):

- Control de admisión: conjunto de procedimientos de control de documentación, registro e identificación/evaluación que permiten realizar una clasificación inicial de la materia prima y garantizar la trazabilidad del material aceptado en planta.
- Clasificación: proceso de separación manual o mecánica de los elementos considerados contaminantes de los residuos de construcción y demolición, que puedan contaminar al resto de materiales, inutilizándolos para su reciclado. El triaje manual (Figura 13a) está destinado a separar los materiales pétreos (hormigón, ladrillo, albañilería y cerámica) de los no pétreos (metales, madera, plásticos, yeso, etc.). El precibado elimina de forma mecánica (tromel) las tierras que habitualmente acompañan al residuo de los materiales más gruesos (Figura 13b). Con el precibado de finos se separan aquellos que son considerados sucios y/o de calidad inferior a la de los finos generados por el proceso de machaqueo

del residuo clasificado y limpio; este proceso contribuye directamente a la calidad de los productos generados.

- Reducción de tamaño, trituración primaria o secundaria: proceso mecánico de reducción del tamaño de las partículas y de separación de componentes en las diferentes fracciones del material procesado. Los equipos utilizados suelen ser molinos de impactos (Figura 13d), machacadoras de mandíbula, trituradores de cono o molinos de eje horizontal. La elección y combinación del sistema de trituración contribuirá a obtener un árido de mejor calidad, siendo los molinos de impacto los más adecuados, en lo que se refiere a calidad y forma del material granular.
- Limpieza: proceso de separación más refinado de las partículas producidas, que utiliza métodos de separación por gravedad, a través del uso de equipos de limpieza por flotación en agua o soplantes de aire, permitiendo también la eliminación de elementos más ligeros, como plásticos, papeles o maderas de pequeño tamaño (Figura 13c).
- Cribado: proceso de separación de las partículas por usos granulométricos específicos, que otorgan las características finales al producto en función del uso (Figura 13e,f).

Generalmente, los productos finales obtenidos en las plantas de tratamiento se adaptan a los materiales demandados en su entorno, aunque éstos son áridos de diferentes granulometrías y otros subproductos. Estos últimos son impurezas que acompañan a la fracción pétreo del residuo pero que a su vez son valorizables en otros centros de tratamiento, como metales (férricos y no férricos), plásticos, maderas, papel-cartón. El resto de impropios se suele acopiar por separado para llevarlos a vertedero, mientras que los residuos peligrosos son enviados a un gestor autorizado.

De forma habitual, el tamaño del árido producido en la mayoría de las plantas depende de su aplicación final (Junta de Andalucía et al., 2015), como puede ser:

- Suelo. Material de granulometría continua obtenido en el tratamiento primario utilizado para suelo reciclado seleccionado o tolerable.
- Zahorra o todo-uno de 0/25 mm. Es el material que actualmente tiene mejor salida

comercial, destinado a reparación de caminos, pistas forestales, mejora de terrenos, parkings, rellenos, etc.

- Arena (0/5 mm). Se trata de material adecuado para canalizaciones, saneamiento, rellenos y jardinería.
- Gravilla (5/15 mm). Se emplea para aplicación en prefabricados, jardinería, estabilización de terrenos, rellenos y bases.
- Grava (15/40 mm). Utilizada como material de filtro en zanjas de drenaje, cubiertas invertidas, aislante, relleno y drenaje de muros, nivelación y relleno de terrenos.



Figura 13. Secuencia de imágenes del proceso de triaje y clasificación secundaria

Los áridos reciclados obtenidos serán analizados conforme a la evaluación técnica europea (norma armonizada) adecuada al uso previsto y, posteriormente, el fabricante (en este caso, el gestor autorizado) emitirá una declaración de prestaciones cuando dicho producto se introduzca en el mercado. La calidad de los materiales reciclados puede validarse de diferentes maneras, entre ellas la certificación, la acreditación y el etiquetado, además del marcado (Comisión Europea, 2016c). Además, estos materiales

deben evaluarse acorde con los requisitos del Reglamento europeo de productos de Construcción, el cual incluye las normas y directrices aplicables a la introducción de los materiales reciclados en el mercado europeo y a los instrumentos de garantía de calidad relacionados con éstos (Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea, 2011).

2.7.3. Marco técnico aplicable a los áridos reciclados

De acuerdo a lo recogido en el Real Decreto regulador de la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición (Ministerio de la Presidencia, 2008) *los áridos reciclados obtenidos como producto de una operación de valorización de residuos de construcción y demolición deberán cumplir los requisitos técnicos y legales para el uso a que se destinen*. En este sentido, los miembros de la asociación europea de áridos y el comité europeo de normalización de áridos se encuentran en un proceso de revisión de las normas, para abordar todos los aspectos técnicos de los áridos reciclados, con el objetivo global de establecer un mercado realmente abierto y competitivo para éstos.

Las normas europeas relativas a las propiedades de los áridos, igualmente, se encuentran en estado de revisión para adaptarlas a las particularidades de los áridos reciclados, hasta el momento se han actualizado las siguientes: determinación del contenido de cloruro soluble en ácido (AEN/CTN 146, 2007a); influencia del extracto de áridos reciclados en el tiempo de principio de fraguado del cemento (AEN/CTN 146, 2007b); clasificación de los componentes de los áridos gruesos reciclados (AEN/CTN 146, 2009b); ensayo de los ángeles en áridos reciclados para fracciones granulométricas alternativas, 16/32 mm, según el anexo G informativo (AEN/CTN 146, 2010b); y determinación de los sulfatos solubles en agua en áridos reciclados, apartado 10.2 (AEN/CTN 146, 2013).

En la norma europea "*Áridos para hormigón*" (AEN/CTN 146, 2009a), así como en el proyecto de norma EN 12620 (CEN/TC 154, 2010) se especifican las propiedades que deben cumplir los áridos (incluidos los áridos reciclados) para ser utilizados en la elaboración de hormigón. La norma armonizada, UNE EN 12620, cubre a todos los materiales granulares que vayan a ser utilizados en la elaboración de hormigón estructural, además de en otras aplicaciones (carreteras, pavimentos o productos



prefabricados), de procedencia natural, reciclada o mezcla de ambos, de densidad superior a 2000 kg/m³. También ofrece la posibilidad de utilizar arenas recicladas, siempre y cuando éstas cumplan con las condiciones establecidas al árido fino natural o cuya evidencia de buen comportamiento haya sido sancionado por la práctica.

Aunque dicha norma no establece limitación alguna a los áridos, sí contempla la necesidad de determinar las propiedades geométricas, físicas, químicas y de durabilidad de los mismos, así como la obligación del fabricante de declarar la conformidad del árido, mediante el valor obtenido en cada uno de los ensayos, según el uso final y el origen del mismo, siempre que sea requerido. En el caso de que se pida el valor de una propiedad, pero no esté definido por un límite específico, dicho valor debe ser declarado mediante su categoría, $XX_{declarada}$; donde XX, son las iniciales de la propiedad requerida, y *declarada*, es el valor numérico obtenido de la realización del correspondiente ensayo. Y cuando no se exija el valor de una característica, se empleará la categoría "sin requisitos (NR)".

A nivel nacional, los áridos empleados en la elaboración de hormigón han de cumplir las prescripciones establecidas en la "*Instrucción Española de Hormigón Estructural (EHE-08)*" (Ministerio de Fomento, 2008). Esta norma, de obligado cumplimiento, establece en su artículo 28 los requisitos físicos, mecánicos y químicos de los áridos, entre los que incluye a los áridos de naturaleza reciclada. Además, recoge en tres de sus veinticuatro anejos recomendaciones específicas sobre el uso de áridos reciclados en la producción de hormigones:

- Anejo 13 "*Índice de contribución de la estructura a la sostenibilidad*", valora la contribución medioambiental asociada al empleo de áridos reciclados en hormigón.
- Anejo 15 "*Recomendaciones para la utilización de hormigones reciclados*", indica que está permitido el uso de la fracción gruesa del árido reciclado de hormigón hasta un límite máximo de 20% de sustitución del árido grueso convencional, para la producción de hormigón, tanto en masa como hormigón armado, de resistencia característica no superior a 40 N/mm², quedando excluido su empleo en hormigón pretensado. Además de quedar fuera de los objetivos de este Anejo los hormigones fabricados con árido fino reciclado, así como los confeccionados con áridos de

naturaleza distinta del hormigón (áridos mayoritariamente cerámicos, asfálticos, etc.), entre otras excepciones. La comprobación de conformidad del hormigón reciclado se realizará de acuerdo a los criterios complementarios recogidos en este Anejo.

- Anejo 18 "*Hormigones de uso no estructural*", permite el uso de la fracción gruesa del árido reciclado de hormigón hasta un 100% de sustitución del árido grueso convencional, para la producción de hormigón no estructural, siempre que éste cumpla lo establecido en el Anejo 15.

Se prevé la entrada en vigor del próximo "*Código Estructural*", que incluirá los requisitos de los áridos reciclados en el propio articulado de áridos.

Las normas referentes al ámbito de los prefabricados son muy amplias, ya que existen una gran cantidad de productos, aunque todas ellas se rigen por lo indicado en la norma de "*Reglas comunes para productos de hormigón prefabricado*" (AEN/CTN 127, 2013). Ésta incluye en su anexo informativo Q la utilización de áridos procedentes de machaqueo y gruesos reciclados en el hormigón. Además, recoge que el uso de estos áridos no debe alterar negativamente el ritmo de fabricación y endurecimiento del hormigón, ni deben perjudicar la durabilidad de los productos prefabricados de hormigón en las condiciones finales de servicio. Dicha norma no exige la verificación de las propiedades del hormigón más allá de su resistencia, cuando se utilicen dichos áridos en un porcentaje hasta el 10% en peso del contenido total de áridos en la mezcla del hormigón. En el caso de incrementarse la cantidad hasta un 20% o superior, se le exige la verificación de sus características por el fabricante; y de forma similar cuando éstos procedan de fuentes externas a una fábrica de hormigón, aunque con categoría de constituyentes Rc90 (AEN/CTN 146, 2009a).

En el caso de morteros, éstos deben producirse utilizando áridos reciclados que cumplan con todos los requisitos establecidos para los naturales según indica la norma UNE-EN 13139 "*Áridos para morteros*", además de con lo incluido en el mandato M/125 de la Comisión Europea (AEN/CTN 146, 2003b, 2004).

A su vez, el uso de áridos reciclados en obras de carreteras se encuentra recogido dentro del siguiente ámbito reglamentario: (i) PG-3 "*Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para obras de carreteras y puentes*" (Ministerio de Fomento, 2004, 2015); (ii) PG-



4 "Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para obras de conservación de carreteras" (Ministerio de Fomento, 2001); y (iii) norma 6.3-IC "Rehabilitación de firmes" (Ministerio de Fomento, 2003). Los áridos utilizados para su fabricación deberán cumplir con los requisitos establecidos en las normas UNE-EN 13242 "Áridos para capas granulares y capas tratadas con conglomerados hidráulicos para uso en capas estructurales de firmes" (AEN/CTN 146, 2008a) y UNE-EN 13043 "Áridos para mezclas bituminosas y tratamientos superficiales de carreteras, aeropuertos y otras zonas pavimentadas" (AEN/CTN 146, 2003a).

Por otro lado, a pesar de no tener carácter normativo, la "*Guía española de Áridos Reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición*" (GERD, 2012) tiene por objeto caracterizar técnicamente a los áridos reciclados, procedentes de materiales inorgánicos previamente utilizados en la construcción, en la búsqueda de las mejores aplicaciones y usos en obra pública y privada. Esto garantizaría su comportamiento mecánico y medioambiental, además de ser un instrumento de comercialización y verificación de la calidad de los áridos reciclados en España. Esta guía incluye recomendaciones técnicas y fichas de uso para los áridos reciclados que vayan a ser utilizados como materiales de construcción; además en ella se contemplan seis recomendaciones en usos ligados y no ligados, entre las que cabe destacar la GEAR-RT-04 "recomendaciones técnicas para los áridos procedentes de RCD a utilizar como material tratado con ligantes hidráulicos en prefabricados".

2.7.4. Aplicaciones de los áridos reciclados

Por lo general, el destino más adecuado de los áridos reciclados depende de su naturaleza o composición mayoritaria (de hormigón, cerámicos, mixtos y con asfalto), aunque será el cumplimiento de los requisitos técnicos exigidos para cada aplicación el que determinará finalmente su adecuación a ese uso (GERD, 2012). A continuación, se hace un recorrido sobre el uso de este material granular en sus diferentes aplicaciones, según la información obtenida de las bases de datos bibliográficos de referencia internacional (Web of Science de Clarivate Analytics y Scopus de Elsevier).

Entre las posibles aplicaciones de estos áridos, se han considerado las siguientes: (i) hormigones: estructural, no estructural y hormigones especiales (de alta resistencia o autocompactante); (ii) morteros de albañilería y de revestimiento; (iii) obras de

carreteras: bases y subbases, capas de rodadura, terraplenes o rellenos; y (iv) prefabricados.

2.7.4.1. Hormigón reciclado

La industria de la construcción es el sector con mayor impacto ambiental, ya que consume una gran cantidad de recursos naturales y energía, además de generar una gran cantidad de desechos. El hormigón es el material más utilizado en el sector constructivo, debido a su versatilidad y propiedades fácilmente alterables, por lo que la sostenibilidad en el mismo se puede mejorar maximizando el uso de los recursos existentes y minimizando su impacto ambiental (Comisión Europea, 2014b, 2015). Dado que uno de los usos principales de los áridos es precisamente en su fabricación (UEPG, 2017), es lógico pensar que el aprovechamiento fundamental de los áridos reciclados vaya dirigido a la producción de este material de construcción tan específico y a la vez tan variado (Tam et al., 2018).

A los efectos del Anejo 15 de la Instrucción (Ministerio de Fomento, 2008) se define como "*hormigón reciclado*", el *hormigón fabricado con árido grueso reciclado procedente del machaqueo de residuos de hormigón*. Bajo este contexto, existe una importante actividad investigadora sobre el uso del árido reciclado en la fabricación de hormigón, cuyos resultados indicaron que su comportamiento físico-mecánico y de durabilidad está marcado por la composición del residuo usado en cada caso, así como por el diseño de mezcla utilizado.

Los áridos utilizados para la fabricación de hormigón reciclado tendrán que satisfacer un conjunto de especificaciones técnicas recogidas en la EHE-08 (Ministerio de Fomento, 2008), tanto en su artículo 28 "*Áridos*" como en su Anejo 15 "*Recomendaciones para la utilización de hormigones reciclados*" y, en particular, lo establecido en la norma europea armonizada "*Áridos para hormigón*" (AEN/CTN 146, 2009a).

El árido reciclado puede emplearse en la producción de hormigón, tal y como se recoge en el Anejo 15 de la Instrucción, siempre que el contenido de la fracción gruesa reciclada sea como máximo del 20% en peso sobre el total del árido grueso; para porcentajes superiores, será necesaria la realización de estudios específicos y experimentación complementaria en cada aplicación. En cambio, para aplicaciones de



uso no estructural (Anexo 18) podrá emplearse hasta un 100% del árido grueso reciclado, siempre que éste cumpla las especificaciones definidas para el mismo en el Anejo 15. Con relación a la utilización de la arena reciclada, aunque ésta queda fuera del ámbito de aplicación de la Instrucción, en la norma de áridos para hormigón (AEN/CTN 146, 2009a) se contempla que esta fracción del árido reciclado podría utilizarse para elaborar hormigón, siempre y cuando cumpla con las condiciones establecidas al árido fino natural o cuya evidencia de buen comportamiento haya sido sancionado por la práctica.

Los trabajos de investigación dedicados a evaluar las propiedades de los áridos reciclados y su incorporación en un nuevo hormigón comenzaron hace más de 50 años (Buck, 1973; Frondistou-Yannas, 1977). En la mayoría de estos estudios se limitaron a fabricar hormigón reciclado para uso no estructural o como material de aportación en carreteras (Anon, 1975; Buck, 1977; Mulheron y O'Mahony, 1990; Richardson y Jordan, 1994), debido a las propiedades físicas indeseables de estos áridos, como su alta absorción de agua, entre otras. Sin embargo, estudios como el de Hendriks y Pietersen (Hendriks y Pietersen, 1998) informaron que los áridos reciclados podían utilizarse para producir hormigones duraderos y sostenibles, aportando considerables beneficios medioambientales, mediante la reducción de residuos enviados a vertedero, la conservación de los recursos no renovables y la disminución de emisiones de gases de efecto invernadero, entre otros (Tam et al., 2018; Akhtar y Sarmah, 2018).

2.7.4.1.1. Microestructura del hormigón reciclado

El hormigón reciclado presenta una microestructura mucho más complicada que la del convencional, ya que el fabricado con material reciclado incluye varias zonas de transición interfacial, una nueva entre este árido y la pasta de cemento y otra vieja entre el árido reciclado y el mortero adherido, además de la que une a las partículas del árido natural con la pasta de cemento. Según se muestra en la Figura 14 el árido reciclado está formado por una presencia significativa de mortero adherido, que en el caso de la fracción gruesa ésta corresponde con un 30-35% en volumen (que aumenta a medida que disminuye el tamaño del árido), mientras que el resto está constituido por un 65-70% en volumen de árido natural (Hansen y Narud, 1983; Behera et al., 2014; Kisku et al., 2017). El mortero de cemento incluye muchas microgrietas, formadas

durante la producción del árido reciclado (durante la vida útil del hormigón original), y una alta porosidad (Etxeberria, 2004; Li et al., 2012), convirtiéndose en un punto débil; este hecho dará lugar a que sus propiedades (físicas y, en mayor medida, mecánicas) condicionen a las del hormigón fabricado con estos áridos. Es por ello, que se considera fundamental la mejora de las propiedades del árido reciclado, mediante un método de tratamiento que sea capaz de disminuir los efectos negativos que éste pueda producir en el nuevo hormigón (Verian et al., 2018).

Teniendo en cuenta la complejidad y heterogeneidad de la estructura interna del hormigón, su caracterización completa lleva consigo la determinación de los tipos, cantidades y distribución de todos sus constituyentes (Zhang, 1998; Li et al., 2012; Xiao, Li, et al., 2012), tanto desde un punto de vista macroscópico (compuesto de partículas de árido, grueso y fino, dispersas en una matriz de pasta de cemento) como a nivel microscópico (formado por varias zonas de transición que unen a las partículas del árido con la pasta o el mortero, además de estructuras moleculares y cristalinas, poros capilares y de gel).

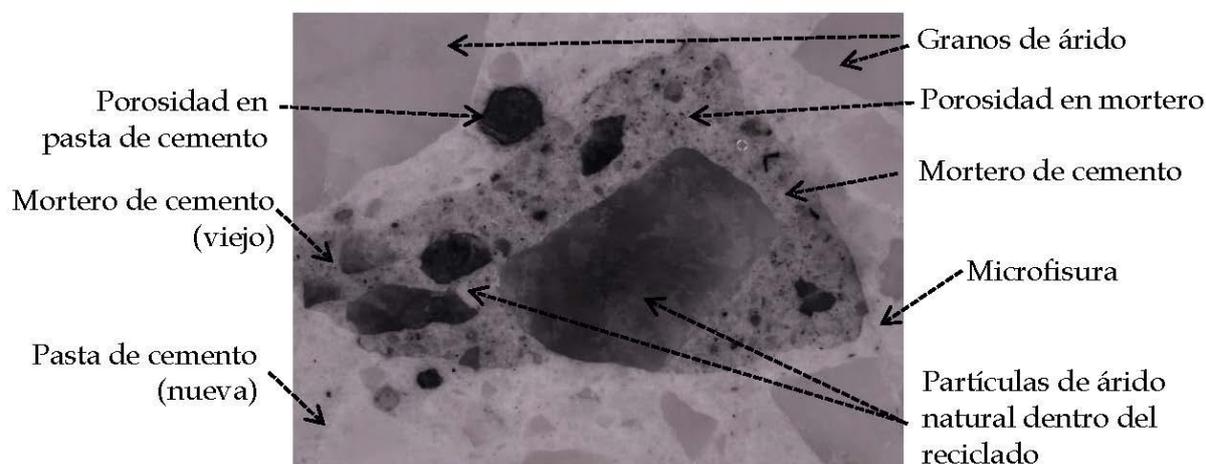


Figura 14. Estructura interna de un árido reciclado que forma parte de un nuevo hormigón (5x)

Las características de cada fase o componentes del hormigón de forma independiente y la interacción entre ellos ayudan a comprender las propiedades mecánicas y de durabilidad del material, ya que la calidad de la zona de transición entre las fases influye considerablemente en el comportamiento del hormigón (Otsuki et al., 2003); y a su vez, las propiedades mecánicas son un indicativo de la coherencia interna de los



materiales. Los elementos microestructurales de cada una estas fases se mencionan a continuación:

- Pasta de cemento: se forma como resultado directo de la reacción química entre los minerales del cemento portland y una cantidad de agua determinada (20-35% del peso del cemento). Desde el contacto del cemento con el agua se desarrollan, en cuestión de minutos, unas microestructuras que experimentan cambios con el tiempo; proceso que se va haciendo más lento a medida que avanza el curado del hormigón. La microestructura de la pasta de cemento hidratada está compuesta básicamente por tres fases esenciales: sólida; poros, vacíos y/o fisuras; y agua (Puertas Maroto et al., 1989; Mehta y Monteiro, 2014; Aligizaki, 2006).

Los productos de hidratación de la fase sólida son: granos del clíncker no hidratado, silicatos cálcicos hidratados (gel C-S-H), hidróxido cálcico o portlandita (CH o $\text{Ca}(\text{OH})_2$), ettringita (fase AFf) y monosulfoaluminato hidratado (fase AFm).

La pasta de cemento contiene varios tipos de poros, que juegan un papel importante en las propiedades del hormigón, los cuales se clasifican en: poros interlaminares en el C-S-H (0,01-0,03 μm); poros capilares (0,01-0,05 μm para una baja relación a/c y 3-5 μm para una alta relación a/c); granos de Hadley (1-20 μm); y poros de aire atrapado (50 μm a 1 mm).

Y por último la fase acuosa, la cual se puede encontrar en la pasta de cemento en varias formas: agua capilar (agua presente en poros $> 0,05 \mu\text{m}$); agua absorbida; agua interlaminar (asociado al gel C-H-S); y agua combinada químicamente.

- Mortero de cemento viejo (o mortero adherido): se refiere a la pasta de cemento del hormigón original, que queda adherido a la superficie del árido reciclado.
- Áridos naturales o reciclados: éstos ocupan entre el 60 y 80 % del volumen del hormigón, los cuales le confieren en gran medida el peso, el módulo de elasticidad y la estabilidad dimensional al material; además de ejercer una influencia muy positiva en las resistencias mecánicas y en la durabilidad del hormigón (Fernández Cánovas, 2013). En el caso de los reciclados, éstos están compuestos de árido natural más mortero de la antigua matriz de cemento.
- Zona de transición interfacial: es la zona próxima a la superficie de contacto entre los áridos y la pasta de cemento hidratado o entre el mortero de cemento y el árido

original. Su espesor varía a lo largo de la superficie del árido (50 y 100 μm), a la vez que decrece a medida que incrementa el tiempo de hidratación, convirtiéndose en una zona más densa y fuerte (Xiao, Li, Sun, et al., 2013). El origen de la misma se encuentra dentro del denominado "efecto pared" (Scrivener et al., 2004; Albayati et al., 2016; Mehdipour y Khayat, 2018), ya que en el proceso de mezcla la colocación aleatoria de los áridos interrumpe el empaquetamiento o acoplamiento normal de los granos de cemento, creando una región estrecha alrededor de la superficie de los áridos (los de mayor tamaño, con formas alargadas y textura plana y lisa). Esta zona se caracteriza por tener una concentración relativamente baja de partículas de cemento sin hidratar, a medida que se aproxima a la interfase, y un alto contenido de agua, debido a los efectos de exudación alrededor del árido (Puertas Maroto et al., 1989; Maso, 1996), dando lugar a una alta porosidad y a una microfisuración más notable y, consecuentemente, a una menor resistencia y mayor deformación.

La zona de transición se considera la zona más débil del hormigón convencional, debido al mayor volumen y tamaño de poros, al contenido y orientación de los cristales CH, además de a la presencia de microfisuras. El hormigón reciclado cuenta con tres interfases distintas y claramente diferenciadas: mortero adherido-pasta, árido reciclado-pasta y mortero-árido original (Ulloa Mayorga, 2012). Estas uniones se consideran los puntos de mayor fragilidad dentro de la macroestructura de este material, ya que puede afectar a la calidad de la interfase y, consecuentemente, a las propiedades y características del hormigón (Tam et al., 2005; Sidorova, 2013; Sahu et al., 2016).

- **Poros:** El sistema poroso del hormigón está formado por espacios vacíos que se caracterizan por una serie de parámetros que pueden ser cuantificados, tales como: (i) dimensiones geométricas: poros esféricos, cilíndricos, planares, etc; (ii) dimensiones características: macroporos, mesoporos o microporos; (iii) grado de conexión entre ellos: porosidad total, cerrada, accesible o intercomunicada; y (iv) comunicación que puede realizarse por medio de poros de distinto tamaño y/o morfología, como las fisuras, conductos, capilares, etc.

La clasificación del tamaño de los poros depende generalmente del tipo de técnica o campo de estudio utilizado, por ejemplo, la IUPAC (International Union of Pure



and Applied Chemistry (Everett, 1972)) establece una clasificación generalizada según los siguientes límites con relación al radio de poro (r): macroporos ($r > 50\text{nm}$), mesoporos ($2\text{nm} > r < 50\text{nm}$) o microporos ($r < 2\text{nm}$) (Aligizaki, 2006; Bermejo Nuñez et al., 2010). Conforme a los límites establecidos por la observación del sistema poroso por microscopía óptica, los poros se clasifican en macroporos ($r > 2,5 \mu\text{m}$) y microporos ($r < 2,5 \mu\text{m}$) (Russell, 1927). Para la técnica de porosimetría por intrusión de mercurio se establece el límite entre macroporos y microporos en $7,5 \mu\text{m}$ de radio (Ordaz y Esbert, 1985). Y atendiendo a la movilidad del agua a través del sistema poroso se pueden clasificar en (Fort, 1996): megaporos ($r > 50 \mu\text{m}$), macroporos ($0,5 \mu\text{m} < r < 50 \mu\text{m}$), microporos ($0,005 \mu\text{m} < r < 0,5 \mu\text{m}$), y ultraporos ($r < 0,005 \mu\text{m}$).

Cada hormigón presenta un volumen de poros o de espacios vacíos respecto al volumen total de la muestra (porosidad), los cuales pueden comunicarse entre sí y con el exterior (porosidad comunicada), reflejando de forma inmediata la capacidad de retener o almacenar un fluido (líquido o gas) en su interior, con lo cual se vería afectada la durabilidad del hormigón. Por el contrario, en el caso de que existan poros pero sin conductos que los comuniquen entre sí y a su vez con el exterior (porosidad cerrada o no comunicada), éstos sólo tendrán incidencia en el comportamiento elástico o mecánico del material (Aligizaki, 2006).

Bajo este contexto, es posible encontrar en la bibliografía un variado número de opiniones al respecto, unos autores han considerado que la interfase del mortero es una zona de mayor debilidad, debido a la presencia de poros y grietas que pueden disminuir las propiedades del hormigón reciclado (Kou et al., 2004; Duan et al., 2012; Bonifazi et al., 2015). Otros, incluso han indicado que cuando los áridos reciclados proceden de hormigones de alta calidad, se verá reflejado en la calidad del mortero adherido y posteriormente en la del material endurecido, por lo que éste no siempre tiene un efecto negativo en la zona de transición (Corinaldesi y Moriconi, 2009; Xiao, Li, Corr, et al., 2013).

Las condiciones de humedad de los áridos reciclados también se han considerado como un punto de gran importancia, ya que según el diseño de mezcla utilizado (principalmente, la relación a/c) la interfase puede presentar diferentes características, que a su vez repercutirán en la propiedades finales del hormigón (Etxeberria et al.,

2006; Pelufo et al., 2009; Sidorova et al., 2014; Leite y Monteiro, 2016). En el caso de utilizar estos áridos en estado seco (sin premojar), en los estudios consultados se han obtenido hormigones con una microestructura mejorada y unos excelentes valores de resistencia a compresión, en comparación a cuando los áridos se utilizaron en estado saturado con superficie seca (Poon, Shui y Lam, 2004; Sidorova, 2013). Este hecho se ha justificado por la presencia de materiales cementosos residuales, procedentes del mortero adherido, que puedan aún reaccionar, lo que permitió una mayor adherencia en la interfase mortero-pasta de cemento; además de que la baja relación a/c alrededor del árido reciclado (al ser utilizado en estado seco) dio lugar a la formación de nuevos hidratos que rellenaron rápidamente esta zona de transición. Por contra, cuando los áridos reciclados se usaron saturados, se forma una película de agua alrededor de éstos, haciendo que la interfase pueda tener una relación a/c casi dos veces mayor que la de la pasta y, por consiguiente, ésta sea más ancha, porosa y débil (Barra de Oliveira y Vázquez-Ramonich, 1996; Mefteh et al., 2013), empeorando las propiedades mecánicas del hormigón reciclado (Shi, Collins, et al., 2012). Y en el caso de tratamientos de premojado o mezclado en dos etapas, en los trabajos publicados se ha indicado que algunos poros y grietas se pueden rellenar de una cierta cantidad de cemento, dando lugar a un hormigón con una zona interfacial relativamente densa y compacta alrededor de los áridos reciclados. A pesar de ello, el premojado de los áridos reciclados dio lugar a una disminución en la resistencia del hormigón fabricado con ellos (Poon, Shui y Lam, 2004; Tam et al., 2005; Ferreira et al., 2011; Mefteh et al., 2013; González et al., 2013; Juan-Valdés et al., 2018).

2.7.4.1.2. El premojado de los áridos como técnica para mejorar las propiedades del hormigón

Los estudios llevados a cabo muestran como la principal diferencia entre el árido natural y el reciclado procedente de hormigón radica en el mortero de cemento adherido a la superficie de este último, que le proporciona una mayor capacidad de absorción de agua, lo que implica una disminución en la calidad de este tipo de material granular (Ferreira et al., 2011; Yang et al., 2011; Mas, Cladera, Olmo, et al., 2012; McNeil y Kang, 2013; Behera et al., 2014; Seara-Paz, 2015; Shi et al., 2016; Khoury et al., 2018). Este hecho influye especialmente en la reducción de la cantidad de agua



disponible para combinarse con el cemento, con la consecuente pérdida de fluidez del hormigón, así como la pérdida de resistencia mecánica final (Seara Paz 2015; González-Taboada et al. 2016). De forma similar ocurre con los áridos reciclados de naturaleza cerámica, o incluso los mixtos, por la mayor higroscopicidad de los materiales cerámicos que retienen en su interior el agua de la mezcla (Soutsos et al., 2012; Tertre Torán y Moreno Burriel, 2013).

Tomando todo esto en consideración, la fabricación de hormigón con árido reciclado ha requerido la realización de algunas modificaciones sobre el procedimiento empleado en el hormigón convencional, principalmente, para conseguir una similar consistencia y docilidad (Sánchez de Juan, 2004; Tam et al., 2005; Padmini et al., 2009; Ait Mohamed Amer et al., 2016; Pepe et al., 2016). En este sentido, las técnicas utilizadas para mejorar el comportamiento del hormigón reciclado son las siguientes:

1. Incorporar directamente a la amasadora una cantidad de agua adicional, determinada a partir de la capacidad de absorción y del grado de humedad que tenga el árido reciclado en el momento de su utilización (Xiao et al., 2005; Ferreira et al., 2011; González-Fonteboa, 2002; Medina et al., 2015; Tahar et al., 2016).
2. Premojar el árido reciclado antes de mezclarlo con el resto de componentes (Sagoe-Crentsil et al., 2001; González-Fonteboa, 2002; Sánchez de Juan, 2004; Etxeberria, Vázquez-Ramonich, et al., 2007; Evangelista y De Brito, 2007; Zhang et al., 2007; Cachim, 2009; Cabral et al., 2010; Sánchez Rodríguez, 2011; Agrela et al., 2011; Mas, Cladera, Bestard, et al., 2012; Seara-Paz et al., 2016; González-Taboada, González-Fonteboa, Martínez-Abella y Pérez-Ordóñez, 2016; Nepomuceno et al., 2018).
3. Añadir una cantidad extra de aditivo superplastificante (Abukersh, 2009; Barbudo et al., 2013; Matías et al., 2014; Miličević et al., 2015; Santos et al., 2017).
4. Uso de aditivos minerales, como reemplazo parcial del árido fino o del cemento (Shayan y Xu, 2003; Corinaldesi y Moriconi, 2009; Kou y Poon, 2012; Faella et al., 2016; Kubissa et al., 2017; Rattanachu et al., 2018) o para el tratamiento superficial del árido reciclado, por recubrimiento (Katz, 2003; Kong et al., 2010; Kou et al., 2011).

Con el primer método se corre el riesgo de aumentar la variabilidad en las propiedades del hormigón, dado que el cemento y los áridos reciclados tienen una cinética de

absorción de agua diferente. Sin embargo, mediante el control de la cantidad de superplastificante (tercer método) es posible corregir la consistencia del hormigón sin añadir agua adicional, por lo que el aumento del coste de fabricación puede verse compensado por la baja relación a/c, con relación a los otros dos métodos, y también por el consiguiente aumento de las propiedades mecánicas y de durabilidad del hormigón. En relación a la adición de aditivos minerales, éstos se han utilizado sobradamente para solventar la posible disminución de las prestaciones del hormigón con árido reciclado, aunque el elevado coste asociado a su uso (transporte, principalmente) lo hace menos viable, desde el punto de vista económico (CEDEX et al., 2011; Dimitriou et al., 2018).

Por el contrario, con la segunda forma de proceder se consigue reducir el intercambio de agua entre el árido y la pasta de cemento tanto como sea posible, a costa de ralentizar el proceso de fabricación, lo cual desde el punto de vista industrial, es un inconveniente (López Gayarre, 2008; Mena Sebastián, 2015). No obstante, a escala de laboratorio parecer ser la más conveniente de todas, según lo publicado al respecto, y así lo aconsejan diferentes normas y recomendaciones técnicas, tanto a nivel nacional (Anejo 15 (Ministerio de Fomento, 2008) como internacional (CSIRO, 2002; WBTC, 2002; JIS, 2016a, 2016b, 2016c). Mediante este procedimiento se garantiza que el árido reciclado alcance un nivel óptimo de humedad antes de añadir el cemento, por lo que éste se adhiere a la superficie de los áridos y crea una fina capa de lechada de cemento que penetra en el mortero adherido, llenando algunos de los poros y grietas; y, a su vez, se desarrolla de una zona de unión interfacial entre los áridos y la pasta de cemento más fuerte. Consecuentemente se obtiene una mejor resistencia y durabilidad del conjunto (Tam et al., 2005; Mena Sebastián, 2015) y además, se crea una reserva de agua interna capaz de reducir la retracción por secado que experimentan los cementos durante su fraguado y endurecimiento (Domingo Cabo et al., 2009).

La técnica del premojado incluye variaciones dependiendo del estudio consultado, por un lado, en lo relativo al contenido de agua utilizada para premojar los áridos reciclados y por otro, cambios en cuanto al tiempo de premojado, entre otras menos significativas.

La **cantidad de agua óptima utilizada para premojar** se estima como el porcentaje de agua que necesitan los áridos reciclados para alcanzar el nivel óptimo de humedad,



sin restar agua al proceso de hidratación del cemento, dando lugar a buenos resultados, tanto de trabajabilidad como de prestaciones mecánicas. En este sentido, unos autores recomiendan establecer el nivel de humedad en el 80% de la capacidad de absorción total del árido reciclado para asegurar la presencia de agua en la superficie de los áridos. Esto garantiza la hidratación de una gran cantidad de partículas de cemento y mejora la unión entre la pasta de cemento y los áridos (Etxeberria, Vázquez-Ramonich, et al., 2007; Cabral et al., 2010; Eckert y Oliveira, 2017). Sin embargo, también se han publicado otros trabajos con diferentes porcentajes de humedad, como premojar los áridos con los 2/3 del agua de la mezcla, más el agua estimaba que absorben estos áridos, por un período de 10 minutos (Evangelista y De Brito, 2007) o con el 100% del agua total durante 5 minutos (Cachim, 2009). Otros estudios optan por saturar los áridos reciclados durante las 24 horas previas al proceso de fabricación del hormigón, obteniendo un exceso de agua libre en la mezcla que causó problemas de exudación, además de provocar la debilidad de la zona interfacial entre los áridos reciclados saturados y la nueva pasta de cemento y, consecuentemente, peores prestaciones mecánicas del hormigón endurecido (Barra de Oliveira, 1997; Poon, Shui, Lam, et al., 2004; Pelufo et al., 2009; González et al., 2013).

El **tiempo óptimo de contacto del árido reciclado con el agua** se mide como el tiempo que tarda el árido en absorber el agua necesaria para alcanzar un nivel de humedad adecuado para no restársela al cemento. La absorción de agua del árido en los primeros instantes de inmersión o de contacto con el agua es muy intensa, lo que significa que este tipo de árido alcanza rápidamente un alto nivel de humedad. Por lo tanto, el conocimiento de la absorción de agua del árido reciclado, tanto en porcentaje de agua absorbida como el tiempo que tarda en absorberla es muy importante para la aplicación precisa de cualquier método de premojado (Ferreira et al., 2011), ya que éstos dependen del tamaño de árido y de la capacidad potencial de absorción (Silva et al., 2016a). Los estudios consultados tampoco se ponen de acuerdo en cuál es el tiempo más apropiado de premojado. En algunos se sumerge el árido durante 24 horas y después se seca superficialmente para evitar que el árido reciclado absorba el agua libre necesaria para hacer la mezcla trabajable (Barra de Oliveira, 1997; Sánchez de Juan, 2004; Anderson et al., 2016); en otros trabajos se recomienda sumergir el árido durante menos tiempo y eliminar el exceso de agua superficial posteriormente (Pelufo

et al., 2009), incluso se propone premojarlos directamente en la amasadora durante 10-30 minutos antes del proceso de mezclado con el resto de componentes del hormigón (Mas, Cladera, Olmo, et al., 2012). Sin embargo, todos estos casos dieron lugar a un efecto similar al de la saturación del árido reciclado (débil unión interfacial y descenso de la resistencia). Finalmente otros autores ponen de manifiesto que puede ser suficiente con tan sólo diez minutos de premojado (directamente en la amasadora), para asegurar un porcentaje óptimo de humedad en los áridos reciclados, proporcionándole a éstos una superficie más efectiva, debido al llenado de los poros en la superficie del árido y, con ello, una mejora de las prestaciones finales del hormigón (Evangelista y De Brito, 2007; Cabral et al., 2010; Mas, Cladera, Olmo, et al., 2012; Ismail y Ramli, 2014; González-Taboada, González-Fonteboa, Martínez-Abella y Carro-López, 2016). No obstante, unos pocos estudios han premojado los áridos reciclados con tiempos más cortos, 5 minutos (Cachim, 2009) o 2 minutos (Mas, Cladera, Olmo, et al., 2012), obteniendo hormigones trabajables, aunque debido a la adición de un mayor contenido en aditivo.

2.7.4.2. Aplicaciones

A continuación, se hace un repaso de los aspectos más significativos publicados hasta el momento sobre el uso de áridos reciclados en la fabricación de hormigón.

2.7.4.2.1. Hormigón estructural

El ámbito de aplicación del hormigón estructural cubre a todos los elementos de hormigón (en masa, armado o pretensado), de edificación o de ingeniería civil, aunque con algunas excepciones, como estructuras mixtas de hormigón y acero, estructuras con hormigones especiales (pesados o refractarios), tuberías de hormigón, presas, entre otros (Ministerio de Fomento, 2008).

Nixon (Nixon, 1978) publicó la primera revisión bibliográfica sobre la viabilidad de uso del árido reciclado en hormigón estructural. A partir de entonces se han llevado a cabo numerosas investigaciones que han demostrado que el hormigón reciclado tiene propiedades mecánicas y de durabilidad algo inferiores que el convencional, cuya diferencia depende principalmente de la calidad de los áridos reciclados utilizados en su fabricación, además de por el porcentaje y de la fracción del árido sustituida (Sogo



et al., 2004; Khatib, 2005; Pedro et al., 2014b; Lotfy y Al-Fayez, 2015; Dilbas et al., 2017). A pesar de ello, a nivel práctico, la utilización de este material reciclado en hormigón estructural sigue siendo limitado debido a la falta de confianza social en la calidad del árido (González-Fonteboa et al., 2018), así como en la durabilidad del hormigón resultante a largo plazo (Guo, Hui et al., 2018).

Los rechazos de la industria del hormigón prefabricado (viguetas o paneles) tienen un gran potencial de reciclaje, por lo que su uso da lugar a hormigones reciclados con características similares a las del producto original fabricado con áridos naturales (Malešev et al., 2010; Estolano et al., 2018). Es por ello que se ha observado que la gran mayoría de los estudios relacionados con esta aplicación han utilizado áridos procedentes de este tipo de residuos, por su óptima calidad y limpieza. En dichos trabajos se ha indicado que la clase resistente del hormigón de origen influye considerablemente en los excelentes resultados obtenidos al usar la fracción gruesa de los áridos reciclados (Pepe et al., 2014; Pedro et al., 2014a; Thomas García et al., 2016; Seara-Paz et al., 2016), así como la combinación de ésta con la fina, sin que se vean afectadas las propiedades mecánicas del hormigón reciclado a corto y a largo plazo (Manzi et al., 2013; Dilbas et al., 2017), ni las de durabilidad (Lotfy y Al-Fayez, 2015).

Los residuos generados en la demolición de estructuras de hormigón (obras sin finalizar) también se han estudiado para su uso en hormigón estructural, por sus características favorables, como su mayor homogeneidad (en comparación con un residuo mezclado) y su baja presencia de impurezas (Sogo et al., 2004; Etxeberria, Marí, et al., 2007; Domingo Cabo et al., 2009, 2010 ; Choi y Yun, 2013; González-Fonteboa et al., 2018). Así mismo se ha evaluado la utilización de áridos reciclados cerámicos, procedentes de los rechazos de piezas de naturaleza arcillosa, como material granular en la fabricación de vigas prefabricadas de hormigón pretensado, los cuales pueden ser una solución alternativa al uso de árido natural, siempre que el porcentaje de reemplazo, tanto de grava como de arena, sea inferior al 30%-35% (Suárez González et al., 2017; Nepomuceno et al., 2018); además de los áridos procedentes de los residuos de la construcción, que igualmente se consideraron aptos para uso en hormigón estructural con una resistencia característica de hasta 30 MPa (Cantero et al., 2018).

De acuerdo a la bibliografía consultada, la posible disminución de las prestaciones del hormigón se solventó con la adición de cenizas volantes (Faella et al., 2016) o con humo

de sílice (Shayan y Xu, 2003), lo que dio lugar a un efecto beneficioso en las propiedades a largo plazo de los hormigones resultantes (resistencia, permeabilidad al agua, profundidades de carbonatación y penetración de iones cloruro). Incluso la incorporación de fibras, tanto orgánicas naturales y sintéticas (Ismail y Ramli, 2018; Kazmi et al., 2018) como de acero (Chaboki et al., 2018) mejoró significativamente el comportamiento a flexión del hormigón reciclado.

En base a todo lo anterior, son numerosas las investigaciones que han utilizado áridos reciclados en nuevas mezclas para hormigón estructural, pero un menor número de ellas han estudiado la posibilidad de utilizarlos tras repetidos procesos de reciclaje, incluso después de tres ciclos, para fabricar un nuevo hormigón (Huda y Alam, 2014; Zhu et al., 2016; Salesa Bordanaba, Pérez Benedicto, Colorado-Aranguren, et al., 2017; Abreu et al., 2018). Los resultados más significativos indicaron que la calidad del material procesado influye en sus propiedades, además del número de ciclos de reciclaje (Nagataki et al., 2004). Los procedentes de rechazos de hormigón presentaron buenos resultados, incluso con un ligero aumento en la resistencia a compresión del hormigón fabricado con ellos del 13,8% a los 28 días para el reciclado de tercera generación en comparación con el de referencia (55 MPa). Este aumento se atribuyó a que el contenido de mortero adherido disminuye a medida que aumentan las etapas del proceso de trituración (Salesa Bordanaba, Pérez Benedicto, Colorado-Aranguren, et al., 2017). Por el contrario, los áridos obtenidos de residuos de construcción y demolición, donde la cantidad de impurezas puede ser más problemática que el contenido de mortero adherido, mostraron una disminución de sus propiedades después de cada nuevo ciclo de reciclaje y, consecuentemente, de las del hormigón fabricado con éstos (Huda y Alam, 2014).

Con relación al porcentaje y a la fracción del árido reciclado utilizada, algunos estudios han reemplazado parcial o totalmente la fracción gruesa del árido reciclado (Malešev et al., 2010; Pepe et al., 2014; de Brito et al., 2016), obteniendo disminuciones en la resistencia a compresión que oscilaron entre el 10% y el 13%, del 7% al 10% en la de resistencia a tracción y del 11% al 17% en el módulo de elasticidad, al usar hasta el 50% del árido grueso reciclado o la totalidad del mismo, respectivamente (González-Fonteboa et al., 2018). En un número menor de trabajos de investigación se ha optado por combinar ambas fracciones del árido reciclado (Faella et al., 2016; Suárez González



et al., 2017; Dilbas et al., 2017; Pedro et al., 2017). Y tan sólo una minoría de ellos se ha centrado en el uso total o parcial de la arena reciclada para confeccionar hormigón estructural (Khatib, 2005; Evangelista y De Brito, 2007; Pereira et al., 2012b; Singh et al., 2018), debido a que esta fracción del árido reciclado suele presentar una mayor absorción de agua, entre otras deficiencias que puedan afectar significativamente a algunas de las propiedades del hormigón fabricado con ella. No obstante, si la arena reciclada es de origen conocido y de buena calidad (rechazos de prefabricados de hormigón o del triturado de probetas de laboratorio) puede dar lugar tan sólo a pequeñas reducciones en la resistencia a largo plazo del hormigón resultante incluso con altos niveles de reemplazos, del 10% para el uso del 100% de la arena reciclada (Khatib, 2005; Evangelista y de Brito, 2017). Otros autores recomendaron la utilización del 30% como máximo de esta fracción para no poner en peligro las propiedades mecánicas del nuevo material (Evangelista y De Brito, 2007).

Por último, y una vez demostrado bibliográficamente que el hormigón fabricado con áridos reciclados tiene potencial en la elaboración de elementos estructurales, algunos estudios han dado un paso más y han dirigido sus investigaciones a evaluar el comportamiento de este material en estructuras de hormigón a escala real (Soares et al., 2014b, 2014a). En general, los resultados obtenidos en los ensayos in-situ fueron similares a los de laboratorio (físicos, mecánicos y de durabilidad), mientras que las pruebas de comportamiento estructural mostraron que el acero de refuerzo atenuaba los efectos del uso del áridos gruesos reciclados (de Brito et al., 2016).

2.7.4.2.2. *Hormigón de uso no estructural*

La EHE-08 incluye en su Anejo 18 las especificaciones reglamentarias que deben tener los hormigones de uso no estructural (Ministerio de Fomento, 2008). Este tipo de material se define como aquel que "*no aporta responsabilidad estructural a la construcción pero que colabora en mejorar las condiciones durables del hormigón estructural o que aporta el volumen necesario de un material resistente para conformar la geometría requerida para un fin determinado*", como es el caso de hormigones de relleno, para aceras y para productos prefabricados.

Tal y como se ha comentado anteriormente para hormigones de uso no estructural, la Instrucción permite sustituir hasta el 100% de la fracción gruesa del árido natural por

reciclado (Ministerio de Fomento, 2008). A pesar de que no contempla el uso de la arena reciclada ni de áridos de naturaleza distinta a la de hormigón, numerosos trabajos han demostrado la posibilidad de utilizarlos para este fin, siempre y cuando se cumpla el criterio normativo de resistencia característica mínima de 15 MPa.

La fabricación de hormigón para uso no estructural con áridos reciclados ha sido objeto de estudio por diversos autores, como es el caso de los procedentes de la industria cerámica en losas de hormigón (de Brito et al., 2005). La alta absorción de agua del material cerámico se resolvió presaturando los áridos antes de su uso, obteniendo con ello resistencias aceptables (> 15 MPa) al reemplazar un 66% del árido reciclado por natural. Mas et al. (Mas, Cladera, Olmo, et al., 2012) emplearon hasta el 40% de la fracción gruesa de áridos mixtos para la producción de varios tipos de hormigones en masa (15 MPa, 25 MPa y 65 MPa). De forma similar, López-Uceda et al. (López-Uceda, Ayuso, Jiménez, et al., 2016) usaron residuos de fuentes mixtas en la fabricación de hormigones de baja resistencia (15 MPa) con reemplazo total de los áridos naturales por reciclados y un bajo contenido en cemento (200 kg/m^3), cuyos resultados confirmaron la viabilidad de uso para carriles de bicicletas, cunetas, hormigón de nivelación, entre otros.

2.7.4.2.3. Hormigón de alta resistencia / alto rendimiento

Un hormigón con resistencia característica comprendida entre 50 MPa y 100 MPa está considerado de alta resistencia (Ministerio de Fomento, 2008), siendo ésta la única propiedad indispensable para esta clase de hormigón. Además, éstos se fabrican con un alto contenido en cemento de clase resistente 42,5 o 52,5, dando lugar a una baja porosidad y mayor densidad, debido a lo cual la velocidad de transporte, tanto de agua como de sustancias agresivas, a través de sus poros, disminuye considerablemente, lo que repercute en una mayor durabilidad frente a medios químicamente agresivos. En vista de las excelentes cualidades que presenta un hormigón de alta resistencia, éste también puede considerarse de altas prestaciones, por poseer las características inherentes del primero (uso fundamental de humo de sílice), además de otras, como facilidad de compactación o mayor durabilidad (González-Isabel, 1993).

Los áridos utilizados para la fabricación de hormigones de alta resistencia deben tener



unas características y propiedades idóneas, entre ellas una densidad superior a 2600 kg/m³ y un coeficiente de desgaste inferior a 25 (Ministerio de Fomento, 2008). En base a esto, y según lo que se ha publicado en la literatura (Pacheco-Torgal et al., 2013), los áridos reciclados no suelen ser adecuados para la producción de este tipo de hormigón, debido a la existencia de mortero adherido a su superficie y a la presencia de impurezas (cerámico, yeso, vidrio, madera, entre otros) que proporcionan al árido una menor densidad y un alto coeficiente de Los Ángeles (Verian et al., 2018). A pesar de ello, tales deficiencias pueden superarse examinando cuidadosamente las características de estos áridos para que permitan alcanzar la adecuada resistencia y durabilidad del hormigón reciclado fabricados con ellos. Además, las propiedades de éste pueden mejorarse de forma significativa, al igual que en el caso del fabricado con áridos naturales (Ajdukiewicz y Kliszczewicz, 2002), con la adopción de unas proporciones adecuadas en la mezcla (Tu et al., 2006), principalmente el ajuste de la granulometría (evitar un exceso en la cantidad de arena) y de la relación a/c (compensar la mayor demanda de agua de los áridos reciclados) según la calidad y el porcentaje de áridos reemplazados; empleo de superplastificantes (reductores de agua de alta actividad); y el uso de adiciones minerales (humo de sílice, cenizas o escorias), bien como reemplazo del cemento o como material suplementario a éste (Limbachiya et al., 2000; Kubissa et al., 2017; Rattanachu et al., 2018; Pedro et al., 2018).

En este sentido, y en relación a la naturaleza del árido reciclado utilizado, una serie de estudios se han centrado en analizar el uso de aquellos procedentes de residuos de hormigón (demolición de estructuras, rechazos de prefabricados de hormigón de alta resistencia o del triturado de probetas de hormigón producidas en laboratorio) con características mecánicas a compresión adecuadas (en torno a 50 MPa o superiores) y, generalmente, libres de constituyentes dañinos (Limbachiya et al., 2000; Ajdukiewicz y Kliszczewicz, 2002; González-Corominas y Etxeberria, 2014a; Kou y Poon, 2015; Kubissa et al., 2017; Wang et al., 2017; Rattanachu et al., 2018; Pedro et al., 2018). En general se han obtenido resultados similares a los del hormigón de referencia en términos de prestaciones mecánicas (compresión, flexión, módulo de elasticidad, fluencia y retracción), así como en los ensayos de durabilidad (absorción de agua, permeabilidad al aire, difusión por cloruros, resistencia al hielo-deshielo y al desgaste por abrasión), al reemplazar el 100% del árido grueso natural por reciclado o, incluso

la fracción fina reciclada junto a la gruesa, sobre todo cuando éstos procedían de hormigones con una resistencia mínima a compresión bastante alta, de 70 MPa a 100 MPa (Pedro et al., 2018).

Además, en la bibliografía consultada se ha comprobado que se han utilizado áridos obtenidos del tratamiento de otro tipo de residuos, como los de la trituración de restos cerámicos (Suzuki et al., 2009; Vejmelková et al., 2012), de desechos de terremotos (Tu et al., 2006) o de composición mixta (González-Corominas y Etxeberria, 2014b). Estos materiales reciclados tienen menos posibilidades de uso en este campo de aplicación que los procedentes de hormigón, aun así los resultados indicaron que tras un mayor ajuste en la dosificación se consigue, para una misma trabajabilidad, una resistencia adecuada para un hormigón reciclado de alta resistencia (Tu et al., 2006). Concretamente, la alta absorción de agua de los áridos cerámicos se minimizó mediante la presaturación de la fracción gruesa (Suzuki et al., 2009) y el sobresaturado de la fina (González-Corominas et al., 2017), entre otros ajustes.

En cuanto a la fracción del árido reciclado usada, la gran mayoría de los estudios consultados han reemplazado la gruesa, mientras que la fina ha sido poco utilizada para fabricar hormigones de alta resistencia, por su alto coeficiente de absorción de agua, menor densidad, baja resistencia a la fragmentación, entre otras cualidades (Ajdukiewicz y Kliszczewicz, 2002; Tu et al., 2006; Kubissa et al., 2017; Pedro et al., 2018). No obstante, diversos autores han sugerido que la acción puzolánica de los áridos finos de naturaleza cerámica, junto a su naturaleza higroscópica, mejora el comportamiento de dichos hormigones. González-Corominas y Etxeberria utilizaron hasta un 30% de árido fino procedente de rechazos de la industria cerámica (González-Corominas y Etxeberria, 2014b), obteniendo hormigones de alto rendimiento con propiedades mecánicas similares o superiores a las del de referencia (en torno a 100 MPa en la rotura a compresión), así como de durabilidad. Incluso se ha evaluado positivamente la sustitución parcial de hasta un 60% de cemento por polvo cerámico (triturado de ladrillos de arcilla roja), ya que éste con un grado de finura adecuado representa una alternativa al material cementoso convencional (Vejmelková et al., 2012).



2.7.4.2.4. Hormigón autocompactante

A los efectos del Anejo 17 de la EHE-08 "Recomendaciones para la utilización de hormigón autocompactante" (Ministerio de Fomento, 2008), se define a este hormigón como aquel que, a consecuencia de una dosificación estudiada y del empleo de aditivos superplastificantes específicos, se compacta por la acción de su propio peso, sin necesidad de energía de vibración ni de cualquier otro método de compactación; además de no presentar segregación, bloqueo de árido grueso, sangrado, ni exudación de la lechada. Este hormigón añade a las propiedades del hormigón convencional, en cualquiera de las clases resistentes, la cualidad de autocompactabilidad. Para alcanzar esta propiedad la composición de la mezcla requiere de los siguientes ajustes: (i) aumento en la cantidad total de finos aportados por el cemento (23%, en peso, de la masa del hormigón), las adiciones (filler inerte) y los áridos, que será necesario para alcanzar la adecuada viscosidad y cohesión de la mezcla, además de para evitar la segregación de los áridos y disminuir el rozamiento entre los áridos gruesos; (ii) el empleo de aditivos superplastificantes adecuados, para compensar la mayor demanda de agua de los finos (aumento de su superficie específica); y (iii) el uso de un aditivo modulador de la viscosidad (minimiza los efectos de la variación del contenido de humedad, el contenido de finos o la distribución granulométrica).

En este sentido, la utilización de áridos reciclados exige, en mayor medida, un diseño de mezcla apropiado (Bairagi et al., 1990) para obtener las calidades deseadas y evitar un impacto negativo en las propiedades frescas del hormigón autocompactante, las cuales son fundamentales para su adecuado rendimiento en estado endurecido (Lin et al., 2004; Santos et al., 2017). Por lo general, en la bibliografía localizada los diferentes investigadores se han centrado en conseguir una optimización del hormigón autocompactante mediante el uso árido reciclado de hormigón de excelente calidad (ausencia de contaminantes), como puede ser el procedente del reciclaje de rechazos de la industria del prefabricado (Santos et al., 2017; Salesa Bordanaba, Pérez Benedicto, Esteban, et al., 2017; Manzi et al., 2017; Fiol et al., 2018) o de la trituración de hormigón fabricado previamente en laboratorio (Alam et al., 2013; Gesoğlu, Güneyisi, Öz, Taha, et al., 2015; Vinay Kumar et al., 2017; Singh, Ran Bir y Singh, 2018), con el objeto de garantizar una resistencia mínima, entre otros aspectos. Incluso se ha utilizado el árido obtenido del procesamiento de residuos de construcción y

demolición compuesto mayoritariamente de hormigón (Kou y Poon, 2009; Corinaldesi y Moriconi, 2011; Pereira-de Oliveira et al., 2014; Señas et al., 2016), ya que las características de éste también pueden dar lugar a un hormigón reciclado con un aceptable comportamiento en estado fresco, además de con una clase resistente adecuada una vez endurecido.

De acuerdo con la bibliografía consultada, una forma de lograr mejoras en las propiedades del hormigón autocompactante reciclado ha sido mediante la incorporación a la mezcla de una mayor cantidad de aditivos minerales, bien como sustitutos del cemento o como filler adicional, tales como cenizas volantes (Kou y Poon, 2009; Güneyisi, Gesoğlu, Algin, et al., 2016; Santos et al., 2017), humo de sílice (Gesoğlu, Güneyisi, Öz, Yasemin, et al., 2015; Singh, Ran Bir y Singh, 2018), metacaolín (Kapoor et al., 2016), escoria de alto horno (Alam et al., 2013; Gesoğlu, Güneyisi, Öz, Taha, et al., 2015) o polvo de arena de mezclas asfálticas (Esquinas et al., 2018). Estas adiciones desempeñan un papel de micro-relleno que a su vez aumenta la compacidad y disminuye la porosidad del material autocompactante, reduciendo a su vez el deterioro en las propiedades de durabilidad del hormigón reciclado (Kapoor et al., 2016). Además, diversos autores han optado por evaluar el uso de los áridos finos reciclados como filler (hasta un 20% de polvo de hormigón triturado) para la fabricación de este tipo de hormigón fluido, ya que los mismos aportan una gran cantidad de partículas muy finas (del mortero adherido que se desprende por fricción o rozamiento) que aumenta la cohesión en la mezcla, así como la resistencia a la segregación (Corinaldesi y Moriconi, 2011; Señas et al., 2016).

Finalmente, sobre la utilización de la fracción gruesa o fina de los áridos reciclados, indicar que para poder incorporar el máximo posible de este material reciclado a la mezcla (combinación de ambas fracciones o sólo una de ellas), y obtener el parámetro de autocompatibilidad requerido a este tipo de hormigón, se precisa de un aumento del contenido de aditivo (Singh, Navdeep y Singh, 2018) o del agua, incluso la utilización de los áridos reciclados en condición de saturación con superficie seca (Alam et al., 2013; Güneyisi, Gesoğlu, Algin, et al., 2016; Kapoor et al., 2016; Singh, Ran Bir y Singh, 2018). Además, se necesitará un mayor tiempo de amasado, para poder lograr una mezcla totalmente homogénea (Señas et al., 2016). A pesar de ello, los resultados obtenidos en cuanto a los parámetros reológicos, físicos, mecánicos y de



durabilidad del hormigón autocompactante reciclado empeoran conforme aumenta el porcentaje de uso de este material (Kou y Poon, 2009; Carro-López et al., 2017).

2.7.4.3. Morteros

Los áridos reciclados procedentes de la valorización de residuos de construcción y demolición también pueden ser una buena fuente de materias primas secundarias para la fabricación de morteros, concretamente, la fracción más fina de estos materiales. Esta fracción representa aproximadamente el 50% del peso total de los residuos triturados para producir áridos gruesos (Ulsen et al., 2013); y aunque durante mucho tiempo se descartó o se utilizó como material granular para carreteras, su uso en la producción de morteros ofrece un método alternativo para reutilizar este desecho.

Está ampliamente demostrado que la arena reciclada tiene menor densidad y mayor capacidad de absorción de agua que el árido fino natural (Verian et al., 2018), propiedades que pueden ser perjudiciales para la calidad del mortero, ya que éste necesita más agua para alcanzar el nivel de trabajabilidad de una mezcla convencional, además de afectar a su comportamiento mecánico (Cuenca-Moyano et al., 2014). En general, esto se debe a la mayor porosidad y superficie específica por unidad de volumen del material fino reciclado. Es por ello, que la mayoría de las regulaciones internacionales no consideran la sustitución de arena natural por reciclada en diferentes aplicaciones, como es en la fabricación de hormigón estructural (Ministerio de Fomento, 2008); sin embargo, no hay prohibiciones sobre su uso en morteros. En este sentido, cada vez son más los estudios que han reportado que es factible la producción de morteros con árido reciclado fino (Naganathan et al., 2014; Silva et al., 2016b; Pimentel et al., 2018; Carasek et al., 2018).

El mortero para la construcción tiene numerosas aplicaciones englobadas en dos categorías principales: morteros para revestimientos y morteros para albañilería. Los primeros se aplican normalmente en la terminación de exteriores (revocos) e interiores (enlucidos) de muros, techos, pilares y tabiques de acuerdo a la norma UNE EN 998-1 "*Especificaciones de los morteros para albañilería. Parte 1: Morteros para revoco y enlucido*" (AEN/CTN 83, 2012b). Los morteros de albañilería se utilizan para colocar y unir unidades de fábrica según la norma UNE-EN 998-2 "*Especificaciones de los morteros para*

albañilería. Parte 2: Morteros para albañilería" (AEN/CTN 83, 2012c). Así mismo, estos morteros deben producirse utilizando áridos reciclados que cumplan con todos los requisitos de la normativa técnica correspondiente (AEN/CTN 146, 2003b, 2004).

Los morteros de albañilería son los más estudiados desde el punto de la inclusión de áridos reciclados en su dosificación (Moriconi et al., 2003; Martínez et al., 2013; Fernández-Ledesma et al., 2015; Saiz-Martínez et al., 2016; de Oliveira Andrade et al., 2018), sin embargo poco se ha analizado sobre las propiedades de los morteros de revestimiento, bien para revoco o para enlucido, que incorporan arena reciclada (Miranda y Selmo, 2006; Silva et al., 2008; Corinaldesi, 2012).

Los áridos reciclados procedentes de residuos de hormigón hasta el momento han sido los más utilizados para la fabricación de morteros (Vegas et al., 2009; Dapena et al., 2011; Fernández-Ledesma et al., 2014; Cuenca-Moyano et al., 2014; Fernández-Ledesma et al., 2015; Martínez et al., 2018), aunque también se han investigado con el uso de otro tipo de residuos, como mixtos (Corinaldesi et al., 2002; Martínez et al., 2013; Saiz-Martínez et al., 2016; de Oliveira Andrade et al., 2018), cerámicos (Bektaş et al., 2009; Silva et al., 2010; Jiménez, José Ramón et al., 2013; Saiz-Martínez et al., 2015) o polvo de mármol (Corinaldesi et al., 2010).

En cuanto al nivel de sustitución de arena natural por reciclada, de acuerdo a la literatura disponible, se ha constatado que en algunos estudios se ha realizado un reemplazo parcial, para así asegurar las prestaciones del mortero de albañilería (Bektaş et al., 2009; Jiménez, José Ramón et al., 2013; Fernández-Ledesma et al., 2014; Saiz-Martínez et al., 2015; Pimentel et al., 2018). Otros autores han optado por utilizar el máximo contenido posible de arena reciclada para la producción de mortero, lo que puede reducir su comportamiento físico y mecánico en función de la dosificación utilizada, pero a la vez permite disminuir el impacto negativo provocado por el abuso en la utilización de materias primas naturales que adolece el sector de la construcción (Vegas et al., 2009; Neno et al., 2014; Saiz-Martínez et al., 2016; de Oliveira Andrade et al., 2018). Incluso se ha evaluado el reemplazo total de un tipo árido fino por otro (Mesbah y Buyle-Bodin, 1999; Corinaldesi et al., 2002; Martínez et al., 2013), cuyos resultados indicaron que los morteros reciclados presentaron peor comportamiento mecánico, además de mayor capacidad de absorción, porosidad, sorptividad y retracción que los naturales, aunque dentro de los límites requeridos para los morteros



de albañilería. No obstante, el uso de áridos de naturaleza cerámica mejoró los valores de adherencia y flexión (Martínez et al., 2013).

La mayoría de los morteros reciclados fabricados para aplicaciones de albañilería o revestimientos han demostrado unas características comparables a las de los morteros convencionales, con una ligera pérdida de propiedades a medida que se incrementa el porcentaje de sustitución de arena natural por reciclada, pero generalmente cumplen con los requisitos normativos (Silva et al., 2016b; Martínez et al., 2018). A pesar de ello, el ajuste del contenido de agua en la mezcla (Moriconi et al., 2003; Vegas et al., 2009; Fernández-Ledesma et al., 2015; Saiz-Martínez et al., 2016; de Oliveira Andrade et al., 2018), la humectación previa a los áridos reciclados (Corinaldesi, 2012; Cuenca-Moyano et al., 2014) o el uso de aditivo superplastificantes (Corinaldesi et al., 2010; Saiz-Martínez et al., 2016), para una consistencia dada, puede dar lugar a una mejora de las características de los morteros reciclados. Otros autores, sin embargo, optaron por el uso de activadores alcalinos, como es el caso del estudio realizado por Alonso et al. (Alonso et al., 2018), en el que se exploró la viabilidad tecnológica del uso árido reciclado (de residuos de la construcción) en morteros activados con álcalis. Se obtuvo que con una sustitución del 20% de un árido por otro los morteros resultantes presentaron una alta resistencia mecánica y un aceptable comportamiento frente al fuego.

2.7.4.4. Obras de carreteras

Si bien la fabricación de hormigón con áridos reciclados es la aplicación que más interés ha tenido hasta el momento, la construcción de carreteras constituye también un campo de aplicación para estos materiales dada la enorme cantidad de áridos que se consumen en la ejecución de las mismas (Bustillo Revuelta, 2010). No obstante, uno de los condicionantes principales que puede presentar el árido reciclado en su utilización como material para la construcción de carreteras es la problemática atribuida a su capacidad de lixiviación en contacto con los suelos y el agua, siendo mayor que en el natural, debido tanto a la cantidad de mortero adherido de alta alcalinidad (Limbachiya et al., 2007) como a los sulfatos asociados al yeso de los áridos procedentes de residuos de construcción y demolición (Barbudo, Galvín, et al., 2012).

El uso de los áridos reciclados para carreteras, en función de su origen y de sus características puede ir dirigido a la construcción de bases y subbases (tratadas con cemento o sin tratar); de capas de rodadura; rellenos de arcenes y zanjas, explanaciones, construcción de pistas forestales y caminos rurales, entre otros. No obstante, el uso de estos materiales reciclados va a depender de la normativa correspondiente al país considerado en los estudios que se han consultado, al igual que en el resto de aplicaciones.

En España, las especificaciones técnicas sobre la utilización de áridos reciclados en la construcción de las diferentes capas de un pavimento se encuentran recogidas en el PG-3 (Ministerio de Fomento, 2004, 2015), en el PG-4 (Ministerio de Fomento, 2001) y en la norma 6.3-IC (Ministerio de Fomento, 2003). Los áridos utilizados para su fabricación deberán cumplir con los requisitos establecidos en la normativa técnica específica, UNE-EN 13242 (AEN/CTN 146, 2008a) y UNE-EN 13043 (AEN/CTN 146, 2003a).

Dentro de los áridos reciclados incluidos en dicha normativa se encuentran los procedentes del reciclado de mezclas bituminosas (fresado de capas de aglomerado de firmes), de pavimentos de hormigón o de la demolición de hormigones. Los áridos obtenidos de la valorización de residuos de construcción y demolición deberán aportar documento acreditativo de su origen, de la idoneidad de sus características para el uso propuesto, que han sido debidamente tratados y que no se encuentran mezclados con otros contaminantes (Ministerio de Fomento, 2015).

A continuación se presenta una revisión bibliográfica sobre la utilización de áridos reciclados, procedentes del tratamiento de residuos de construcción y demolición de edificios, puentes, así como de la ejecución de carreteras (Vieira y Pereira, 2015; Cardoso et al., 2016; Tam et al., 2018).

2.7.4.4.1. Bases y subbases

En las últimas décadas, un gran número de autores han centrado sus investigaciones en el estudio de las propiedades de materiales reciclados para usarlos en capas granulares de carreteras, como los procedentes de hormigón (Nataatmadja y Tan, 2000; Park, 2003; Leite et al., 2011; Gabr y Cameron, 2012), desechos de albañilería (Molenaar y van Niekerk, 2002; Vegas et al., 2008; Arulrajah et al., 2011; Barbudo, Galvín, et al.,



2012), mixtos (O'Mahony, 1990; Vegas et al., 2011; Garach et al., 2015; Bassani y Tefa, 2018), de pavimentos con asfalto recuperado (Arulrajah et al., 2013), así como combinación de éstos con áridos naturales (Taha et al., 1999; Chini et al., 2001; Cameron et al., 2012; Haider et al., 2014) o mezcla de distintos tipos de reciclados (Poon y Chan, 2006a; Arulrajah et al., 2012; Azam y Cameron, 2013; Jia et al., 2015).

A escala de laboratorio, se ha obtenido que la gran mayoría de los áridos reciclados evaluados en la bibliografía como zahorras artificiales (artículo 510 del PG-3) cumplieron con lo establecido a sus propiedades (granulometría, equivalente de arena, forma, resistencia a la fragmentación, plasticidad, capacidad de soporte, densidad máxima y humedad óptima de compactación, compuestos totales de azufre, contenido en materia orgánica, entre otros) para ser usados en la ejecución de capas granulares de firmes de carreteras (Nataatmadja y Tan, 2000; Park, 2003; Vegas et al., 2008; Barbudo, Agrela, et al., 2012; Arulrajah et al., 2013; Bassani y Tefa, 2018). Por su parte, Leite et al. (Leite et al., 2011) demostraron que el árido grueso reciclado se puede utilizar de forma satisfactoria en la ejecución de bases y subbases de carreteras de bajo volumen de tráfico, aunque prestando especial atención a la deformación permanente que experimenta este material bajo cargas. En los estudios conducidos por Vegas (Vegas et al., 2011) y Jiménez (Jiménez et al., 2011) se concluyó que las propiedades más críticas son el contenido de azufre, porque puede generar inestabilidad dimensional de la capa, y la resistencia a la fragmentación, que está profundamente relacionada con la durabilidad.

En el caso de combinaciones de áridos reciclados con naturales para su utilización en mezclas granulares, en los trabajos publicados se ha indicado que a medida que aumenta el porcentaje de material reciclado (de hormigón o con asfalto) su uso se ve reducido a suelos de menor categoría de tráfico y en mayor medida al utilizar árido reciclado cerámico (Taha et al., 1999; Bennert et al., 2000; Haider et al., 2014). No obstante, en ellos se llegó a la conclusión de que los áridos reciclados de hormigón se comportaron de manera similar (en términos físicos y geomecánicos) que el árido natural y, por lo tanto, se recomendó su uso como material de base (Haider et al., 2014). Incluso, el uso de áridos de hormigón y mixtos con la adición de residuos de alúmina (del proceso de refinamiento del aluminio) podría mejorar sus propiedades, como la compactación y la capacidad de carga, para ser utilizados en capas sin consolidar

(López-Alonso et al., 2019). De acuerdo a lo publicado por otros autores (Poon y Chan, 2006a), por lo general, la capacidad portante de las capas compactadas utilizando incluso el 100% del árido reciclado está garantizada cuando éste procede de hormigón. En el caso de áridos cerámicos (combinados con hormigón triturado), éstos dieron lugar a un aumento considerable del contenido de humedad óptima, un descenso en la densidad máxima seca del material y un menor valor del índice CBR, aunque éste excedió el valor límite establecido para este uso (>30).

De acuerdo a lo anterior, un gran número de investigaciones incluyen pruebas de laboratorio (caracterización del material y pruebas triaxiales) que resultan esenciales para evaluar las características de los materiales reciclados, pero el diseño y la ejecución de tramos de prueba reales (ensayos de carga de placas o deflectómetro de peso descendente, entre otras) permite validar el comportamiento de dichos materiales a corto y largo plazo. En este sentido, una serie de autores han evaluado el uso de diferentes tipos de áridos reciclados como material granular en secciones experimentales de carreteras (Agrela et al., 2012; Herrador et al., 2012; Jiménez et al., 2012; Kazmee y Tutumluer, 2015).

Los resultados obtenidos en las secciones construidas indicaron que la mezcla compuesta por el 100% de áridos reciclados de hormigón presentó un adecuado comportamiento para ser utilizada en bases de pavimentos (Chini et al., 2001), al igual que la combinación de 50% - 50% de áridos de hormigón y cerámico, aunque para la construcción de capas granulares sin consolidar (Neves, José et al., 2013). Los áridos mixtos exhibieron un buen comportamiento como zahorra artificial para la formación de la capa base en caminos rurales sin pavimentar (Jiménez et al., 2012) o de subbases (Agrela et al., 2012), demostrando que las capas ensayadas poseían una capacidad mecánica apropiada y que la superficie de la carretera no presentaba deformaciones importantes tras dos años de uso. Los áridos asfálticos también resultaron satisfactorios para subbase o como material para subrasante mejorada, siempre que éstos se mezclen con áridos reciclados de hormigón (Bennert et al., 2000; Kazmee y Tutumluer, 2015; Kazmee et al., 2017).

No obstante, se ha demostrado que el control de calidad en relación a la compactación y al contenido óptimo de humedad de los áridos reciclados utilizados en tramos experimentales debe ser mayor que el de los áridos naturales, ya que los reciclados



requieren una mayor cantidad de agua para su correcta compactación, principalmente los de naturaleza cerámica (Herrador et al., 2012; Ayan et al., 2014; Tavira et al., 2018). Recientemente se ha publicado otro trabajo similar (Tavira et al., 2018) que estudió la utilización de áridos reciclados de baja calidad (residuos no seleccionados) mezclados con tierra de excavación en la formación de capas granulares sin consolidar (base de 30 cm de espesor). Para evaluar el comportamiento de los materiales a corto y largo plazo se construyó una sección experimental a escala real, cuyos resultados indicaron la viabilidad de su uso como materiales granular en la construcción de caminos de poco tránsito (menos de 50 vehículos pesados / día).

Por otro lado, en los últimos años también se han llevado a cabo estudios relacionados con la estabilización de suelos (artículo 512 del PG-3) que contienen áridos reciclados, principalmente para incrementar su resistencia a la deformación y disminuir la susceptibilidad del suelo al agua, usándose en la formación de explanadas o para la constitución de algunos tipos de capas estructurales del firme de carreteras (pavimentos flexibles o semirígidos). Dicha estabilización se ha logrado mediante la mezcla uniforme de un suelo formado por materiales granulares, tales como áridos reciclados de hormigón, cerámicos, mixtos o con asfalto con cemento (Agrela et al., 2012; Xuan et al., 2012; Disfani et al., 2014; Mohammadinia et al., 2015; Jia et al., 2015), cal hidratada (Mohammadinia, Arulrajah, Haghghi, et al., 2017) o con otro conglomerante alternativo con menor huella de carbono que el cemento (Mohammadinia, Arulrajah, Horpibulsuk, et al., 2017).

Los estudios más representativos en este sentido han indicado que, por lo general, las mezclas estabilizadas cumplían con éxito los requisitos relativos a su granulometría, densidad, composición química y plasticidad (PG-3) para aplicaciones en bases/subbases de pavimento. Los áridos reciclados de hormigón y mixtos en reemplazos del 100% utilizados para ser estabilizados con cemento mejoraron su comportamiento mecánico y de deformación, siendo adecuados para uso en capas de base de carreteras (Xuan et al., 2012). Algo similar se obtuvo en mezclas granulares recicladas estabilizadas con cal hidráulica al 3% (Mohammadinia, Arulrajah, Haghghi, et al., 2017) o con un 15% de cenizas volantes (Mohammadinia, Arulrajah, Horpibulsuk, et al., 2017).

2.7.4.4.2. Capas de rodadura

Entre las diferentes capas del firme, la superficial aglomerada con asfalto (artículo 542 y 543 del PG-3) desempeña un papel fundamental en los sistemas estructurales del conjunto, ya que debe soportar cargas de tráfico variables y condiciones ambientales en constante cambio, además de ser fundamental para una conducción segura y cómoda. Esta sería otra opción posible, dentro de las aplicaciones de los áridos reciclados, aunque la selección del tipo material reciclado también es de gran importancia, ya que sus características no debe influir negativamente en los aspectos estructurales y funcionales de los pavimentos (Mills-Beale y You, 2010; Zhu et al., 2012; Silva et al., 2012).

En este sentido, se ha ensayado el comportamiento de diferentes tipos de áridos reciclados, tanto para mezclas bituminosas en caliente como en frío (a temperatura ambiente). Los procedentes de hormigón (Aljassar et al., 2005; Mills-Beale y You, 2010; Gómez-Meijide y Pérez, 2014; Martinho et al., 2018) y del fresado de firmes antiguos (Su et al., 2009; Silva et al., 2012; Zaumanis et al., 2014; El Euch Ben Said et al., 2018) han sido los más estudiados, aunque en otros trabajos se ha optado por evaluar el comportamiento de los obtenidos de residuos de construcción y demolición sin seleccionar en origen (Zhu et al., 2012), de residuos de mármol (Akbulut y Gürer, 2007), de desechos pétreos procedentes de la fabricación de encimeras de cocina, elementos decorativos, revestimiento de suelos y paredes (Rubio et al., 2010, 2011). De acuerdo a lo publicado en la literatura todos ellos proporcionaron unas propiedades satisfactorias para ser utilizados como material granular alternativo en la construcción sostenible de pavimentos asfálticos, aunque en ciertas ocasiones éstos presentaron diversos problemas, como baja resistencia, menor peso específico o alta absorción de agua.

En el caso de áridos reciclados con composición mayoritariamente asfáltica, diversos autores han centrado sus estudios en el uso de este residuo como material granular en la capa de rodadura (Celauro et al., 2010; Silva et al., 2012; Zaumanis et al., 2014). Los beneficios relacionados con su uso están asociados con la posibilidad de sustituir los áridos naturales y el betún virgen de una mezcla de hormigón asfáltico, sin afectar negativamente a sus propiedades mecánicas (Sangiorgi et al., 2017). Sin embargo, estos



materiales reciclados incluyen elementos hidrocarbonados que pueden contener contaminantes que afecten a los lixiviados procedentes de estos materiales (FHWA, 2008).

De acuerdo a lo publicado en la bibliografía consultada, el comportamiento de las mezclas bituminosas con bajo porcentaje de árido asfáltico (10% - 30%) es muy similar al de las mezclas convencionales (Kandhal et al., 1995; Li et al., 2008; Pradyumna et al., 2013; Ossa et al., 2016). Mientras que debido a que la ingeniería de carreteras es un sector considerado como gran consumidor de recursos y que el aprovechamiento de este tipo de residuo permite disminuir el impacto causado por la actividad constructiva (Su et al., 2009; Valdés et al., 2011; Silva et al., 2012), cada vez son más los estudios en los que se tienden a utilizar un mayor contenido de este árido reciclado en mezclas bituminosas, obteniendo resultados adecuados en función del uso establecido (Silva et al., 2012; Zaumanis et al., 2014; Abreu et al., 2015; Sangiorgi et al., 2017). Estudios como el de Sangiorgi et al. (Sangiorgi et al., 2017) evaluaron la posibilidad de utilizar el 100% del árido con asfalto, tanto a nivel de laboratorio como con una prueba de campo a escala real, en mezclas bituminosas en frío para pavimentos ecológicos y duraderos, obteniendo que el desarrollo de las propiedades físicas y mecánicas de la mezcla fue aceptable. Incluso después de 365 días de pases acumulativos de vehículos no se produjo una excesiva reducción de la rigidez.

Por otro lado, y en vista de que los áridos reciclados son un material de menor calidad en términos de resistencia, densidad y absorción de agua, en el trabajo experimental de Kareem et al. (Kareem et al., 2018) se optó por fortalecer a estos áridos antes de su uso, aplicando sobre los mismos una capa de revestimiento de escoria de cemento y otra de betún acrílico para reducir la absorción de agua del material granular y mejorar la durabilidad del producto final.

2.7.4.4.3. Terraplenes, rellenos y otros usos

La posibilidad de utilizar áridos reciclados como material granular en aplicaciones no ligadas, como relleno para explanadas (artículo 330 del PG-3), rellenos localizados (zanjas) o en otros usos similares, también está asociada con el objeto de eliminar el exceso de residuos de construcción y demolición generados en el sector de la construcción, siempre de acuerdo con la normativa técnica y legal. La fracción inferior

a 50 mm resultante de la trituración de estos residuos, suele mezclarse con suelos o áridos finos para ser utilizados para relleno; mientras que la fracción superior, o incluso la no triturada, puede servir para terraplén (Bustillo Revuelta, 2010).

Los requisitos de los áridos para estas aplicaciones suelen ser más permisivos que en otras unidades constituyentes de los firmes. En el caso de su uso en terraplenes (extensión y compactación de materiales granulares por tongadas) tan sólo se necesita cumplir los relativos a la composición y granulometría (continua, con una proporción pequeña de finos poco plásticos y sin piedras de gran tamaño), los cuales satisfacen la gran mayoría de los materiales granulares procedentes de la trituración de escombros (Aqil et al., 2005; Soleimanbeigi y Edil, 2015). En cambio, las propiedades que hacen adecuada la utilización de áridos asfálticos en el relleno de terraplenes son muy variadas, como la granulometría, densidad de compactación, contenido en humedad, consolidación, permeabilidad, durabilidad, características de drenaje y resistencia portante (Soleimanbeigi y Edil, 2015).

En cuanto a los rellenos, en éstos suele ser más común utilizar áridos procedentes del procesamiento de los residuos de construcción y demolición o los excedentes de excavaciones en obra pública y civil, alcanzándose normalmente buenos resultados (Ghataora et al., 2006; Kolahdoozan et al., 2011; Al-Kindi et al., 2016). El hormigón triturado puede usarse para la mayoría de las aplicaciones, debido a que los límites de uso son poco estrictos (en términos de nivelación, plasticidad, resistencia de partículas o propiedades químicas). En los estudios relacionados se ha indicado que los áridos reciclados de hormigón y cerámico (ladrillos triturados) presentaron unas propiedades físico-geotécnicas (distribución de tamaño de partícula, peso específico, absorción de agua, abrasión, índice CBR y pruebas de compactación de Proctor modificado) y químicas (contenido en materia orgánica, pH y pruebas de lixiviados) similares a las recomendadas para un material de relleno convencional. Mientras que el árido reciclado con asfalto no cumplió con algunos de los requisitos especificados (distribución granulométrica fuera del límite inferior, alta conductividad hidráulica, alto valor de resistencia a la abrasión, baja resistencia al corte, entre otros), aunque si éste se mezcla con otros áridos podría utilizarse en aplicaciones de relleno de tuberías (Rahman et al., 2014).



2.7.4.5. Prefabricados de hormigón

2.7.4.5.1. La prefabricación

El origen de la prefabricación data de mediados del siglo XVIII, entendida como la aplicación de procesos industriales a la construcción, en decir, la producción previamente a su uso de elementos o piezas en serie organizada y cíclica, de dimensiones y tolerancias determinadas, que mediante su montaje y ensamble de forma adecuada, se obtienen unas estructuras completas o unas unidades funcionales previamente concebidas (Vaquero García et al., 1996). La construcción industrializada ha tenido un enorme desarrollo a nivel mundial, ya que presenta claras ventajas, entre las que se destacaría la rapidez en la fabricación y puesta en obra de los elementos prefabricados, la notable reducción en la producción de residuos y el ahorro de material en obra; además de que las piezas pueden ser desmontadas y reutilizadas.

La producción de elementos prefabricados es incluso anterior a la propia industrialización (consecuencia de la Primera Guerra Mundial) y tan antiguo como la civilización. El primer elemento de construcción que ha sido prefabricado, tal vez haya sido el ladrillo (desde hace unos 11000 años), aunque previamente se empezó a construir con adobe (en el Antiguo Egipto y Mesopotamia). Su fabricación fue adoptando un proceso de racionalización, en cuanto a materiales y métodos constructivos, para poder construir de manera más sólida, además de alcanzar mayor altura, de forma más fácil y rápida. Los sistemas de prefabricados, así como las técnicas empleadas han ido cambiando para adaptarse a la necesidades y exigencias de cada momento, hasta llegar a la fabricación de piezas conformadas en moldes, lo que permitió su producción en serie, en factoría fija y a un bajo coste (Aguiló Alonso y Fernández Ordoñez, 1974; Santana Rodríguez, 2006).

Bajo este contexto, un prefabricado de hormigón es el resultado de un proceso industrial realizado bajo un sistema de control de producción definido, que emplea hormigón como material fundamental. Las soluciones constructivas obtenidas con estos productos se pueden utilizar en cualquier tipo de proyecto (edificación, infraestructura, entre otros) y en un momento indeterminado del proceso de construcción. Según la Asociación Nacional de la industria del Prefabricado de Hormigón (ANDECE) caben destacar las siguientes soluciones: cerramientos,

cimentaciones, elementos lineales (vigas, columnas, pórticos), elementos para forjados (placas alveolares, viguetas y bovedillas, casetones, etc.), mobiliario urbano, elementos para obra civil (puentes, dovelas, marcos, muros de contención, traviesas etc.), tuberías y canalizaciones, pavimentación (adoquines, bordillos, baldosas, etc.), edificación modular y otras soluciones específicas (postes eléctricos, depósitos, gradas, escaleras, etc.).

Las modernas técnicas de producción, así como el uso de programas informáticos en el diseño y fabricación han permitido que se consigan unas tolerancias dimensionales muy bajas, con unas propiedades mecánicas totalmente garantizadas. Además, la fabricación con una baja relación a/c y la optimización de los métodos de compactación y curado confieren a estos elementos unas excelentes propiedades en acabado, resistencia y durabilidad, en comparación con otras formas de construcción tradicional (López Vidal y Fernández-Ordóñez, 2015).

2.7.4.5.2. Prefabricados de uso no estructural

Los prefabricados deben cumplir con el criterio normativo de resistencia característica mínima de 15 MPa indicado en el Anejo 18, además de con los requisitos específicos exigibles a los distintos tipos de productos con función no estructural. Los destinados a la construcción de pavimentos, tales como adoquines, bordillos, baldosas y terrazos para uso externo y para interiores, estando regulados por las siguientes normas: UNE-EN 1338 "Adoquines de hormigón. Especificaciones y métodos de ensayo" (AEN/CTN 127, 2004b, 2006a); UNE EN 1340 "Bordillos prefabricados de hormigón. Especificaciones y métodos de ensayo" (AEN/CTN 127, 2005a, 2007); UNE-EN 1339 "Baldosas de hormigón. Especificaciones y métodos de ensayo" (AEN/CTN 127, 2004c, 2006b); UNE-EN 13748 "Baldosas de terrazo" para uso interior y exterior (AEN/CTN 127, 2005b, 2005c). También existen otro tipo de prefabricaciones, como pueden ser las bovedillas y los bloques de hormigón, los cuales están contemplados en las normas UNE-EN 15037-2 "Productos prefabricados de hormigón Sistemas de forjado de vigueta y bovedilla Parte 2: Bovedillas de hormigón" (AEN/CTN 127, 2011) y UNE-EN 771-3 "Especificaciones de piezas para fábrica de albañilería Parte 3: Bloques de hormigón (áridos densos y ligeros)", respectivamente. Todos ellos se fabrican mediante la técnica de vibrocompactación de una masa de hormigón seco; la vibración, junto con rápidos impactos, permite que la



mezcla se compacte rellenando los huecos y facilitando que ésta se extienda en todo el molde. Los elementos destinados a la pavimentación son macizos (adoquines, bordillos y baldosas), mientras que los otros son huecos.

En cuanto al tipo de material reciclado utilizado, en los trabajos publicados se han usado áridos de composición muy variable, como cerámicos (Poon et al., 2002; Soutsos et al., 2011b; Jankovic et al., 2012; Özalp et al., 2016; Penteado et al., 2016), mixtos (Sousa et al., 2003; Poon y Chan, 2007; Rodríguez et al., 2016), de hormigón (Poon y Chan, 2006b; Tang et al., 2007; Martín-Morales et al., 2017), de rechazos de la producción de mármol (Uygunoğlu et al., 2012; Gencil et al., 2012) o la combinación de varios tipos de residuos (Tang et al., 2007; Poon y Chan, 2007; López Gayarre et al., 2017). En este último caso, daría lugar a un material granular aún más heterogéneo, además de contener una gran cantidad de impurezas y contaminantes (plásticos, yeso, madera, vidrio, entre otros), influyendo posteriormente en la pérdida de las propiedades del hormigón resultante.

La importancia del porcentaje de sustitución también ha sido un tema bastante investigado. Los estudios consultados han demostrado que es factible incorporar hasta el 100% del árido reciclado (fracción fina y gruesa) para la producción de piezas de hormigón no estructurales, aunque para ello sea necesario usar mayores cantidades de cemento a fin de mantener los requisitos mecánicos (Poon y Chan, 2007; Matar y El Dalati, 2012; López Gayarre et al., 2013) y para obtener un acabado superficial de alta calidad (Tang et al., 2007). En cambio, otros autores han optado por añadir aditivos minerales a la mezcla, bien como sustituto del material cementoso o como suplemento de éste, con el objeto de mejorar el comportamiento de los hormigones 100% reciclados. Entre las adiciones más utilizadas destacan las cenizas volantes (Poon y Chan, 2006b; Uygunoğlu et al., 2012), las escorias granuladas de alto horno (Ganjian et al., 2015) o el humo de sílice (Rodríguez et al., 2017).

La alta capacidad de absorción de los áridos reciclados, principalmente los de naturaleza cerámica, ha sido un aspecto muy estudiado en la literatura (de Brito et al., 2005; Poon y Chan, 2006b; López Gayarre et al., 2013; Nepomuceno et al., 2018). Esta propiedad fundamental del árido debe contemplarse en la dosificación o en el procedimiento de mezclado para asegurar que exista el agua libre necesaria y suficiente para las reacciones de hidratación del cemento y, consecuentemente, un

hormigón con unas adecuadas características, tanto en su estado fresco como en el endurecido. En este sentido, ciertos autores han optado por presaturar o premojar los áridos (Soutsos et al., 2012; Miličević et al., 2015; Martín-Morales et al., 2017), mientras que otros han añadido una mayor cantidad de agua de amasado directamente a la mezcla (Tang et al., 2007; Matar y El Dalati, 2012; Rodríguez et al., 2016).

Por su parte, el empleo de la fracción fina del árido reciclado, con mayor capacidad de absorción que la gruesa, está menos estudiado. Algunos trabajos han mostrado la posibilidad de incorporar un 60% de áridos finos derivados de hormigón (Tang et al., 2007) o tan sólo un 30% para obtener hormigón de resistencia climática suficiente (Soutsos et al., 2011b; Uygunoğlu et al., 2012; Gencil et al., 2012; Penteado et al., 2016). No obstante, otros autores han descartado su uso, sobre todo cuando éste procede de residuos mixtos, por el riesgo a contener impurezas (Rodríguez et al., 2016).

En base a lo anteriormente comentado se hace un repaso por la bibliografía relacionada con esta temática, en la que se han encontrado trabajos de diferente índole, aunque centrados en la investigación de diversas mezclas de hormigón con árido reciclado a escala de laboratorio para posteriormente usarlas en la producción de distintos tipos de prefabricados (Poon et al., 2002; Soutsos et al., 2008; Özalp et al., 2016; Rodríguez et al., 2016).

De la amplia variedad de prefabricados vibrocomprimidos los **adoquines** son los más estudiados en la literatura consultada. Los materiales reciclados utilizados en su producción han sido de naturaleza muy diferente, como de hormigón (Poon et al., 2002; Tang et al., 2007; Uygunoğlu et al., 2012; Ganjian et al., 2015; Özalp et al., 2016), cerámicos (Jankovic et al., 2012; Penteado et al., 2016; Rodríguez et al., 2017), mixtos (Juan-Valdés et al., 2018), mármol (Gencil et al., 2012) o combinación del residuo de hormigón con vidrio residual triturado (Poon y Chan, 2006b; Poon y Lam, 2008).

La excelente calidad del árido de hormigón, en comparación con otros residuos pétreos, permitió fabricar adoquines 100% reciclados (Poon et al., 2002) que cumplieron con los requisitos normativos para uso en pavimentación en términos de resistencia mecánica (rotura a tracción indirecta $> 3,6$ MPa), climática (absorción de agua $\leq 6\%$ y pérdida de masa después del ensayo hielo-deshielo ≤ 1 kg/m²) y al desgaste por abrasión (≤ 20 mm o ≤ 23 mm según la clase asignada) (AEN/CTN 127,



2004b). El uso combinado de áridos finos de hormigón con gruesos cerámicos (hasta un 60% de reemplazo en total) también dio lugar a piezas con aceptables características, sin la necesidad de aumentar el contenido de cemento (Tang et al., 2007). Otros autores han obtenido resultados semejantes al mezclar ambos tipos de áridos en términos de resistencia mecánica, incluso con reemplazos totales (Soutsos et al., 2011b); mientras que para que las piezas recicladas cumplieran con el requisito físico de absorción de agua, recomendaron una sustitución máxima del 55% para la fracción gruesa y del 20% o 25% para la fina (Poon y Lam, 2008).

Igualmente se ha demostrado la viabilidad de fabricar este tipo de prefabricados con áridos reciclados contaminados por materiales extraños, como restos de baldosas cerámicas, ladrillos o vidrio (Poon y Chan, 2007; Rodríguez et al., 2016, 2017). La presencia de un 10% de estos contaminantes dio lugar a adoquines reciclados con una resistencia característica adecuada ($> 3,6$ MPa), aunque con una absorción de agua ligeramente superior al límite normativo (6%). En cambio, el uso de mármol residual como árido fino (hasta un 40%) provocó una disminución en la resistencia mecánica de los adoquines fabricados, en comparación con el valor obtenido en la pieza de referencia (5 MPa), pero por encima del exigido. Además, éstos cumplieron con el requisito de absorción de agua y presentaron un buen comportamiento al desgaste por abrasión, sin la necesidad de utilizar adiciones minerales (Gencel et al., 2012; Uygunoğlu et al., 2012). Finalmente, la utilización de polvo de residuos cerámicos como reemplazo de la arena natural ($< 30\%$) o del cemento ($< 20\%$) también dio lugar a la producción de adoquines para ser usados en zonas de tráfico (Penteado et al., 2016).

En relación a los **bordillos** de hormigón, hasta ahora, son pocos los trabajos experimentales en los que se ha estudiado su producción con árido reciclado para áreas pavimentadas con tráfico (López Gayarre et al., 2013; Özalp et al., 2016; Rodríguez et al., 2016; Juan-Valdés et al., 2018). En estudios como el de Özalp et al. (Özalp et al., 2016) se usaron desechos de la industria del prefabricado de hormigón, más limpios y homogéneos (separados selectivamente en la planta de reciclaje) para utilizarlos nuevamente en condiciones reales de producción. Otros investigadores emplearon áridos procedentes de residuos de hormigón y de restos de albañilería (López Gayarre et al., 2013) o, incluso, áridos mixtos reciclados con ciertas impurezas

(Rodríguez et al., 2016). Todos ellos han mostrado, con base en los requisitos normativos (similares a los exigidos a los adoquines) de resistencia mecánica, climática y al desgaste por abrasión (AEN/CTN 127, 2005a), la gran importancia que tiene la naturaleza y calidad del árido reciclado, así como el porcentaje de sustitución de éste por el natural en la aceptabilidad del producto fabricado.

El uso de áridos reciclados de hormigón dio lugar a la fabricación de bordillos suficientemente resistentes, tanto a nivel mecánico como climático, además de presentar un buen acabado superficial (Özalp et al., 2016). En cambio, la utilización de material cerámico, con sustituciones inferiores al 50% de la fracción gruesa reciclada, precisó del aumento del agua de mezcla, así como de una cantidad extra de cemento para alcanzar unas prestaciones adecuadas (López Gayarre et al., 2013); o de la presaturación de los áridos (Juan-Valdés et al., 2018), obteniendo consecuentemente elementos reciclados utilizables en aplicaciones menos exigentes (zonas de poco tráfico o peatonales). Los áridos de naturaleza mixta también mostraron un gran potencial para producir este tipo de piezas (hasta un 75% de sustitución), aunque la resistencia al desgaste por abrasión de las mismas no cumplió con el valor exigido en la normativa (< 20 mm) para ninguno de los reemplazos estudiados (Rodríguez et al., 2016).

La fabricación de **baldosas y terrazos** con árido reciclado ha sido objeto de estudio por una minoría de autores, utilizando como material granular el procedente de la valorización de diferentes tipos de residuos de demolición, tales como hormigón, restos de albañilería (Jankovic et al., 2012; Soutsos et al., 2012) o mixtos (Rodríguez et al., 2016). Estos autores han indicado que para alcanzar la resistencia a flexión máxima requerida, de 5 MPa (AEN/CTN 127, 2004c), las baldosas pueden llegar a incorporar hasta un 100% de material reciclado de hormigón (60% de grueso y 40% de fino), un 70% de árido grueso reciclado cerámico o un 30% de arena reciclada cerámica. En cambio, el requisito físico de resistencia a la intemperie (absorción de agua < 6%) sólo se puede lograr con bajos niveles de sustitución (< 30%).

Por su parte, el uso áridos mixtos reciclados en la fabricación de terrazos para interiores proporcionó una disminución de la resistencia mecánica a flexión de las piezas por debajo del valor normativo, de 5 MPa (AEN/CTN 127, 2005b) para cualquier tipo de reemplazo (25%, 50% y 75%), aunque éstas cumplieron en términos de absorción de agua (< 8%) y desgaste por abrasión (< 25 mm) para el porcentaje



máximo de sustitución (Rodríguez et al., 2016).

Con respecto a la producción de **bovedillas** de hormigón, Collins et al. (Collins et al., 1998) evaluó por primera vez el potencial de utilización de áridos reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición en la fabricación de bovedillas para un sistema de forjado suspendido. En otros trabajos experimentales más recientes se ha analizado la influencia de utilizar material granular procedente de distintos tipos de residuos sobre las propiedades finales de estas piezas de hormigón, como es el caso de áridos cerámicos (Miličević et al., 2015) o mixtos (Rodríguez et al., 2016). Mientras que para mitigar el problema de la presencia de restos de materiales no deseados en el árido (morteros de baja densidad, yeso o madera) otros autores optaron por la reutilización de rechazos de la industria del prefabricado, de hormigón y cerámico (Rodríguez et al., 2017; López Gayarre et al., 2017).

En estos estudios se han indicado que el uso de áridos reciclados, independientemente de su naturaleza, dio lugar a piezas con descensos en la resistencia a flexión a medida que aumentaba el porcentaje de sustitución, aunque según la norma UNE-EN 15037-2 las bovedillas de hormigón deben tener una carga de rotura a flexión que oscile entre 1,5 kN (sin función resistente) y 2,5 kN (resistente), valores que alcanzaron prácticamente todas las piezas fabricadas después de 90 días de curado, incluso con el 100% del árido reciclado. En relación con el parámetro de absorción de agua, aunque éste no sea un requisito normativo para este tipo de prefabricados, igualmente se obtuvieron variaciones respecto al porcentaje de árido utilizado, concretamente, valores que oscilaron entre el 5% y el 15% para bovedillas 100% recicladas dependiendo del estudio consultado (López Gayarre et al., 2013, 2017, Rodríguez et al., 2016, 2017).

Por último los **bloques** de hormigón (piezas de fábrica para cualquier tipo de muros), los cuales presentan requisitos normativos menos exigentes (AEN/CTN 127, 2016) que los establecidos a cualquiera de los prefabricados anteriormente mencionados. En este sentido, en los trabajos publicados se ha evaluado la posibilidad de fabricar estas piezas con diferentes tipos de áridos reciclados, como los procedentes de residuos de construcción y demolición que en ocasiones puedan contener algún tipo de impurezas (Sousa et al., 2003; Poon et al., 2009; Li y Lia, 2013); o de residuos de hormigón junto con cerámicos o mixtos, tanto de forma combinada como por separado (Soutsos et al.,

2011a; Xiao et al., 2011; Martín-Morales et al., 2017; Guo, Zhanggen et al., 2018).

Las mejores características del árido de hormigón dieron lugar a prefabricados (100% reciclados) con adecuadas características, principalmente en relación con su resistencia mecánica y su absorción de agua, en comparación con lo obtenido al utilizar residuo mixto (Martín-Morales et al., 2017). El uso combinado de áridos de hormigón y cerámicos también proporcionó una mejora en el comportamiento mecánico de los bloques fabricados, principalmente para aquellos que incluyeron en su dosificación entre un 20% y un 50% de arena reciclada cerámica, aunque para ello se necesitó de la incorporación de agua adicional a la mezcla, según aumentó el contenido de árido cerámico (Soutsos et al., 2011a; Xiao et al., 2011). En cambio, otros autores optaron por aumentar la cantidad de cemento (10%), obteniendo una resistencia similar a la de bloques naturales (Matar y El Dalati, 2012).

2.7.5. Mobiliario urbano y ecodiseño

El término "*mobiliario urbano*" es relativamente reciente y fue acuñado por diferentes autores que publicaron en los años sesenta sobre los nuevos conceptos relacionados con el tratamiento de los espacios públicos, entre los que se encuentra Gordon Cullen (Cullen, 1961), quien lo define como elementos que proporcionan el confort necesario para la utilización de las calles. Mientras que la compañía Decaux se atribuye la invención de este término (1964), asociado a los servicios públicos (Segarra Lagunes, 2008).

El mobiliario urbano agrupa un conjunto muy amplio de objetos que se utilizan y se integran en el paisaje urbano y deben ser comprensibles para el ciudadano. Éstos pueden utilizarse en espacios urbanos o públicos, en áreas privadas al aire libre o en sitios naturales extraurbanos. De hecho, cronológicamente, algunos son tan antiguos como las primeras civilizaciones y otros tan modernos que se les ha visto aparecer desde hace tan sólo unas décadas.

Los mayores alcances en el desarrollo del mobiliario urbano han tenido lugar durante los periodos en que se llevaron a cabo grandes proyectos de transformación urbana. Con el inicio de la fabricación en serie la gran infraestructura productiva de elementos para las calles, avenidas o jardines públicos dio lugar a comprender mejor los enormes



cambios urbanos acaecidos en las grandes ciudades. En el siglo XIX las fundiciones tuvieron un lugar preponderante, aunque la industrialización fue un gran acierto en el campo del mobiliario urbano, época que representó una mezcla de estilos arquitectónicos. En cambio, el siglo XX vio formalizados proyectos de ciudad en los que el mobiliario urbano fue el gran protagonista. El hierro fue el material principal del siglo XIX, mientras que en la primera mitad del siglo XX fueron el cemento y el hormigón los que imprimieron la imagen de la ciudad moderna. Pero, con independencia del material predominante en los distintos periodos históricos, el común denominador del mobiliario urbano es su aspecto formal y, tanto la fabricación como el consumo, se ha visto dominado por las tendencias estéticas (Segarra Lagunes, 2008).

Bajo esta denominación de mobiliario urbano se encuentran las siguientes piezas no estructurales, incluidas en la norma UNE-EN 13198 *“Productos prefabricados de hormigón. Mobiliario urbano y productos de jardín”* (AEN/CTN 127, 2004a):

- (i) **productos para amueblar espacios**, tales como bancos, asientos, mesas, zonas de juego, escalones, floreros, jardineras, fuentes, carteleras, indicadores de calle, postes indicadores de tráfico, carteles luminosos, barbacoas, buzones de correo, postes para tendedero, papeleras, estatuas, columnas decorativas y bolardos, albardillas;
- (ii) **productos para el control de la erosión del terreno**, como cajones de flores apilados, bancos con vegetación sin sobrecargas y sin exceder una altura total de 1 m;
- (iii) **productos para el suelo**, tales como alcorques y rejillas, rejas o accesos.

Teniendo en cuenta que el mobiliario urbano ha tenido una relación constante e indisoluble con la evolución de la ciudad, la ciencia, el arte y la tecnología (Segarra Lagunes, 2008), la situación medioambiental actual también está influyendo en este ámbito. Asociado a esta evolución nace el diseño ecológico o ecodiseño, como la disciplina que persigue diseñar productos sostenibles, que minimicen el impacto ambiental durante todas las etapas de su ciclo de vida, desde su creación o diseño propiamente dicho hasta su tratamiento como residuos.

El ecodiseño contribuye a la iniciativa de la Comisión sobre economía circular

(Comisión Europea, 2015, 2016b), mediante la aplicación de una serie de medidas relativas al ciclo de vida de los productos y los materiales. La mejora del diseño de los recursos contribuye al uso eficiente de los mismos, ya que contrapone su utilización a las necesidades y la funcionalidad de la construcción y considera escenarios de demolición (Comisión Europea, 2014b). A su vez, el diseño ecológico del producto influye de manera significativa en todo el ciclo de vida de los materiales utilizados, lo que hace que éste sea más duradero y más fácil de reparar, reutilizar o reciclar. Además, el ecodiseño (junto con el etiquetado energético) garantiza condiciones de competencia equitativas en el mercado interior, impulsa la inversión y la innovación de una manera sostenible y ahorra dinero a los consumidores reduciendo al mismo tiempo las emisiones de CO₂ (Comisión Europea, 2016b).

Por lo tanto, la estrategia de ecodiseño para las piezas del mobiliario urbano debe incorporar criterios ambientales que consideren la utilización de materiales reciclados para su fabricación, reduciendo con ello el consumo de materias primas primarias, así como los impactos negativos relacionados. Además, éstos deben ser duraderos, reutilizables (por lo menos la mayor parte de sus componentes) o reciclables cuando se convierten en residuos al final de su vida útil; entre otros aspectos, como la funcionalidad y la integración del elemento con el paisaje urbano.

Las empresas del sector de prefabricado, poco a poco, están incorporando en sus catálogos algunas piezas que utilizan materiales reciclados, tanto de naturaleza plástica como pétreo, entre ellas a nivel español cabe destacar las siguientes: Breinco, Escofet 1886, Gestora de Runes del Bages, Onadis Barcelona Disseny, Pastor o Zicla. Sin embargo, en la actualidad son inexistentes los estudios que avalan científicamente su viabilidad técnica, encontrándose tan sólo alguna propuesta de investigación de mobiliario urbano, aunque centrada principalmente en el diseño arquitectónico de las piezas (Rosas Chaves, 2014).

2.7.5.1. Requisitos normativos

Teniendo en cuenta la gran variedad de productos incluidos en la norma de prefabricados de hormigón para mobiliario urbano (AEN/CTN 127, 2004a), ésta establece requisitos mínimos para los productos, y específicos para otros productos en



particular, siempre en hormigón prefabricado.

Para los requisitos referidos al material y al proceso de producción del hormigón, además de para demostrar la conformidad del producto final se aplicará lo establecido en la norma común de prefabricados (AEN/CTN 127, 2013). Adicionalmente, el hormigón debe cumplir con una serie de requisitos mínimos que aseguren su durabilidad en función de la clase de hormigón utilizado (Ministerio de Fomento, 2008), mientras que los áridos utilizados en su fabricación, lo indicado en la normativa técnica correspondiente (Ministerio de Fomento, 2008; AEN/CTN 146, 2009a).

Dentro de los requisitos del producto acabado, la norma recoge los siguientes:

- (i) **características geométricas**, aplicables para la alineación y/o el trabado;
- (ii) **características superficiales**, que el producto no presente fisuras visibles (a una distancia mínima de dos metros, en condiciones de luz del día y superficie seca);
- (iii) **recubrimiento de hormigón para armadura**, va a depender del tipo de hormigón (de peso normal o ligero), de la clase de resistencia a compresión (C20/25, C30/37, C35/45, C40/50, LC12/13) y de la absorción de agua en masa del hormigón utilizado (máximo 6,5%);
- (iv) **seguridad de uso**, considerado para el uso final previsto;
- (v) **resistencia a la intemperie**, para uso externo sometido o no a condiciones de hielo-deshielo y en contacto o no con sales descongelantes. Bajo estas condiciones, los productos deben cumplir con los requisitos de absorción de agua (6-7,5%) y clase mínima de resistencia según el tipo de hormigón (C20/25, C30/37, C35/45, C40/50, LC12/13);
- (vi) **otros requisitos**, requisitos adicionales relacionados con el uso específico de una serie de productos en particular como, por ejemplo: soportes para bicicletas; productos previstos para contener agua; o aquellos con conexiones eléctricas.

3.MATERIALES Y MÉTODOS

En el desarrollo de esta investigación ha sido necesario realizar una serie de trabajos encaminados a comprobar la viabilidad del uso del árido reciclado procedente de los residuos de construcción y demolición para su aplicación en hormigón no estructural, destinado a la elaboración de prefabricados para mobiliario urbano.

Para ello se ha llevado la caracterización de los materiales utilizados, el estudio de las dosificaciones de las distintas mezclas, así como la determinación de las propiedades de los hormigones fabricados, tanto a escala de laboratorio como industrial. A continuación, se recogen los materiales y procedimientos utilizados.

3.1. Materiales

Los materiales empleados han sido: áridos, tanto naturales como reciclados, cemento, agua, aditivo y acero. En los siguientes subapartados se resumen sus características.

3.1.1. Áridos

Para la fabricación de los hormigones se han utilizado dos tipos de áridos: naturales (AN) y reciclados (AR), ambos de fracciones fina (0/4 mm) y gruesa (4/16 mm), que se identificaron por las siglas AFN, AGN, AFR y AGR, respectivamente. El reemplazo de la fracción gruesa reciclada está permitido en el Anejo 18 “Hormigones de uso no estructural” de la *Instrucción de Hormigón Estructural* (Ministerio de Fomento, 2008),



siempre que los áridos cumplan los requisitos definidos para el mismo en el Anejo 15 "Recomendaciones para la utilización de hormigones reciclados". El uso de la fracción fina queda fuera de los objetivos de la Instrucción, aunque en la norma de "Áridos para hormigón" (AEN/CTN 146, 2009a) se contempla que esta fracción del árido reciclado podría utilizarse para elaborar hormigón, siempre y cuando cumpla con las condiciones establecidas al árido fino natural o cuya evidencia de buen comportamiento haya sido sancionado por la práctica.

Los áridos naturales utilizados en este estudio procedieron del machaqueo de piedra caliza de canteras situadas en el macizo montañoso de Sierra Elvira, término municipal de Atarfe, en la provincia de Granada. Los reciclados se obtuvieron del triturado y cribado de diferentes residuos de construcción y demolición, depositados en la planta de tratamiento, recuperación y eliminación de Inertes Guhilar, S.L., localizada en el término municipal de Alhendín, en la provincia de Granada y que se codificaron como 17 01 07, conforme al Listado Europeo de Residuos (Ministerio de Medio Ambiente, 2002).

Desde el punto de vista granulométrico, y de acuerdo a lo establecido en la Instrucción EHE-08 (Ministerio de Fomento, 2008), se estableció como criterio general de designación del material granular el siguiente formato: $GR-d/D-IL-N$, donde GR hace referencia al grupo de árido: fino (AF) o grueso (AG); d/D es la fracción granulométrica, comprendida entre d (tamaño mínimo) y D (tamaño máximo); IL se refiere a su forma de presentación: triturado (T); y N identifica la naturaleza: calizo (C) o reciclado (R) conforme a la norma UNE 146901 "Áridos. Designación" (AEN/CTN 146, 2008b).

3.1.2. Cemento

El aglomerante empleado ha sido un cemento Portland blanco con adición de caliza entre 6% y 20%, de clase resistente 42,5 y de alta resistencia inicial, definido en la norma UNE 80305 "Cementos blancos" (AEN/CTN 80, 2012) y de conformidad con la normativa armonizada vigente: UNE-EN 197-1 "Cemento. Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes" (AEN/CTN 80, 2009), Instrucción para la recepción de cementos (Ministerio de la Presidencia, 2016), así como en la Instrucción de Hormigón Estructural (Ministerio de Fomento, 2008).

En la Tabla 11 se muestra su ficha técnica, que recoge la designación, composición y prescripciones de este material.

Tabla 11. Ficha técnica del cemento BL II/A-L 42,5R UNE 80305

Propiedad	Requisitos
Composición	
Clinker	80-94%
Fíller calizo (contenido de carbono orgánico total $\leq 0,5\%$ en masa)	6-20%
Componentes minoritarios	0-5%
Requisitos mecánicos	
Resistencia inicial a 2 días	>20 MPa
Resistencia nominal a 28 días	$\geq 42,5$ y $\leq 62,5$ MPa
Requisitos físicos	
Tiempo de principio de fraguado	≥ 60 minutos
Estabilidad de volumen (Expansión)	≤ 10 mm
Requisitos químicos	
Contenido de sulfatos (SO ₃)	$\leq 4,0\%$
Contenido de cloruros	$\leq 0,10\%$
Otros	
Blancura (Coordenadas CIELAB L*)	$\geq 87\%$

3.1.3. Agua

El agua utilizada, tanto en el amasado del hormigón como en su curado, ha cumplido con lo establecido en el artículo 27 "Agua" de la EHE-08 (Ministerio de Fomento, 2008), es decir, no contiene ingredientes perjudiciales que afecten a las propiedades del hormigón o a la protección de las armaduras frente a la corrosión.

Cabe destacar la importancia que tiene este componente durante el amasado del hormigón con árido reciclado ya que, además de participar en las reacciones de hidratación del cemento y conferir trabajabilidad a la masa fresca, es imprescindible para compensar la mayor capacidad de absorción de estos áridos (Sánchez de Juan, 2004; Geraldés, 2013).

3.1.4. Aditivo

El aditivo empleado ha sido un superplastificante de nueva generación a base de policarboxilato modificado, conforme a las normas UNE-EN 934-1 "Aditivos para



hormigones, morteros y pastas. Parte 1: Requisitos comunes" (AEN/CTN 83, 2009j) y UNE-EN 934-2 "Aditivos para hormigones, morteros y pastas. Parte 2: Aditivos para hormigones. Definiciones, requisitos, conformidad, marcado y etiquetado" (AEN/CTN 83, 2012a), cuya función principal es aumentar la trabajabilidad sin modificar el contenido de agua, de acuerdo con lo establecido en el artículo 29 "Aditivos" y en el Anejo 15 de la Instrucción (Ministerio de Fomento, 2008).

El reductor de agua se ha utilizado para mantener los valores de diseño de consistencia tipo blanda y compensar la demanda de agua requerida por el árido reciclado. Las características del producto, según los datos facilitados por el fabricante, se recogen en la Tabla 12.

Tabla 12. Composición y características del aditivo Chryso®fluid Optima 227

Composición	Características	Dosificación recomendada
Policarboxilato modificado en base acuosa	Aspecto: líquido	
	Color: marrón	
	Densidad: 1,06 kg/dm ³ ± 0,02	0,3 a 2% del peso del cemento
	pH: 6	
	Cloruros (Cl ⁻): exento (≤0,1%)	

3.1.5. Acero

Para evitar la fisuración de las piezas de hormigón fabricadas en la fase de escala industrial se han empleado armaduras de reparto tipo malla electrosoldada de 15 x 15 mm de 8 mm de diámetro, que cumplen con lo establecido en el artículo 32 "Aceros para armaduras pasivas" de la EHE-08 (Ministerio de Fomento, 2008).

3.2. Métodos

La determinación de las características de los distintos componentes del hormigón, así como la dosificación empleada, es necesaria para establecer sus propiedades y su comportamiento final. En los siguientes apartados se detallan los ensayos que se han realizado para ello. Estos trabajos se han desarrollado, en su totalidad, en el Laboratorio de Materiales de Construcción del Departamento de Construcciones Arquitectónicas de la Universidad de Granada.

3.2.1. Caracterización de los áridos

Con la finalidad de obtener muestras representativas del conjunto para los ensayos de caracterización (Figura 15), se ha realizado un procesado previo de los áridos, siguiendo para ello el procedimiento establecido en las normas UNE-EN 932-1 "Ensayos para determinar las propiedades generales de los áridos. Parte 1: Métodos de muestreo" (AEN/CTN 146, 1997) y UNE-EN 932-2 "Ensayos para determinar las propiedades generales de los áridos. Parte 2: Métodos para la reducción de muestras de laboratorio" (AEN/CTN 146, 1999a).



Figura 15. Material procesado para obtener las muestras de ensayo y reductor de muestras utilizado

Tabla 13. Ensayos geométricos de los áridos

Propiedades geométricas	Norma de ensayo	Valor límite	
		EHE-08	UNE-EN 12620
Determinación de la granulometría de las partículas. Método del Tamizado	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" (AEN/CTN 146, 2012);	Huso granulométrico arenas / D>4 mm*	-
Contenido total de finos (< 0,063 mm) (%)	UNE-EN 933-2; UNE-EN 933-2/1M "Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos"	≤1,5 AG; 6-16 AF	0,5-4 AG; 3-22 AF
Contenido de arena (< 4 mm) (%)	Parte 2: Determinación de la granulometría de las partículas Tamices de ensayo, tamaño nominal de las aberturas" (AEN/CTN 146, 1996, 1999b)	≤5 AGR*	-
Desclasificados inferiores (%)		≤10 AGR*	-
Ensayo del equivalente de arena	UNE-EN 933-8:2012+A1; UNE-EN 933-8:2012-A1:2015/1M "Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 8: Evaluación de los finos. Ensayo del equivalente de arena" (AEN/CTN 146, 2015, 2016)	>70 (clase de exposición I, IIa ó IIb) >75 (resto de casos)	≤30 a >65

(*) Valor límite recogido en el Anejo 15 de la EHE-08 (Ministerio de Fomento, 2008), aplicable únicamente a los áridos reciclados. (-) Parámetro sin restricción.

Siglas utilizadas: AG, árido grueso; AF, árido fino.

Tabla 14. Ensayo de clasificación de los componentes de los áridos gruesos reciclados

Componente	Norma de ensayo	Valor límite	
		EHE-08	UNE-EN 12620
Rc - Contenido en hormigón (%)		-	> 90 a <50
Ru - Áridos no tratados, piedra natural (%)		-	-
Rg - Vidrio (%)		-	≤ 2 a ≤ 25
Rc + Ru (%)	UNE-EN 933-11; UNE-EN 933-11:2009/AC "Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 11: Ensayo de clasificación de los componentes de los áridos gruesos reciclados" (AEN/CTN 146, 2009b, 2010a)	-	>95 a <50
Rc + Ru + Rg (%)		-	>90 a < 50
Rb - Unidades de albañilería de arcilla, principalmente (%)		≤ 5 AGR*	< 10 a > 50
Ra - Materiales bituminosos (%)		≤ 1 AGR*	> 95 a < 1
X - Otros: cohesivos (arcilla y arena), metales, madera no flotante, plástico y caucho, yeso (%)		≤ 1,0 AGR*	< 1
X + Rg (%)		-	<0,5 a <2
FL - Partículas flotantes (cm ³ /kg)		-	< 0,2 a < 10

(*) Valor límite recogido en el Anejo 15 de la EHE-08 (Ministerio de Fomento, 2008), aplicable únicamente a los áridos reciclados. (-) No existe restricción para este parámetro.

Tabla 15. Ensayos físico-mecánicos de los áridos

Propiedades físico-mecánicas	Norma de ensayo	Valor límite	
		EHE-08	UNE-EN 12620
Resistencia a la fragmentación. Ensayo de los Ángeles	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" (AEN/CTN 146, 2010b)	≤40	≤15 a >60
Densidad de partículas tras secado en estufa (kg/dm ³)	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" (AEN/CTN 146, 2014)	-	> 2,00
Absorción de agua	24 horas (WA _{24h}) (%)	≤ 5	-
	10 minutos (WA _{10min}) (%)	≤ 5 AGR ^{1*}	-
		≤ 5,5 AGR ^{2*}	-

¹ WA_{24h} no superior al 5% en AGR utilizados en hormigón reciclado con más del 20% de AR. ² Para aplicaciones de AGR no superiores al 20%. (*) Valor límite recogido en el Anejo 15 de la EHE-08 (Ministerio de Fomento, 2008), aplicable únicamente a los áridos reciclados. (-) No existe restricción para este parámetro.

Una vez obtenidas las muestras de los materiales granulares empleados, se ha llevado a cabo su caracterización, para lo cual se han tenido en cuenta las especificaciones establecidas en el Artículo 28 "Áridos" de la EHE-08 (Ministerio de Fomento, 2008); además, en el caso de los áridos reciclados, hubo que considerar las prescripciones de los Anejos 15 y 18, que contemplan la utilización de los mismos en la elaboración de

hormigón estructural y no estructural, respectivamente. A su vez, esta Instrucción (Ministerio de Fomento, 2008) exige que los áridos satisfagan los requisitos técnicos de la norma UNE-EN 12620 de áridos para hormigón (AEN/CTN 146, 2009a; CEN/TC 154, 2010). De la Tabla 13 a la Tabla 16 se recogen todos los ensayos realizados, la referencia de la norma utilizada y los valores límite exigibles, clasificados en función de sus propiedades geométricas (Tabla 13), físico-mecánicas (Tabla 14 y Tabla 15) y químicas (Tabla 16).

Tabla 16. Ensayos químicos de los áridos

Propiedades químicas	Norma de ensayo	Valor límite	
		EHE-08	UNE-EN 12620
Contenido de cloruros solubles en agua (%)	UNE-EN 1744-1:2010+A1 "Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos. Parte 1: Análisis químico. Capítulo 7 Determinación de los cloruros solubles en agua empleando el método Volhard" (AEN/CTN 146, 2013)	< 0,05 HA ; <0,03 HP; <0,15 HM	-
Contenido de cloruros solubles en ácido AR, expresado en iones cloruro (%)	UNE-EN 1744-5 "Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos. Parte 5: Determinación del contenido de cloruro soluble en ácido" (AEN/CTN 146, 2007a)	-	-
Contenido en sulfatos solubles en agua de los AR (%)	UNE-EN 1744-1:2010+A1 "Capítulo 10.2 Determinación de los sulfatos solubles en agua en áridos reciclados" (AEN/CTN 146, 2013)	-	< 0,2 a >1,3
Contenido en sulfatos solubles en ácido, expresado como SO ₃ (%)	UNE-EN 1744-1:2010+A1 "Capítulo 12 Determinación de los sulfatos solubles en ácido" (AEN/CTN 146, 2013)	≤0,8	< 0,2 a >1,0
Contenido total en azufre, expresado como S (%)	UNE-EN 1744-1:2010+A1 "Capítulo 11 Determinación del contenido total en azufre" (AEN/CTN 146, 2013)	≤1	≤1
Materia orgánica	UNE-EN 1744-1:2010+A1 "Capítulo 15.1 Determinación del contenido en humus" (AEN/CTN 146, 2013)	Exento	-
Partículas ligeras (%)	UNE-EN 1744-1:2010+A1 "Capítulo 14.2 Determinación de contaminantes ligeros" (AEN/CTN 146, 2013)	< 0,5 AF; <1 AG; ≤ 1 AGR*	-

(*) Valor límite recogido en el Anejo 15 de la EHE-08 (Ministerio de Fomento, 2008), aplicable únicamente a los áridos reciclados.

(-) No existe restricción para este parámetro.

Siglas utilizadas: HA, hormigón armado; HP, hormigón pretensado; HM, hormigón en masa.

3.2.2. Estudios de dosificación del hormigón para la obtención de piezas para mobiliario urbano

3.2.2.1. Dosificación del hormigón

En este estudio se ha trabajado con el reemplazo alternativo de las fracciones fina o gruesa, así como con la totalidad de los áridos naturales por reciclados. Para ello, se ha utilizado la dosificación de partida, proporcionada por el fabricante para productos prefabricados, que incluye por m³ de hormigón el 50% en peso de AGN, el 33% de AFN, el 17% de cemento, el 8% de agua (sobre el peso de los materiales sólidos) y el 0,8% de aditivo (sobre el peso del cemento), correspondiente a una relación agua/cemento (a/c) efectiva de 0,48.

Como resultado se obtuvieron tres tipos de hormigones reciclados (HR) a los que se les denominó HR-F, HR-G y HR-T, cuya identificación se muestra en la Tabla 17; además se fabricó un hormigón con árido natural utilizado como referencia (HN).

Tabla 17. Designación de los hormigones estudiados

Nomenclatura	Tipo de hormigón	Reemplazo fracción fina, AFN por AFR	Reemplazo fracción gruesa, AGN por AGR
HN	Natural o de referencia	0%	0%
HR-F	Reciclado	100%	0%
HR-G	Reciclado	0%	100%
HR-T	Reciclado	100%	100%

3.2.2.2. Caracterización del hormigón fresco y endurecido

Los hormigones de uso no estructural deben cumplir con los requisitos y recomendaciones establecidas en los Anejos 15 y 18 de la Instrucción EHE-08 (Ministerio de Fomento, 2008). Para ello se han desarrollado un conjunto de ensayos sobre el hormigón fresco y el endurecido, los cuales se recogen de la Tabla 18 a la Tabla 21. Los ensayos correspondientes al estado fresco (Tabla 18) permiten conocer las características del material confeccionado y se determinaron tras finalizar el proceso de amasado y antes del inicio del fraguado. En el caso del hormigón endurecido, los ensayos están destinados a identificar sus propiedades físicas (Tabla 19), mecánicas (Tabla 20) y de durabilidad (Tabla 21).

Tabla 18. Ensayos del hormigón fresco

Ensayo	Norma de ensayo
Asentamiento. Cono de Abrams	UNE-EN 12350-2 "Ensayos de hormigón fresco. Parte 2: Ensayo de asentamiento" (AEN/CTN 83, 2009a)
Densidad	UNE-EN 12350-6 "Ensayos de hormigón fresco. Parte 6: Determinación de la densidad" (AEN/CTN 83, 2009b)
Contenido de aire	UNE-EN 12350-7 "Ensayos de hormigón fresco. Parte 7: Determinación del contenido de aire. Métodos de presión" (AEN/CTN 83, 2010)

Tabla 19. Ensayos característicos del hormigón endurecido: propiedades físicas

Ensayo	Norma de ensayo
Densidad tras secado en estufa	UNE-EN 12390-7 "Ensayos de hormigón endurecido. Parte 7: Densidad del hormigón endurecido" (AEN/CTN 83, 2009f)
Absorción de agua	UNE-EN 13369 "Anexo G (Normativo) Ensayo de absorción de agua" (AEN/CTN 127, 2013)
Velocidad de ultrasonidos	UNE-EN 12504-4 "Ensayos de hormigón en estructuras. Parte 4: Determinación de la velocidad de los impulsos ultrasónicos" (AEN/CTN 83, 2006)

Tabla 20. Ensayos característicos del hormigón endurecido: propiedades mecánicas

Ensayo	Norma de ensayo
Resistencia a compresión	UNE-EN 12390-3; UNE-EN 12390-3:2009/ AC "Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas" (AEN/CTN 83, 2009d, 2011a)
Resistencia a flexión	UNE-EN 12390-5 "Ensayos de hormigón endurecido. Parte 5: Resistencia a flexión de probetas" (AEN/CTN 83, 2009e)
Módulo de elasticidad dinámico	UNE-EN 14146 "Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación del módulo de elasticidad dinámico (con la medida de la frecuencia de resonancia fundamental)" (AEN/CTN 22, 2004a)
Módulo estático de elasticidad	UNE-EN 12390-13 "Ensayos de hormigón endurecido. Parte 13: Determinación del módulo secante de elasticidad en compresión" (AEN/CTN 83, 2014b)

Todos los ensayos realizados se ajustaron a sus correspondientes normas UNE, salvo la microscopía óptica, que se ha estimado conveniente su estudio como método alternativo para analizar la porosidad del hormigón. Este método permite visualizar la microestructura del hormigón, analizando grandes áreas bidimensionales de una muestra (4-5 cm²) y cuantificar la cantidad y distribución de sus constituyentes a nivel de su estructura interna (Aligizaki, 2006).

Para llevar a cabo los ensayos sobre el hormigón endurecido se fabricaron probetas cuya forma (cilíndrica, cúbica y prismática) y dimensiones variaron en función del tipo



de ensayo a realizar y de acuerdo con la norma UNE-EN 12390-1 "Ensayos de hormigón endurecido. Parte 1: Forma, dimensiones y otras características de probetas y moldes" (AEN/CTN 83, 2014a). Para la fabricación y el curado de las mismas se tuvo en cuenta lo especificado en la norma UNE-EN 12390-2 "Ensayos de hormigón endurecido. Parte 2: Fabricación y curado de probetas para ensayos de resistencia" (AEN/CTN 83, 2009c), de forma que una vez elaboradas se mantuvieron protegidas y cubiertas con una lámina de plástico para evitar la pérdida de agua por evaporación durante las primeras 24 h; transcurrido este tiempo se retiraron de los moldes y se curaron en agua a 22 ± 2 °C hasta ser ensayadas. Todos los ensayos se realizaron por triplicado, con la finalidad de obtener el valor medio en cada caso, así como su desviación estándar.

Tabla 21. Ensayos de durabilidad del hormigón endurecido

Ensayo	Norma de ensayo
Absorción de agua, densidad y porosidad accesible al agua	UNE 83980 "Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo. Determinación de la absorción de agua, la densidad y la porosidad accesible al agua del hormigón" (AEN/CTN 83, 2014c)
Penetración de agua bajo presión	UNE-EN 12390-8; UNE-EN 12390-8:2009/1M "Ensayos de hormigón endurecido. Parte 8: Profundidad de penetración de agua bajo presión" (AEN/CTN 83, 2009g, 2011b)
Absorción por capilaridad	UNE 83982 "Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo. Determinación de la absorción de agua por capilaridad del hormigón endurecido. Método Fagerlund" (AEN/CTN 83, 2008)
Velocidad de carbonatación	UNE 83993-2 "Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo. Determinación de la velocidad de penetración de la carbonatación en el hormigón endurecido. Parte 2: Método acelerado" (AEN/CTN 83, 2013b)
Resistencia al envejecimiento por niebla salina	UNE-EN 14147 "Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la resistencia al envejecimiento por niebla salina" (AEN/CTN 22, 2004b)

3.2.2.3. Tratamiento previo del árido reciclado: premojado

La técnica del premojado se utiliza para reducir el intercambio de agua entre el árido reciclado y la pasta de cemento, mediante el llenado de los poros y grietas del árido, de forma que se garantice que éste alcance un nivel óptimo de humedad para no restar agua al proceso de hidratación del cemento y, a su vez, proporcione una adecuada consistencia a la mezcla (Etxeberria, Vázquez-Ramonich, et al., 2007; Agrela et al., 2011; Thomas García, Setién, et al., 2018).

Los trabajos de investigación consultados muestran que no existe consenso en cuanto

al método de premojado más adecuado. En ellos se observan variaciones en función del tipo de material granular reciclado, especialmente de los finos procedentes del mortero adherido a éste, que difieren en el tiempo de premojado o contenido de agua utilizada para pretratar a los áridos reciclados, entre otros. Partiendo de estos trabajos se ha llevado a cabo un estudio de pretratamiento de los áridos reciclados utilizados, con la finalidad de determinar el método de premojado más adecuado, así como los beneficios que podrían obtenerse con este proceso. Para ello el estudio se dividió en dos fases experimentales:

- En la primera se optó por premojar los áridos reciclados, antes del mezclado con el resto de materiales, con una cantidad adicional de agua, calculada como el 80% de su capacidad de absorción en 24 horas (WA_{24h}), durante 10 minutos; este tiempo ha sido considerado por numerosos autores como suficiente para garantizar que estos áridos absorban el agua necesaria para no restársela a la lechada de cemento (González-Fonteboa, 2002; Sánchez de Juan, 2004; Evangelista y De Brito, 2007; Zhang et al., 2007; Agrela et al., 2011). Inmediatamente después se incorporaron los demás componentes, según el orden común establecido para este tipo de áridos (Tam et al., 2005; Cartuxo et al., 2015).
- La segunda fase consistió en un estudio comparativo de diferentes métodos de premojado, con el fin de conocer su efecto en las propiedades del hormigón reciclado. Para ello, se formularon cinco métodos, cuatro de ellos a partir de la bibliografía consultada (métodos 1 a 4) (Cachim, 2009; Mas, Cladera, Olmo, et al., 2012; Etxeberria, Vázquez-Ramonich, et al., 2007; Evangelista y De Brito, 2007), y un quinto propuesto en esta investigación (método 5). Los métodos ensayados se diferenciaron en cuanto a la cantidad de agua de premojado utilizada, 12%, 50%, 70%, 80% y 100%; el tiempo de premojado, 2, 5 y 10 minutos; el tiempo total de mezclado, 12, 15 y 20 minutos; y, finalmente, la relación a/c total, 0,48, 0,53 y 0,55, calculada en base al contenido de agua añadida más el agua de amasado. Para completar esta fase los hormigones fabricados aplicando los métodos indicados, se compararon con un hormigón con árido reciclado sin premojar (método 0), además de con el de referencia (HN). La Figura 16 resume el procedimiento seguido en la fabricación de esta fase y las diferencias entre los métodos estudiados.

Los hormigones fabricados según ambas fases se evaluaron de acuerdo a los ensayos



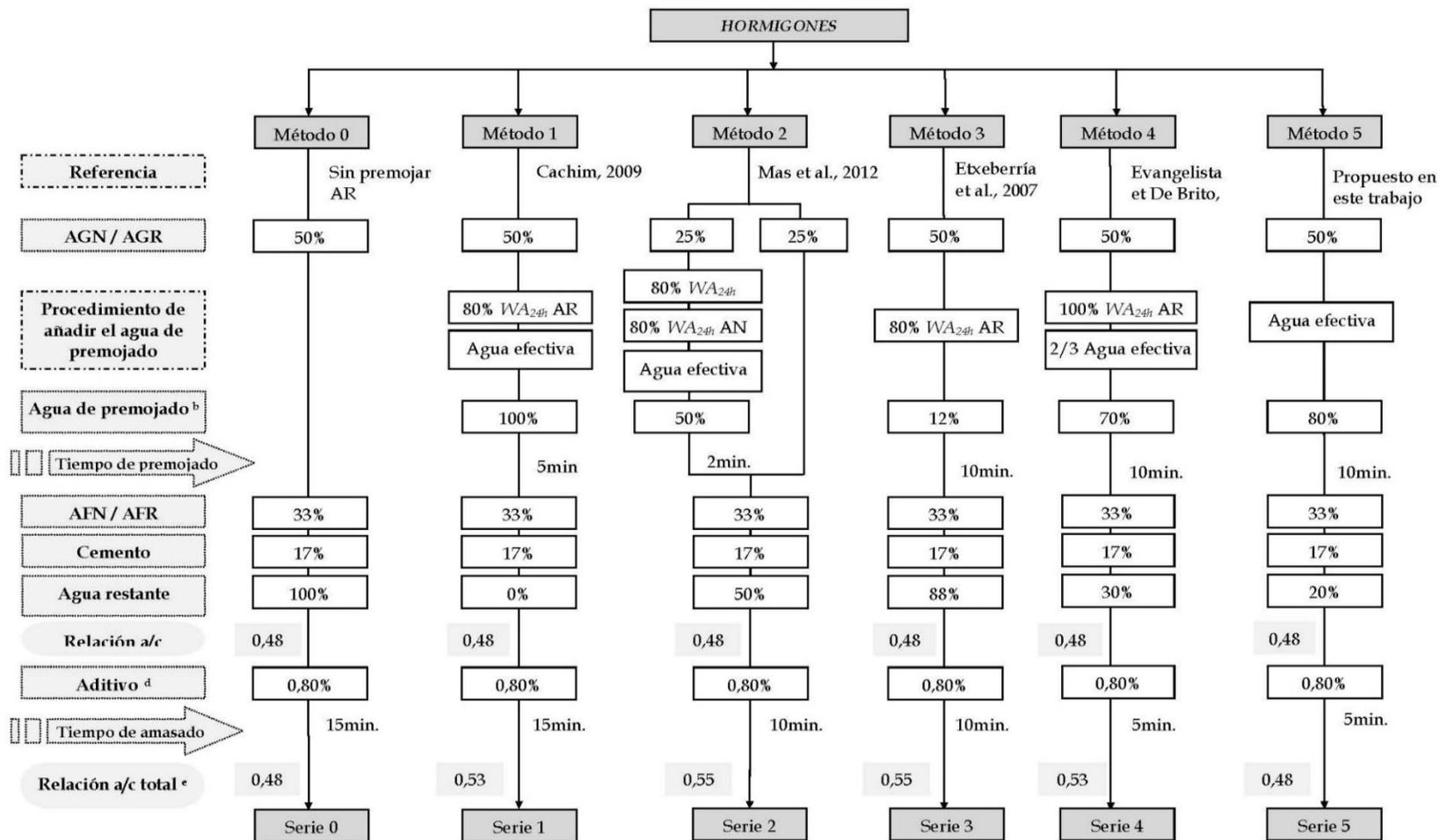
indicados anteriormente (Tabla 18 a Tabla 21); además a los hormigones producidos en la segunda fase se les realizaron los ensayos indicados en la Tabla 22. Éstos se llevaron a cabo con la finalidad de analizar su microestructura (Aligizaki, 2006; Shi, Wang, et al., 2012) ya que la calidad de la zona de transición que une a cada uno de los componentes del material influye considerablemente en el comportamiento del hormigón (Otsuki et al., 2003; Zheng et al., 2018; Thomas et al., 2018); además el estado de humedad de los áridos reciclados afecta en gran medida a la formación de las zonas de unión interfacial entre éstos y la pasta de cemento, lo que repercutirá en las propiedades finales del hormigón (Etxeberria et al., 2006; Pelufo et al., 2009; Sidorova et al., 2014; Thomas García, de Brito, et al., 2018).

Tabla 22. Ensayos de porosidad del hormigón endurecido

Ensayo	Norma de ensayo
Porosimetría de inyección de mercurio	ASTM D4404 "Standard Test Method for determination of Pore Volume and Pore Volume Distribution of Soil and Rock by Mercury Intrusion Porosimetry" (ASTM, 2010)
Microscopía óptica. Análisis digital de imágenes	-

En el siguiente apartado se describe la metodología empleada en la técnica de microscopía óptica, dado que la misma no está normalizada.

Utilización de árido reciclado para la fabricación de piezas de hormigón prefabricado de mobiliario urbano



^a Agua de amasado, sobre el peso del cemento más el peso del árido.

^b Porcentaje calculado sobre el agua total, resultante de la suma del agua efectiva o de amasado más el agua añadida.

^c Relación a/c sobre el agua efectiva.

^d Sobre el peso del cemento y diluido en una pequeña cantidad de agua.

^e Relación a/c en función del agua total obtenida.

Figura 16. Procedimiento de fabricación de los hormigones reciclados

3.2.2.3.1. Técnica de microscopía óptica

Para el desarrollo de esta técnica se utilizó un microscopio óptico de luz polarizada y pletina invertida, Nikon Epiphot 200, equipado con una cámara digital de 7Mp que permite obtener imágenes con una resolución máxima de $0,07042 \mu\text{m}$ por píxel a 100x, lo que corresponde a una región visual de $15599,59 \mu\text{m}^2$. Dicha cámara se conecta a un ordenador en el que a través del software Perfect Image (Clara Visión), transforma la imagen digitalizada de píxel a μm , siempre teniendo en cuenta el objetivo utilizado (5x, 10x, 20x, 50x ó 100x).



(a) Cortadora de sierra (probetas)



(b) Cortadora sierra (pequeñas muestras)



(c) Embutidora de vacío



(d) Pulidora



(e) Muestras embutidas en resina y pulidas



(d) Microscopio óptico y ordenador conectado

Figura 17. Proceso de preparación de las muestras de hormigón para el análisis por microscopía óptica

La preparación de las muestras es un factor muy importante para obtener el mayor rendimiento de las observaciones microscópicas (Struble y Stutzman, 1989; Kjellsen et al., 2003; Ye, 2003). Para ello, de la probeta normaliza se cortaron cubos de 2 cm mediante una cortadora (Labotom-3 de Struers), dotada de un disco de corte especial para material pétreo. Durante una hora y a baja presión (4,5 a 6 bar) se eliminó el aire del interior de los poros y fisuras, mediante una embutidora de vacío (CitoVac de Struers), permitiendo que la resina epoxi de baja viscosidad (Resina Epofix, Struers) penetrara en todos los poros de la probeta de hormigón embutida. Después del

endurecimiento del material de impregnación se llevó a cabo sobre la superficie observable, un desbastado inicial en dos etapas y, finalmente, un pulido con disco de diamante (MD-Piano, DiaPro Allegro y MD-Dac), para lo que se utilizó una pulidora automática (TegraPol-11 de Struers). El proceso descrito se recoge en la Figura 17.

Como el área estudiada total debe ser representativa de la microestructura de la muestra, se requirió de un número mínimo de capturas de imágenes. De acuerdo a la teoría estadística de Bear y Bachmat (Bear y Bachmat, 1990) se capturaron 80 imágenes de cada muestra analizada (Figura 17e), a una resolución de 5x (equivalente a un área de $6293382 \mu\text{m}^2$), con el objetivo de cubrir la mayor gama posible de espacios vacíos y poros de mayor tamaño; y en torno a 100 imágenes combinando los otros objetivos de mayor aumento para observar poros de menor tamaño, microfisuras o demás rasgos microestructurales de la muestra.

Con ayuda del software de análisis digital (PI) se binarizaron las imágenes ópticas de color a monocromo obteniendo una nueva imagen, ampliada e invertida, en la que las zonas sólidas se visualizan en gris, mientras que los poros y fisuras toman un color negro. Este tratamiento facilita la interpretación de la zona observable, así como la cuantificación de la porosidad, teniendo en cuenta la distribución de poros por tamaño y forma (discriminación), así como el porcentaje total de poros cerrados, en este caso, mediante análisis de fases. Para completar el estudio de cada muestra, se reconstruyeron las imágenes tomadas con el software PI usando como herramienta auxiliar el software AutoCad, para obtener una visión completa de la sección analizada; facilitando con ello la interpretación y cuantificación de la distribución y conectividad de los poros en 2D. Además, con la finalidad de obtener unos resultados más representativos, acordes con el volumen total de la muestra, se practicaron dos cortes equidistantes en los cubos de 2 cm, por lo que finalmente se analizaron un total de cuatro superficies de 4 cm^2 de cada tipo de hormigón.

3.2.3. Fabricación y viabilidad técnica de las piezas de mobiliario urbano

Con la finalidad de valorar la viabilidad de producción de prefabricados de hormigón con árido reciclado para ser utilizados como elementos decorativos en mobiliario urbano, se fabricaron piezas a escala industrial. Para ello se aplicó la dosificación

óptima y el proceso de elaboración de este tipo de elementos en fábrica a partir de la experiencia obtenida en los trabajos preliminares de laboratorio. Para su producción se tuvieron en cuenta los requisitos que deben cumplir los productos para mobiliario urbano de hormigón prefabricado, recogidos en la norma UNE-EN 13369 "Reglas comunes para productos de hormigón prefabricado" (AEN/CTN 127, 2013) y para el producto acabado, lo indicado en la norma UNE-EN 13198 "Productos prefabricados de hormigón. Mobiliario urbano y productos de jardín" (AEN/CTN 127, 2004a).

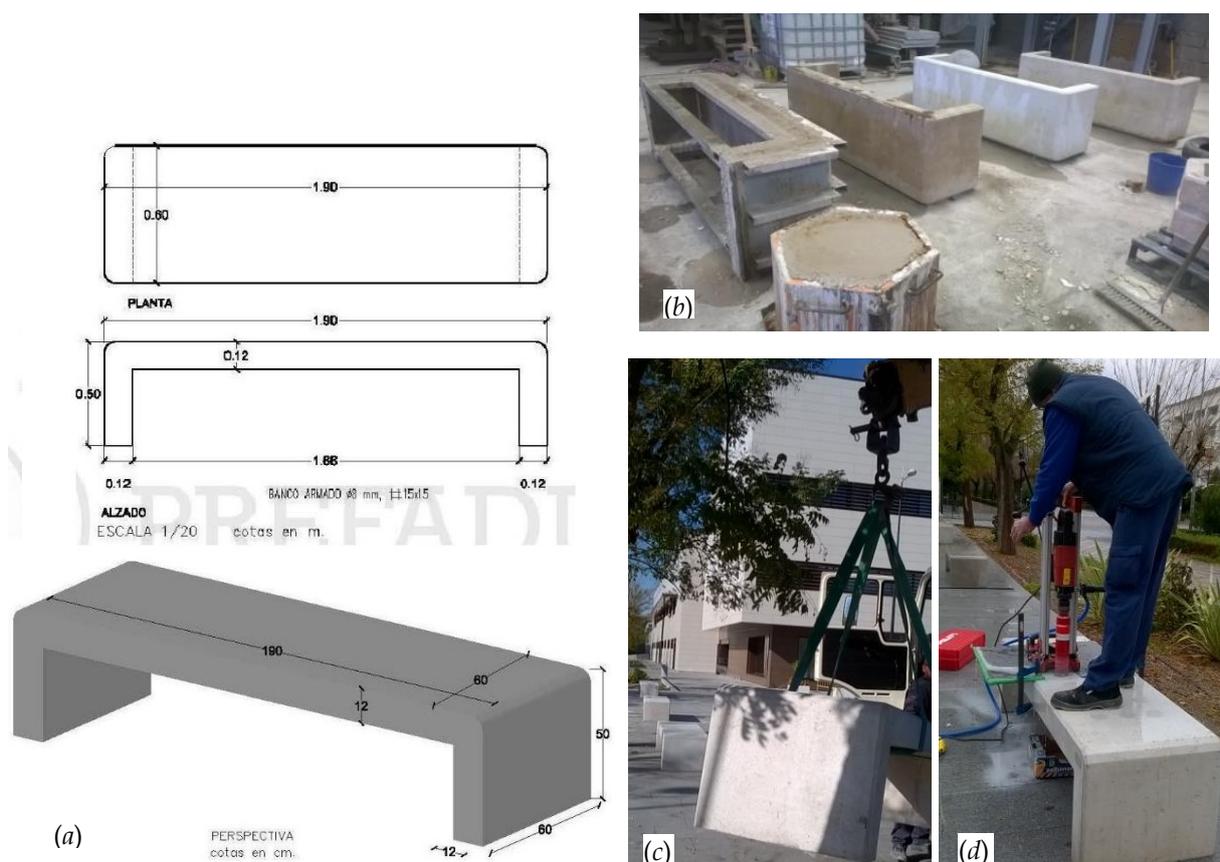


Figura 18. Dimensiones técnicas de un banco de hormigón (a). Curado de prefabricados (b), puesta en servicio (c) y extracción de testigos (d)

Dada la gran variedad de productos para mobiliario urbano, del catálogo de piezas fabricadas por la empresa Prefadur, S.L., se seleccionó uno de los elementos más utilizados, un banco, cuyas formas y dimensiones se recogen en la Figura 18a. Las piezas fabricadas se colocaron en un área pública (Campus de Fuentenueva, Universidad de Granada) con la finalidad de evaluar el comportamiento de sus propiedades a lo largo de dos años. Se fabricaron tres tipos de piezas según el árido utilizado: una con árido natural que servirían como referencia, designado como P-HN

y dos tipos más con árido reciclado, denominadas como P-HR-G y P-HR-T, según se haya empleado su fracción gruesa o ambas fracciones, respectivamente. De cada uno de ellos se fabricaron dos unidades siguiendo para ello la línea de producción de la fábrica. A la hora de extrapolar la dosificación de laboratorio a fábrica fue necesario realizar un ajuste en el contenido de aditivo, con el fin de garantizar la trabajabilidad del material para su correcta puesta en obra y el cumplimiento de lo establecido por la Instrucción EHE-08 en relación al grado aceptable de impermeabilidad del hormigón (Ministerio de Fomento, 2008). El desmolde de las piezas se realizó pasado un día desde el hormigonado y, posteriormente, se conservaron en el interior de una nave industrial, a unas condiciones de temperatura y humedad relativamente constantes (Figura 18b). La puesta en servicio se llevó a cabo entre el tercer y el cuarto mes, con el objeto de garantizar el mejor comportamiento del prefabricado frente a la durabilidad del material (Figura 18c).

Con el objeto de evaluar el comportamiento de las piezas tras la exposición a condiciones de uso, se estableció un programa de seguimiento, de acuerdo al plan de trabajo de la Figura 19, que implicó una toma de muestras a los 1, 3, 6, 9, 12 y 24 meses de su fabricación. Ésta consistió en la extracción de testigos (Figura 18d) conforme a la norma UNE-EN 12504-1 "Ensayos de hormigón en estructuras. Parte 1: Testigos. Extracción, examen y ensayo a compresión" (AEN/CTN 83, 2009h). La extracción de probetas se realizó con una perforadora con corona tubular de diamante en sentido perpendicular a la dirección de hormigonado, lo más lejos posible de los extremos de la pieza y en zonas donde no exista armadura. Los testigos presentaron una esbeltez similar a la que tienen las probetas cilíndricas (relación longitud/diámetro = 2), con el objeto de poder comparar los resultados obtenidos (Rojas Henao, 2012; Mena Sebastián, 2015). La conservación de los mismos se llevó a cabo sumergiéndolos en agua a $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ al menos durante las 48h previas al ensayo, tal y como se especifica en la normativa técnica (AEN/CTN 83, 2009h). Para la identificación de los testigos se siguió la designación utilizada para el hormigón seguido de una barra que hace referencia a la edad del testigo (1, 3, 6, 9, 12 o 24 meses).

Para el seguimiento de los bancos se han realizado ocho ensayos, bien sobre el producto acabado o sobre los testigos, de acuerdo a lo indicado en la Tabla 23. Algunos



de ellos corresponden al producto acabado (dimensiones, apariencia, resistencia a compresión y absorción de agua) y están incluidos en la norma UNE-EN 13198; mientras que otros se realizaron para conocer de forma más amplia la calidad del material en el tiempo (ensayos no destructivos de índice de rebote y velocidad de ultrasonidos), los cuales están recogidos en la norma general de prefabricados (AEN/CTN 127, 2013). Finalmente, se ha considerado de interés incluir el módulo de deformación, la densidad y la carbonatación natural por ser ensayos significativos según los estudios realizados por diversos autores (de Brito et al., 2016; López-Uceda, Ayuso, Jiménez, et al., 2016).

Tabla 23. Ensayos de control efectuados a los bancos de hormigón

Requisitos		Norma de ensayo	Límite UNE-EN 13198	Medio de evaluación
Características geométricas y superficiales. Dimensiones y apariencia		UNE-EN 13198 (AEN/CTN 127, 2004a)	-	In-situ
Densidad ⁴		UNE-EN 12390-7 (AEN/CTN 83, 2009f)	-	Testigos
Absorción de agua		UNE-EN 13369 (AEN/CTN 127, 2013)	≤ 7,5 % ¹ ≤ 7 % ² ≤ 6 % ³	Testigos
Comportamiento mecánico	Resistencia a compresión	UNE-EN 12390-3 (AEN/CTN 83, 2009d); UNE-EN 12390-3:2009/AC (AEN/CTN 83, 2011a); UNE-EN 12504-1 (AEN/CTN 83, 2009h)	Exento ¹ ≥ 30 MPa ² ≥ 35 MPa ³	Probetas normalizadas/ Testigos
	Módulo elasticidad dinámico ⁴	UNE-EN 14146 (AEN/CTN 22, 2004a)	-	Testigos
Velocidad de carbonatación natural ⁴		-	-	Testigos
Ensayos no destructivos	Índice de rebote	UNE-EN 12504-2 "Ensayos de hormigón en estructuras. Parte 2: Ensayos no destructivos. Determinación - del índice de rebote" (AEN/CTN 83, 2013a)	-	In-situ
	Velocidad de ultrasonidos	UNE-EN 12504-4 (AEN/CTN 83, 2006)	-	In-situ

(-) No existe restricción para este parámetro.

¹ Condición para los productos para uso externo, no sometidos a condiciones de hielo-deshielo;

² Condición para los productos para uso externo, sometidos a condiciones de hielo-deshielo y sin contacto con sales descongelantes;

³ Condición para los productos para uso externo, sometidos a condiciones de hielo-deshielo y en contacto con sales descongelantes;

⁴ Requisito no contemplado en la norma UNE-EN 13198 (AEN/CTN 127, 2004a), ni en la UNE-EN 13369 (AEN/CTN 127, 2013).

La extracción de testigos y los ensayos de control se hicieron por sextuplicado con la finalidad de obtener el valor medio en cada caso, así como su desviación.

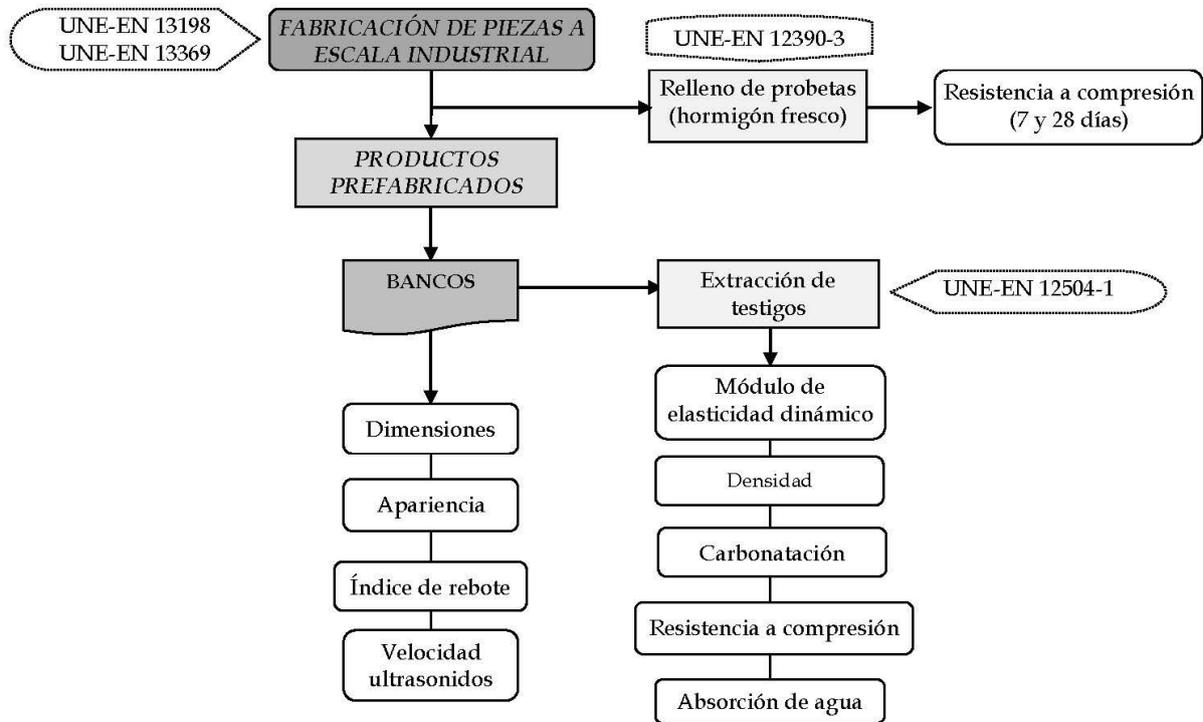


Figura 19. Proceso de seguimiento realizado desde la fabricación hasta el análisis de los prefabricados



4.RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Caracterización de los áridos

El presente apartado tiene por objeto verificar el cumplimiento de las prescripciones relativas a los áridos reciclados para ser utilizados en la elaboración de hormigón no estructural conforme a los requisitos normativos exigibles (Ministerio de Fomento, 2008; AEN/CTN 146, 2009a; CEN/TC 154, 2010), debido fundamentalmente a la heterogeneidad de los mismos y a la importancia que tiene su calidad sobre las propiedades del hormigón. Para ello se han analizado los resultados de los ensayos realizados a éstos y se han comparado con los de los áridos naturales. De la Tabla 24 a la Tabla 28 se recogen los resultados de los ensayos llevados a cabo, clasificados según sus propiedades geométricas (Tabla 24 y Tabla 25), físico-mecánicas (Tabla 26 y Tabla 27) y químicas (Tabla 28), junto con los valores medios obtenidos, su desviación y la categoría asignada por la norma UNE-EN 12620 (AEN/CTN 146, 2009a; CEN/TC 154, 2010), indicada entre paréntesis. En ellas se ha señalado con un asterisco (*) aquellos resultados que no se encuentran dentro de los límites establecidos por la normativa aplicable.

4.1.1. Requisitos geométricos de los áridos

El estudio de las características geométricas de los áridos utilizados se ha centrado en el análisis de su granulometría, así como en la evaluación de los finos, tanto en cantidad como en calidad.



4.1.1.1. Análisis granulométrico

La **granulometría** del árido referida a las fracciones establecidas por su tamaño d/D y designada de acuerdo a la normativa correspondiente (Ministerio de Fomento, 2008; AEN/CTN 146, 2008b) se muestra en la Tabla 24. Se puede observar como ambas fracciones tienen semejante nomenclatura, con la única diferencia de ser de distinta naturaleza, lo que garantizará el buen comportamiento de los hormigones con inclusión de árido reciclado, siempre que su distribución granulométrica también sea similar, debido a la importancia que ésta tiene sobre la trabajabilidad del hormigón.

Tabla 24. Resultados geométricos de los áridos y categoría asignada (EHE-08 y UNE-EN 12620)

Propiedades geométricas		AFR	AGR	AFN	AGN
Granulometría	Designación	AF-0/4-T-R	AG-4/16-T-R	AF-0/4-T-C	AG-4/16-T-C
	Distribución granulométrica	Continua (G_{F85})	Continua ($G_{C90/15}$)	Continua (G_{F85})	Continua ($G_{C90/15}$)
Evaluación de los finos	Contenido de finos (< 0,063mm) (%)	2,10 ± 0,18 (f_3)	0,30 ± 0,03 ($f_{1,5}$)	0,50 ± 0,002 (f_3)	0,09 ± 0,001 ($f_{1,5}$)
	Contenido de arena (< 4mm) (%) ¹	-	6,65 ± 0,84*	-	-
	Desclasificados inferiores (%) ¹	-	6,65 ± 0,84	-	-
	Equivalente de arena	100 ± 2 (SE_{65})	-	70 ± 1 (SE_{65})	-

¹ Sin asignación de categoría porque esta característica no es exigible en la norma UNE-EN 12620

(-) Ensayo no realizado por no ser obligatorio

(*) Valor fuera de los límites establecidos

Los resultados de la distribución granulométrica de los áridos estudiados, en referencia a los requisitos generales fijados al árido en forma de límites granulométricos, se muestran en la Tabla 25. En ella se recoge el porcentaje que pasa por los tamices $2D$, $1,4D$, D , d y $d/2$ de los diferentes materiales ensayados y la categoría asignada al árido, además del límite y el porcentaje que pasa por el tamiz intermedio para los áridos gruesos ($D/2$), junto con su categoría correspondiente. Según dichos límites se comprueba que tres de las cuatro muestras analizadas incumplen, al menos, uno de los requisitos establecidos, concretamente el debido al tamaño máximo (D), con un porcentaje ligeramente superior al límite indicado, de 99% (AFN, AFR y AGN). No obstante, tal y como indica la normativa (Ministerio de Fomento, 2008; AEN/CTN 146, 2009a; CEN/TC 154, 2010), dicho porcentaje podrá ser superior al 99%, siempre que el suministrador documente y declare la granulometría característica de los mismos

(incluyendo todos los tamices de la serie básica 1 o de la serie básica más la serie 2), con lo cual se le asigna la categoría $G_{C90/15}$ a los áridos gruesos (AGN y AGR) y la G_{F85} a los finos (AFN y AFR). En cuanto al tamiz de tamaño intermedio, la granulometría correspondiente a los áridos gruesos queda dentro de los límites 20-70, incluida la tolerancia de $\pm 17,5$ sobre dichos límites, asignándole por ello la categoría $G_{20/17,5}$ a estos áridos.

Tabla 25. Requisitos granulométricos de los áridos y resultados (EHE-08 y UNE-EN 12620)

Tamaño árido d/D mm		AFR	AGR	AFN	AGN	
		0/4	4/16	0/4	4/16	
		$D \leq 4$ y $d=0$	$D \leq 11,2$ y $D/d > 2$	$D \leq 4$ y $d=0$	$D \leq 11,2$ y $D/d > 2$	
Porcentaje que pasa (en masa)	2D	Límite	100	100	100	100
		Valor	100 \pm 0,00	100 \pm 0,00	100	100
	1,4D	Límite	95-100	98-100	95-100	98-100
		Valor	99,98 \pm 0,01	100 \pm 0,00	100	100
	D	Límite	85-99	90-99	85-99	90-99
		Valor	99,97 \pm 0,05*	96,82 \pm 1,55	99,85*	100*
	D/2**	Límite	-	20-70	-	20-70
		Valor	-	57,92 \pm 4,00	-	57,38
	d	Límite	-	0-15	-	0-15
		Valor	-	6,65 \pm 0,84	4,14	-
	d/2	Límite	-	0-5	-	0-5
		Valor	-	3,35 \pm 0,57	-	1,85
	Categoría asignada		G_{F85}^*	$G_{C90/15}$ $G_{20/17,5}^{**}$	G_{F85}^*	$G_{C90/15}^*$ $G_{20/17,5}^{**}$

(-) Ensayo no realizado o sin restricción para este parámetro

(*) Valor fuera de los límites establecidos

(**) Límites generales del tamiz intermedio para los áridos gruesos y categoría asignada (CEN/TC 154, 2010)

En la Figura 20 se representan las curvas granulométricas de los áridos estudiados, las cuales reflejan la distribución por tamaños de las partículas elementales que componen un árido determinado según su tamaño d/D . Se puede observar que, en todos los casos, se trata de curvas continuas acordes a áridos que proporcionan un buen acoplamiento de sus granos y un mínimo de huecos posible entre ellos. Este hecho permite una mayor capacidad de interacción entre sus partículas, además de aportar mayor grado de compacidad al conjunto y, por tanto, una mayor resistencia mecánica y durabilidad al hormigón fabricado con ellos (González-Fonteboa y Martínez-Abella, 2005; Tam et al., 2008).

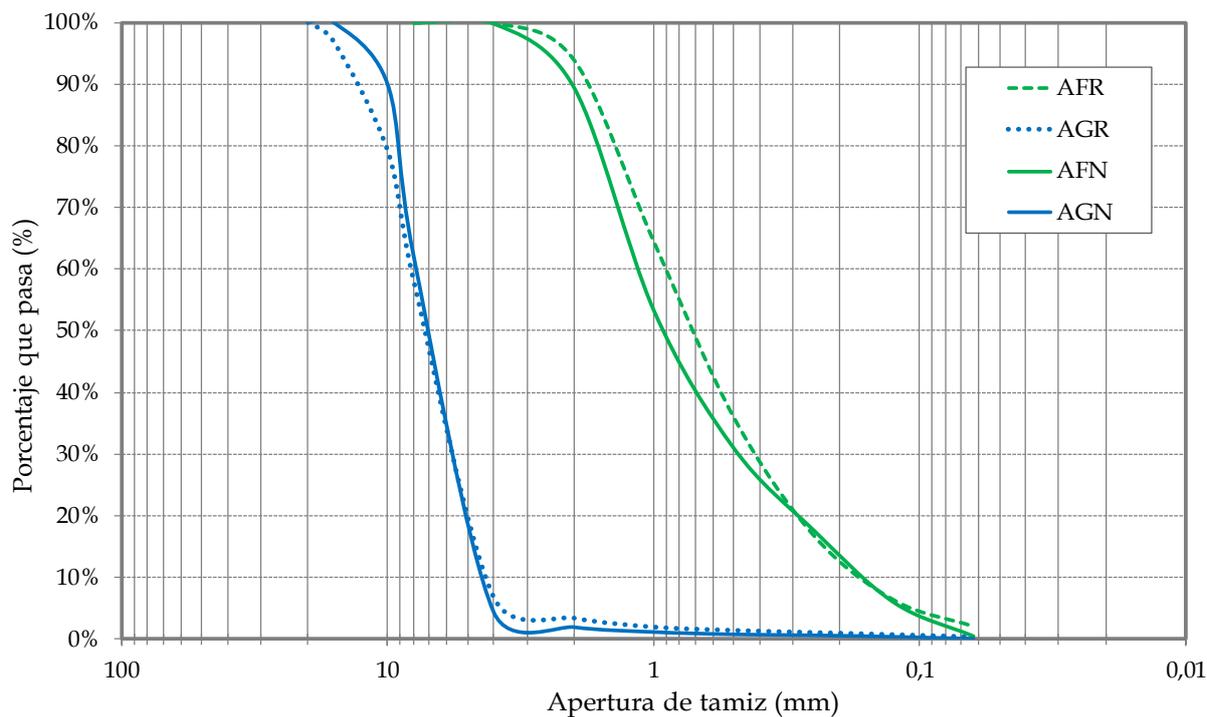


Figura 20. Distribución granulométrica de todos los áridos estudiados

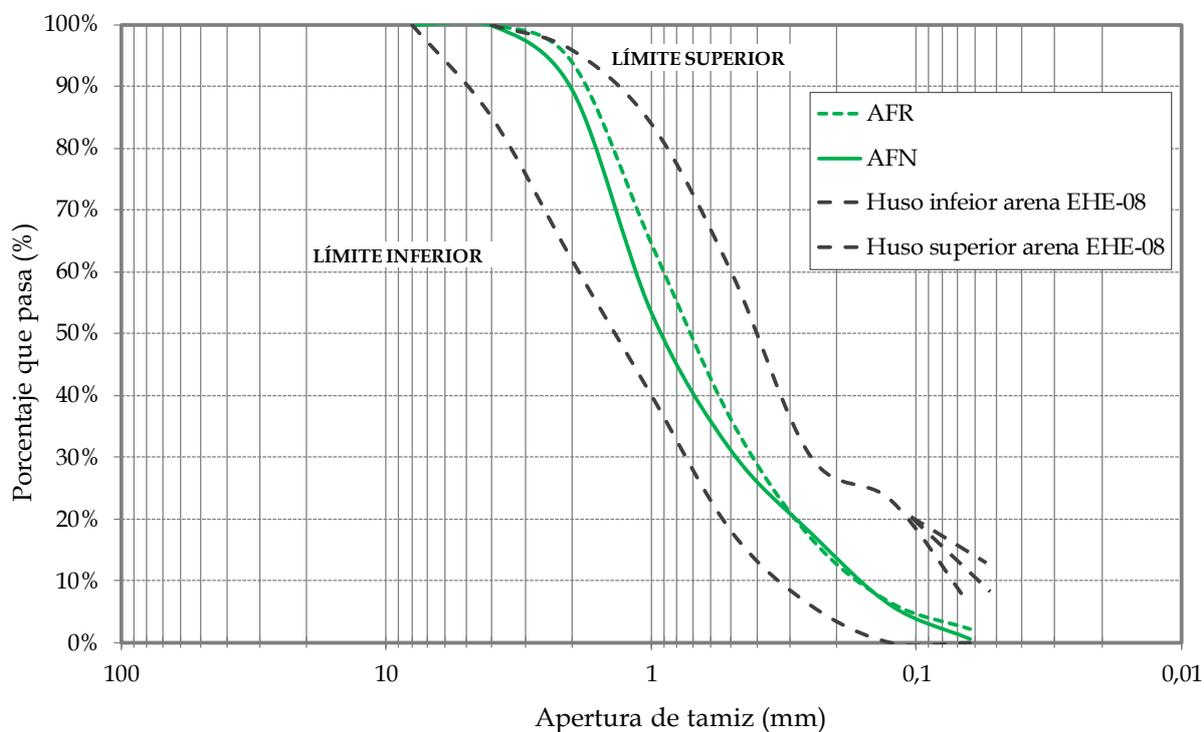


Figura 21. Huso granulométrico de la arena según la EHE-08 y curvas de los áridos finos ensayados

Por otro lado, para evaluar la composición granulométrica de los materiales granulares se ha comparado la distribución de sus tamaños con husos de referencia, que en el caso

de los áridos reciclados, puede variar dependiendo del tipo de trituración y tamizado realizado en el proceso de reciclaje, aunque de acuerdo a los estudios consultados éstas también pueden ser modificadas mediante pequeños ajustes de la apertura de las trituradoras (Martínez-Lage et al., 2006; Haro Mancera, 2009).

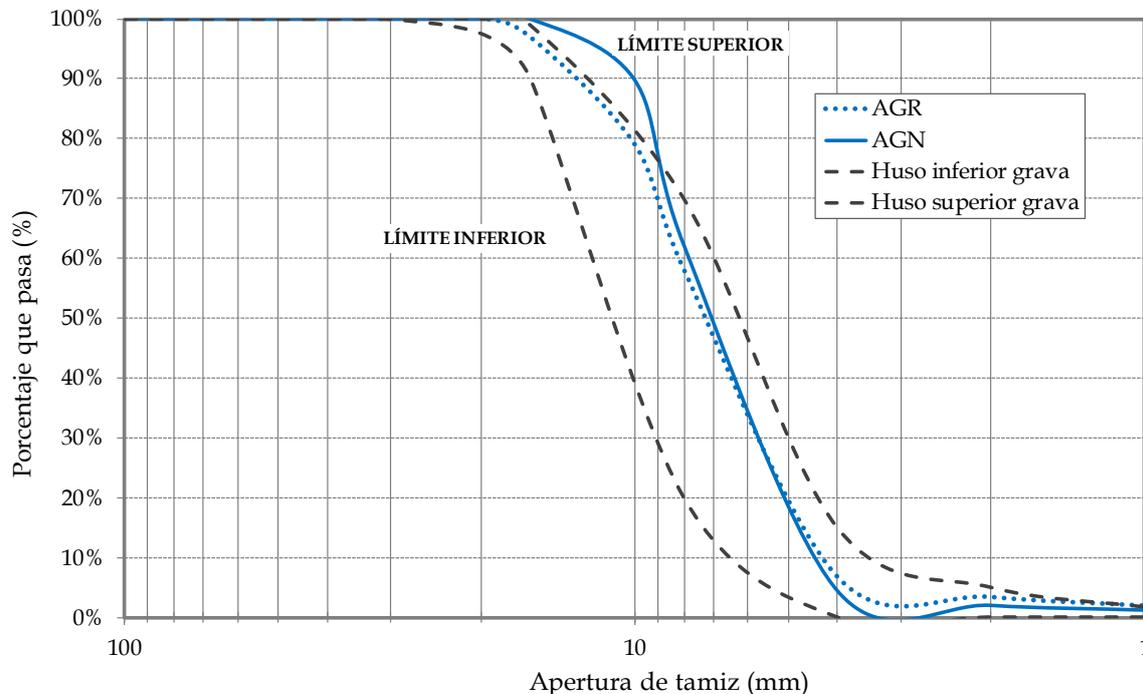


Figura 22. Huso granulométrico para la grava según lo recogido en la normativa (EHE-08 y UNE-EN 12620) y distribución por tamaños de los áridos gruesos analizados

Los áridos finos se han estudiado con respecto al criterio establecido para las arenas (Ministerio de Fomento, 2008), representado en la Figura 21, y la distribución de los áridos gruesos se ha contrastado con los requisitos generales granulométricos de la grava (Tabla 25 y Figura 22). Se observa que los áridos finos, AFR y AFN, dibujan curvas granulométricas encuadradas dentro del huso definido en la Figura 21, lo que significa que el comportamiento obtenido es bastante favorable para que éstos puedan utilizarse en la fabricación de hormigón, dada la importancia que tienen las arenas en este material (Martín-Morales, Sánchez-Roldán, et al., 2013).

En cuanto a la distribución por tamaños de los áridos gruesos, la muestra reciclada posee una curva que se ajusta de forma adecuada al huso de referencia; no ocurre así con la grava natural, la cual no está completamente dentro de los límites recomendados (Figura 22), debido a que parte de las partículas mayores a 9 mm



quedan por encima del límite superior, lo que indica que hay un exceso de granos en esos tamaños, tal y como se ha visto anteriormente (Tabla 25). Se puede concluir, por tanto, que las granulometrías de los áridos reciclados utilizados en este estudio se sitúan dentro de los husos que marcan las diferentes recomendaciones, tanto para el árido fino como para el grueso.

4.1.1.2. Evaluación de los finos

El contenido de **partículas que pasan por el tamiz 0,063 mm** de los áridos reciclados muestra valores superiores al de los áridos naturales (0,09% para AGN y 0,50% para AFN), comprendidos entre un 0,30% (AGR) y un 2,10% (AFR) de acuerdo a lo presentado en la Tabla 24, aunque éstos están por debajo de los límites establecidos por la normativa, en función del tipo de árido y del ambiente de exposición (Tabla 13). Si se comparan estos datos con los publicados en la literatura consultada se denota que las muestras recicladas presentan mejores resultados que los contemplados por otros autores, con porcentajes que oscilan entre el 0,20% (González-Fonteboa y Martínez-Abella, 2005) y el 1,10% para los gruesos reciclados (Martín-Morales, Sánchez-Roldán, et al., 2013); los valores más desfavorables se encuentran en los áridos finos reciclados, dentro del intervalo comprendido entre el 1,18% y el 10,40% (Dapena et al., 2011; Lima y Leite, 2012). Teniendo en cuenta los valores obtenidos a las arenas se les asigna categoría f_3 , ya que presentan un porcentaje de finos inferior al 3%; por otro lado, a las gravas se les asigna la categoría $f_{1,5}$, correspondiente a un contenido menor al 1,5%. El mayor porcentaje de estas partículas en los áridos reciclados respecto de los naturales se debe al desprendimiento del mortero de cemento durante la manipulación del árido.

Los áridos evaluados, sin embargo, no aportan gran cantidad de partículas finas en sus diferentes fracciones, las cuales puedan afectar perjudicialmente al hormigón. De hecho pequeñas cantidades de finos pueden llegar a ser beneficiosas para la trabajabilidad y permeabilidad del hormigón, aunque un gran contenido de polvo, arcilla o finos procedentes del mortero adherido, de tamaño inferior al del propio cemento, impediría una buena adherencia entre el árido y la pasta de cemento, propiciando la fisuración del hormigón y con ello, el descenso de las resistencias y de

la durabilidad, además de exigir mayor cantidad de agua de amasado (Zaragoza Bernal, 2000; Bustillo Revuelta, 2010; Fernández Cánovas, 2013).

Los **desclasificados inferiores** y el contenido de **partículas que pasan por el tamiz 4 mm**, únicamente limitados al árido grueso reciclado por el Anejo 15 (Ministerio de Fomento, 2008), se presentan en la Tabla 24, observándose que el resultado obtenido en ambos parámetros es del 6,65%. Dicho valor no cumple con las especificaciones en cuanto al porcentaje en masa de partículas inferiores a 4 mm (5%), aunque sí satisface la limitación del 10% en desclasificados inferiores, evitando con ello el efecto negativo que un mayor contenido de estas partículas pueda ocasionar en las propiedades del hormigón, ya que éstas se generan después del tamizado de los áridos reciclados, provocado por la mayor friabilidad de este tipo de árido.

Consideraciones similares se recogen en los estudios bibliográficos consultados (Sánchez de Juan, 2004; Martínez-Lage et al., 2006), entre los cuales se han obtenido valores en el contenido de estos parámetros que varían entre un mínimo del 1,18% (Martín-Morales, Sánchez-Roldán, et al., 2013) y un máximo del 7,50% (Sánchez de Juan, 2004) para la fracción 4/16 mm del árido reciclado. No obstante, el estudio realizado por López-Gayarre (López Gayarre, 2008) ha demostrado que un mayor porcentaje de desclasificados del árido reciclado (0%, 5% y 10%) no influye en las propiedades del hormigón fabricado con este árido.

La **calidad de los finos** en los áridos, evaluada sobre la fracción 0/4 mm de la arena mediante el índice de equivalente de arena, muestra que el material reciclado tiene un valor superior (100) al obtenido en el árido fino natural (70) según los valores recogidos en la Tabla 24. Estos datos pueden compararse con los de áridos de naturaleza caliza cuya arena tiene poca arcilla y un grado de limpieza admisible, que producen un hormigón de calidad normal sin temor de retracción (Gorisse, 1981; Valverde-Espinosa, 1992).

Los valores habituales que han mostrado otros autores para el árido reciclado se sitúan dentro del intervalo comprendido entre 64,75 (González-Fonteboa y Martínez-Abella, 2005) y 93,60 (Gómez-Soberón, 2002), aunque en algunos casos el incumplimiento en esta propiedad está relacionado directamente con su mayor contenido de finos y no con su procedencia arcillosa (CEDEX et al., 2014). Los resultados obtenidos se sitúan,



en el caso del árido AFR, por encima del límite establecido por la Instrucción EHE-08 para obras sometidas a cualquier clase específica de exposición (75) y el árido AFN presenta un valor adecuado para áridos utilizados en un ambiente general de exposición (I, IIa o IIb) y que no estén sometidas a ninguna clase específica (70). Según esto, a ambos materiales granulares se les asigna la categoría SE_{65} para la calidad de los finos, correspondiente a un valor superior a 65 (CEN/TC 154, 2010), y el mayor valor obtenido en el árido reciclado (AFR) tan sólo indica que los finos presentes en este árido son de mejor calidad que los del natural (AFN). Además, de acuerdo con la evaluación de los finos establecida por la normativa de áridos para hormigón (AEN/CTN 146, 2009a; CEN/TC 154, 2010), los finos procedentes tanto del árido reciclado como del natural pueden considerarse no nocivos, ya que ambos áridos presentan un porcentaje en partículas que pasan por el tamiz 0,063 mm inferior al 3% (2,10% y 0,50%, respectivamente), por lo que no existe riesgo de disminución de adherencia entre la pasta de cemento y el árido grueso.

4.1.2. Requisitos físico-mecánicos de los áridos

Las características físico-mecánicas de los áridos reciclados depende, en gran parte, de sus componentes (Angulo et al., 2010; Agrela et al., 2011; Medina et al., 2015). Por ello se han evaluado diferenciándose entre la composición de los áridos reciclados (Tabla 26), la resistencia a la fragmentación del árido grueso, la densidad y la absorción de agua (Tabla 27).

4.1.2.1. Composición de los áridos gruesos reciclados

La bibliografía consultada recoge la utilización de áridos reciclados de composición muy variable en la fabricación de hormigón no estructural, aunque claramente diferenciados por residuos procedentes principalmente de hormigón y piedra natural, en torno al 90% de $R_c + R_u$ (Poon et al., 2002; López Gayarre et al., 2013; Rodríguez et al., 2016), o de materiales cerámicos, con un valor de R_b superior al 30% (Soutsos et al., 2011a; Xiao et al., 2011; Jankovic et al., 2012; Juan-Valdés et al., 2018) o, incluso, de residuos mixtos, con un contenido de R_b entre el 10% y el 30% (Sousa et al., 2003; Mas, Cladera, Bestard, et al., 2012; López Gayarre et al., 2013).

La Tabla 26 recoge los resultados relativos a la clasificación de los componentes de los áridos gruesos reciclados utilizados en este estudio, en la que se observa que el árido grueso reciclado está formado mayoritariamente de hormigón (89%), junto con un menor porcentaje en peso de piedra natural (9,1%) y una pequeña cantidad de asfalto (1,8%), entre otros componentes minoritarios. Con base en los valores obtenidos, y conforme a las indicaciones del Anejo 15 (Ministerio de Fomento, 2008), este árido puede considerarse de calidad aceptable, salvo por la presencia de material bituminoso (<1%).

En relación con la asignación de categoría (AEN/CTN 146, 2009a; CEN/TC 154, 2010), los resultados obtenidos indican que el material reciclado estudiado se categoriza como Árido Reciclado de Hormigón (ARH) de acuerdo a lo recomendado por el proyecto Gear (GERD, 2012), cuya clase se asigna por contener más de un 90% en masa de materiales a base de cemento Portland y piedra natural (R_{cu95}), menos del 10% de cerámicos (R_{b10-}), un máximo del 5% en asfalto (R_{a5-}) y un porcentaje inferior al 1% en otros materiales ($XR_{g0.5-}$).

La incorporación de ciertos constituyentes en el árido reciclado, como es el asfalto, podría influir negativamente en las propiedades del hormigón, principalmente en el descenso de su resistencia (López Gayarre et al., 2013; Rodríguez et al., 2016), aunque el bajo contenido de material cerámico (0,2%) daría lugar a una menor absorción de agua, tanto en el árido como en el hormigón fabricado con éste (Agrela et al., 2011; Bravo et al., 2015b) y, por consiguiente, garantizaría la obtención de unas resistencias adecuadas (Poon et al., 2002) e, incluso, un buen comportamiento frente al hielo-deshielo (Anejo 15, EHE-08, 2008).

Tabla 26. Resultados de la clasificación de los componentes de los áridos gruesos reciclados (UNE-EN 12620)

Componentes del AGR	R_c	R_u	$R_c + R_u$	R_g	R_b	R_a	X	$X + R_g$	FL^{**}
Porcentaje en masa (%)	89 ± 3	$9,1 \pm 0,9$	98 ± 4	$0,0 \pm 0,0$	$0,2 \pm 0,0$	$1,8 \pm 0,2^*$	$0,1 \pm 0,0$	$0,1 \pm 0,0$	$0,0 \pm 0,0$
Categoría asignada	R_{c80}	-	R_{cu95}	R_{g2-}	R_{b10-}	R_{a5-}	X_{1-}	$XR_{g0.5-}$	$FL_{0,2-}$

(-) Ensayo no realizado por no ser obligatorio; (*) Valor fuera de los límites establecidos; (**) Material flotante, su contenido se mide en cm^3/kg

4.1.2.2. Densidad de partículas

Los resultados del ensayo de densidad tras secado en estufa de los materiales granulares evaluados (Tabla 27) muestran valores inferiores en el caso de los áridos reciclados frente a los de los naturales. Igualmente, se observa que la densidad se reduce al hacerlo el tamaño del árido, con valores de 2,54 kg/dm³ para el AGR frente a 2,26 kg/dm³ del AFR en los materiales reciclados y de 2,72 kg/dm³ (AGN) a 2,61 kg/dm³ (AFN) en los naturales; no obstante los valores obtenidos son, en todos los casos, superiores al requisito mínimo fijado a los áridos utilizables en la elaboración de hormigón, establecido en 2,00 kg/dm³ (AEN/CTN 146, 2009a; CEN/TC 154, 2010). Las diferencias observadas se deben a la menor densidad de las partículas del mortero que frecuentemente van adheridas a la superficie del árido grueso original y, en mayor medida, en la fracción fina de este árido (Martín-Morales, 2013).

Tabla 27. Resultados de los ensayos físico-mecánicos realizados a los áridos (EHE-08 y UNE-EN 12620)

Propiedades físico-mecánicas	AFR	AGR	AFN	AGN	
Densidad de partículas tras secado en estufa (kg/dm ³) ¹	2,26 ± 0,12	2,54 ± 0,02	2,61 ± 0,04	2,72 ± 0,06	
Resistencia a la fragmentación. Ensayo de los Ángeles	-	34 ± 2 (LA ₃₅)	-	31 ± 1 (LA ₃₅)	
Absorción de agua	WA _{24h} (%) ¹	5,2 ± 0,41	2,1 ± 0,11	1,0 ± 0,10	0,4 ± 0,05
	WA _{10min} (%) ¹	4,4 ± 0,25	1,7 ± 0,08	-	-

¹ Sin asignación de categoría porque esta característica no es exigible en la norma UNE-EN 12620; (-) Ensayo no realizado por no ser obligatorio

Los valores obtenidos están dentro de los recogidos en otros estudios y que, en el caso del árido grueso reciclado, oscilan entre 1,93 kg/dm³ (Bravo et al., 2015b) y 2,37 Kg/dm³ (Faella et al., 2016), mientras que en la arena reciclada varían entre 1,91 kg/dm³ (Evangelista y de Brito, 2010) y 2,30 kg/dm³ (Cartuxo et al., 2015). Esta dispersión de valores depende en gran medida de la composición del árido reciclado, ya que refleja la menor densidad de los materiales cerámicos, del asfalto o del mortero, así como de la técnica de procesamiento utilizada y de la calidad del hormigón original (Bustillo Revuelta, 2010; Verian et al., 2018).

4.1.2.3. Resistencia a la fragmentación

Teniendo en cuenta que el comportamiento mecánico de los áridos reciclados influye decisivamente en la resistencia mecánica del hormigón endurecido y en su durabilidad, un elevado coeficiente de desgaste de la grava indicaría la mala calidad de éste, ya que bajo esfuerzos físicos o abrasión, el desgaste y rotura de los granos es mayor (Zaragoza Bernal, 2000; Gómez et al., 2001). Los valores obtenidos de resistencia a la fragmentación del árido grueso, medida a través del coeficiente de desgaste de Los Ángeles sobre los áridos gruesos (Tabla 27), muestran que el árido grueso reciclado presenta un valor ligeramente superior al del árido natural (31), aunque se encuentra dentro del intervalo de los valores publicados por otros estudios y que oscilan entre un coeficiente mínimo de 28 (Martín-Morales et al., 2011) y uno máximo de 52 (Bravo et al., 2015b; Ait Mohamed Amer et al., 2016).

Este hecho se debe a que durante la manipulación del árido reciclado se desprende parte del mortero que queda adherido a su superficie, provocado por ser un material más blando y por la presencia de partículas que se agrietaron durante el proceso de trituración, hecho que repercute en la correspondiente pérdida de peso del árido original, en el aumento considerable en el contenido de finos, además de en la necesidad de aumentar la cantidad de agua de amasado (Domingo Cabo et al., 2009; Bustillo Revuelta, 2010). A pesar de ello, el árido reciclado cumple con la limitación de la Instrucción (Ministerio de Fomento, 2008), con valores inferiores al máximo permitido (40), lo que le permite tener la misma categoría que la asignada al natural, de LA_{35} , según las exigencias de la norma UNE-EN 12620 (AEN/CTN 146, 2009a; CEN/TC 154, 2010).

4.1.2.4. Absorción de agua

La tasa de absorción de agua del árido reciclado depende principalmente de su tipología (Bravo et al., 2015b; Abdulla, 2015; López-Uceda, Ayuso, López, et al., 2016). En el caso de áridos reciclados procedentes de hormigón los coeficientes que han obtenido otros autores varían entre el 6,2% (Abdulla, 2015) y el 12,2% (Faella et al., 2016) para la fracción gruesa y entre el 7,9% (Cartuxo et al., 2015) y el 13,9% (Evangelista y de Brito, 2010) para la fina. En el caso de áridos de origen cerámico los



valores de absorción son más elevados, llegando incluso al 24% (Abdulla, 2015). Los datos obtenidos de la absorción de agua para los áridos incluidos en este estudio (Tabla 27) muestran que los materiales reciclados tienen un porcentaje de absorción a las 24 horas que oscilan entre el 5,2% (AFR) y 2,1% (AGR).

Estos valores son inferiores a los reportados en la bibliografía, debido principalmente al menor contenido de material cerámico que presentan los áridos reciclados utilizados (0,2%). Si se comparan los resultados obtenidos con los del árido natural (1,0% para AFN y 0,7% para AGN) se observa un incremento significado de este parámetro, entre 3 y 5 veces el valor de la fracción natural (AFR y AGR, respectivamente); a pesar de ello, la absorción de agua de dichos áridos cumplen con el límite del 5% recogido en el Anejo 15, del mismo modo que lo hace el natural según lo especificado en el Artículo 28 (Ministerio de Fomento, 2008).

Finalmente, si se analizan los resultados del ensayo de absorción a los 10 minutos se observa que durante este corto periodo de tiempo los áridos reciclados absorben en torno al 80% del total del agua absorbida en las 24 horas de inmersión (Tabla 27). Los valores obtenidos hacen pensar que un tratamiento de premojado de los áridos reciclados, antes de su mezcla con el resto de componentes del hormigón, evitaría que estos áridos resten agua de amasado al cemento y, por consiguiente, se alcance una mayor adherencia entre los componentes del hormigón, asegurándose una adecuada trabajabilidad y resistencia en los hormigones a fabricar (Sagoe-Crentsil et al., 2001; Etxeberria, Marí, et al., 2007; Cabral et al., 2010; Sánchez Rodríguez, 2011; Seara-Paz et al., 2016).

4.1.3. Requisitos químicos de los áridos

En la Tabla 28 se presentan los resultados de la composición química de los áridos objeto de estudio, distinguiéndose entre cloruros, sulfatos, contaminantes orgánicos y partículas ligeras. En ella se puede observar que el árido reciclado cumple con todos los requisitos químicos establecidos por la normativa (Ministerio de Fomento, 2008; AEN/CTN 146, 2009a).

4.1.3.1. Contenido en cloruros

El análisis de los valores obtenidos en cuanto al contenido en **cloruros solubles en agua** en los materiales granulares ensayados (Tabla 28) muestra valores que oscilan entre el 0,014% y el 0,021% para los reciclados (AGR y AFR, respectivamente). Estos resultados son similares a los publicados en otros estudios, con porcentajes que varían entre un mínimo de 0,001% (Sánchez de Juan, 2004) y un máximo de 0,025% (Mas, Cladera, Olmo, et al., 2012) en áridos procedentes de residuos de hormigón de tamaño 0/8 mm, y entre el 0,003% (Sánchez de Juan, 2004) y el 0,014% (Martín-Morales, 2013) para fracciones superiores del mismo tipo de árido.

Si se comparan los datos obtenidos en el árido reciclado con los del natural, que oscilaron entre el 0,001% y el 0,008% (AFN y AGN, respectivamente), se observa un incremento en los valores de este parámetro químico, aunque éstos son muy bajos y se consideran prácticamente inapreciables por encontrarse muy por debajo del límite establecido por la Instrucción para hormigón en masa que contenga armaduras para reducir la fisuración (<0,15%). Estos resultados indican que los áridos reciclados no han estado expuestos a determinados ambientes cargados de cloruros, ni proceden de residuos de construcción y demolición en los que se hayan empleado determinados tipos de aditivos, con lo cual el riesgo de oxidación sería poco probable.

Tabla 28. Resultados ensayos químicos realizados a los áridos

Propiedades químicas	AFR	AGR	AFN	AGN
Contenido en cloruros solubles en agua (%) ¹	0,021 ± 0,005	0,014 ± 0,001	0,001 ± 0,001	0,008 ± 0,003
Contenido de cloruros solubles en ácido AR (%) ¹	0,014 ± 0,003	0,012 ± 0,004	-	-
Contenido en sulfatos solubles en agua de los AR (%)	0,53 ± 0,09 (SS _{0,7})	0,48 ± 0,12 (SS _{0,7})	-	-
Contenido en sulfatos solubles en ácido (%)	0,54 ± 0,10 (AS _{0,8})	0,43 ± 0,11 (AS _{0,8})	0,04 ± 0,01 (AS _{0,2})	0,10 ± 0,03 (AS _{0,2})
Contenido total en azufre (%)	0,63 ± 0,13 (S _i)	0,63 ± 0,09 (S _i)	0,10 ± 0,02 (S _i)	0,50 ± 0,04 (S _i)
Materia orgánica	No contiene	No contiene	No contiene	No contiene
Partículas ligeras (%)	0,0	0,0	0,0	0,0

¹ Sin asignación de categoría porque esta característica no es exigible en la norma UNE-EN 12620.

(-) Ensayo no realizado



El porcentaje de **cloruros solubles en ácido** obtenido en los áridos reciclados, entendiéndose como aquellos que no dependen del contacto directo con el agua salada, sino que son cloruros combinados, es del 0,014% para la fracción fina y del 0,012% para la gruesa. Dado que no existe regulación española que limite esta propiedad, estos datos solo pueden compararse con los publicados por otros autores y que se encuentran en un rango que oscila entre el 0,001% (Sánchez de Juan, 2004) y el 0,08% (Paine y Dhir, 2010) para áridos gruesos reciclados procedentes de hormigón; los valores más altos que se han publicado corresponden a áridos sometidos a ambiente marino, con un contenido en iones cloruro del 0,2% (Dhir y Paine, 2003).

En este sentido, se observa que los valores obtenidos se encuentran en el intervalo más bajo referenciado y son menores que los de los cloruros solubles en agua. Esto indica que el cemento hidratado de estos áridos no contenía cloruro que pudiera unirse para formar cloroaluminato de calcio, que en ciertas circunstancias puedan ser reactivos y atacar a las armaduras; además de que estos áridos no proceden de obras marítimas, puentes o pavimentos expuestos a las sales para el deshielo, ni tampoco de hormigones en los que se hayan utilizado aditivos acelerantes (Bustillo Revuelta, 2010).

4.1.3.2. Contenido en sulfatos

De acuerdo a los datos publicados, los **sulfatos solubles en agua** en los áridos reciclados compuestos mayoritariamente de hormigón han presentado un contenido que varía entre el 0,13% (Mas, Cladera, Olmo, et al., 2012) y el 1,52% (Martín-Morales et al., 2011) para la fracción fina, mientras que en la fracción gruesa entre el 0,30% (Barbudo, Agrela, et al., 2012) y el 0,53% (Martín-Morales, 2013).

Desde el punto de vista del cumplimiento normativo, este parámetro químico no está limitado expresamente por la Instrucción española (Ministerio de Fomento, 2008); pero si tenemos en cuenta la norma europea (AEN/CTN 146, 2009a; CEN/TC 154, 2010), al valor obtenido en los áridos reciclados estudiados le corresponde la categoría $SS_{0,7}$, tanto para el árido fino reciclado como para el grueso, por presentar un porcentaje en sulfatos solubles en agua inferior al 0,7%, concretamente del 0,53% (AFR) y del 0,48% (AGR).

En cuanto al contenido en **sulfatos solubles en ácido**, los estudios relacionados con

esta temática han obtenido un contenido en iones sulfato en áridos reciclados procedentes de hormigón que oscila entre un 0,1% (Sánchez de Juan y Alaejos Gutiérrez, 2005) y un 0,25% (Agrela et al., 2011); en el caso en el que el árido reciclado proceda de escombros triturados los valores medios publicados son más altos, entre el 2,9% (Martín-Morales, 2013) y el 6,2% (Barbudo, Agrela, et al., 2012), debido al yeso procedente de estucos, enlucidos o paneles de yeso laminado. El valor obtenido en los áridos reciclados estudiados oscila entre el 0,43% para la fracción fina y el 0,54% para la gruesa (Tabla 28) y son superiores al proporcionado en los áridos naturales (0,04% para AFN y 0,10% para AGN), aunque cumplen con el límite del 0,8% establecido por la normativa (Tabla 16).

La categoría asignada, en este caso, para ambos tipos de áridos es de $AS_{0,2}$ para la fracción 0/4 mm y de $AS_{0,8}$ para la 4/16 mm, por presentar valores inferiores al 0,2% y al 0,8%, respectivamente. Los resultados obtenidos indican que dichos áridos no presentan sulfatos combinados que puedan dar problemas en el nuevo hormigón, como el hinchamiento causado por la formación de etringita y su consecuente efecto en la durabilidad (GERD, 2012).

4.1.3.3. Contenido en compuestos de azufre

El valor de los compuestos totales de azufre medidos en las muestras de árido reciclado (Tabla 28) fue del 0,63% (AFR y AGR), frente al 0,10% (AFN) y al 0,50% (AGN) de los áridos naturales. Estos valores fueron inferiores al 1% establecido en la normativa (Ministerio de Fomento, 2008), correspondiéndole la categoría S_1 por tener menos del 1% en esta propiedad del árido (AEN/CTN 146, 2009a; CEN/TC 154, 2010). En consecuencia, no existe riesgo de presencia de pequeñas partículas de yeso que pueda reaccionar con los productos de hidratación del cemento, ni tampoco de sulfuros oxidables, los cuales puedan producir en el hormigón expansiones, hinchamiento y fisuración.

Los valores obtenidos se encontraban en el rango de los publicados en otros estudios, en los que el contenido de azufre total en residuos de hormigón estaba comprendido entre el 0,34% (Sánchez de Juan y Alaejos Gutiérrez, 2005) y 0,8% (Vegas et al., 2008; Jiménez et al., 2011). Otros autores han obtenido porcentajes más altos que han



alcanzado valores máximos de 2,46% (Vegas et al., 2008), incluso del 6% (Jiménez et al., 2011), debido a la presencia de yeso en áridos reciclados mixtos (1,2-1,5%).

4.1.3.4. Contenido en materia orgánica y partículas ligeras

El contenido en **materia orgánica** podría producir retardos en el fraguado del cemento llegando incluso a paralizarlo, perjudicando decisivamente a la resistencia y la durabilidad del hormigón fabricado con ellos (Valverde-Espinosa, 1992; Zaragoza Bernal, 2000; Martínez-Lage et al., 2006). De acuerdo con esto se establece la idoneidad de estos áridos en base a la comparación de color de la disolución respecto al color de la sustancia patrón conforme a lo indicado en la Instrucción (Ministerio de Fomento, 2008). En todas las muestras estudiadas, la presencia de materia orgánica obtenida mediante la determinación de contenido en humus, muestra un resultado cualitativo negativo (Tabla 28).

En este sentido, la ausencia de materia orgánica suele ser habitual en este tipo de materiales granulares según lo publicado en la literatura consultada (Sánchez de Juan, 2004; Vegas et al., 2008; Martín-Morales et al., 2011) y más, en este caso en particular, por el bajo contenido de asfalto que han presentado los áridos reciclados, ya que un parámetro crítico de este componente es la presencia de materia orgánica derivada de los compuestos orgánicos volátiles que contiene el material bituminoso (GERD, 2012).

Finalmente, no se han encontrado **partículas ligeras** que flotan en un líquido de peso específico 2,00 kg/dm³ (Tabla 28), cumpliendo por tanto con el requisito establecido por la Instrucción (Ministerio de Fomento, 2008). Este resultado indica que estos áridos se consideran libres de sustancias, tales como lignito o carbón, que puedan producir manchas o ampollas en la superficie del hormigón.

4.1.4. Consideraciones de la caracterización de los áridos

Las propiedades medidas en el material reciclado seleccionado para este estudio muestran diferencias en comparación con las del árido natural, especialmente en el caso de su composición como consecuencia de la presencia de material bituminoso en el primero, con un valor ligeramente más alto que el permitido por la Instrucción (Ministerio de Fomento, 2008). No obstante, el bajo contenido de material cerámico y

la ausencia de materia orgánica garantizaría su uso en la elaboración de hormigón no estructural con unas resistencias adecuadas.

En el caso de las características geométricas, el árido reciclado presentó una granulometría favorable para utilizarse en la fabricación de hormigón, además de ser adecuados la cantidad y calidad de los finos presentes en este tipo de árido, aun cuando éste mostró un contenido de partículas inferiores a 4 mm ligeramente superior que el admitido por la EHE-08. Del análisis de las propiedades físico-mecánicas se ha concluido que la densidad, la resistencia a la fragmentación y la absorción del árido reciclado se vieron afectadas por el mortero adherido a su superficie, aunque los resultados obtenidos cumplieron en todos los casos con los requisitos normativos correspondientes. Finalmente, desde el punto de vista químico los resultados obtenidos han puesto de manifiesto que no existe riesgo de deterioro del hormigón, por rotura o fisuración del mismo, ni por corrosión de las armaduras, entre otros efectos perjudiciales.

Se concluye que el comportamiento del árido reciclado puede ser similar y comparable con el del natural, además de cumplir de forma general con las limitaciones geométricas, físico-mecánicas y químicas establecidas por la normativa aplicable (Ministerio de Fomento, 2008; AEN/CTN 146, 2009a; CEN/TC 154, 2010). Consecuentemente es viable para su incorporación para la fabricación de hormigones no estructurales en este estudio.

4.2. Estudios de dosificación del hormigón para la obtención de piezas para mobiliario urbano

La dosificación de los componentes de un hormigón con árido reciclado tiene mayor incidencia en sus propiedades frescas y endurecidas que la de uno fabricado con áridos tradicionales, debido principalmente a la naturaleza más rugosa y porosa del mortero adherido que comprende una parte de este tipo de áridos (Sánchez de Juan, 2004; López Gayarre, 2008). Aunque suelen aplicarse los mismos métodos de dosificación que se utilizan para la fabricación de hormigón convencional, la mayor demanda de agua de los materiales reciclados puede provocar una pérdida de fluidez, lo cual conlleva la necesidad de ajustar la dosificación. Por este motivo, con la finalidad de conseguir la dosificación definitiva fue necesario plantear varias dosificaciones que se analizarán en los siguientes apartados.

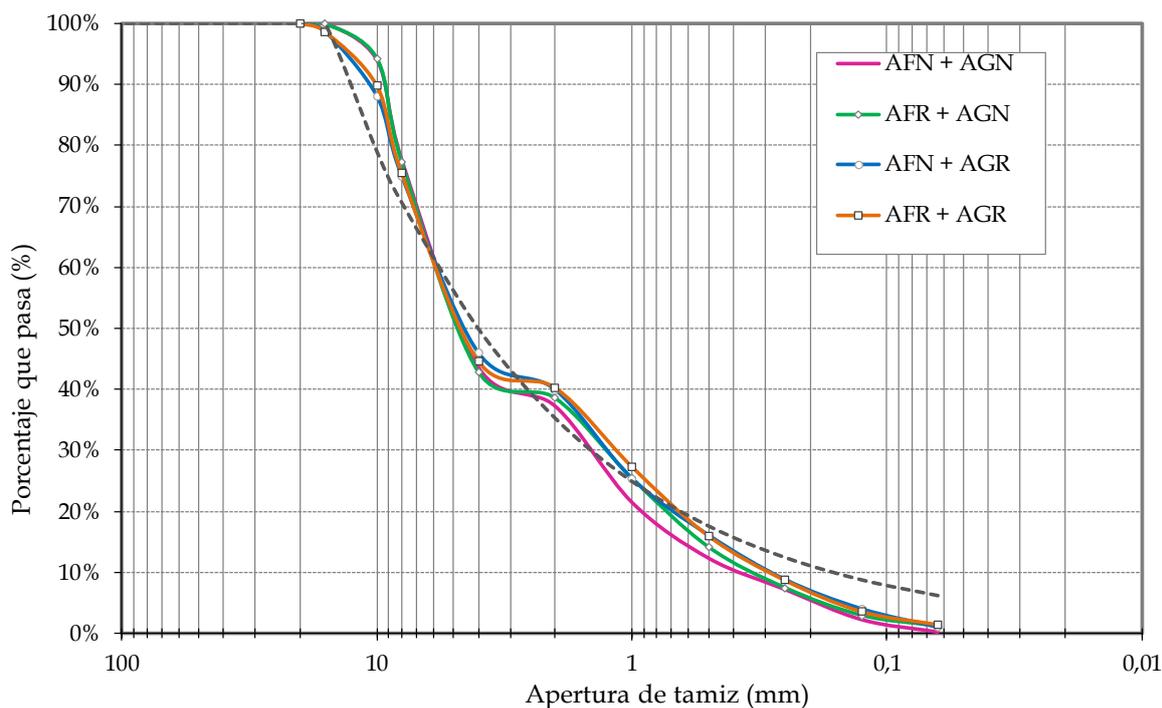
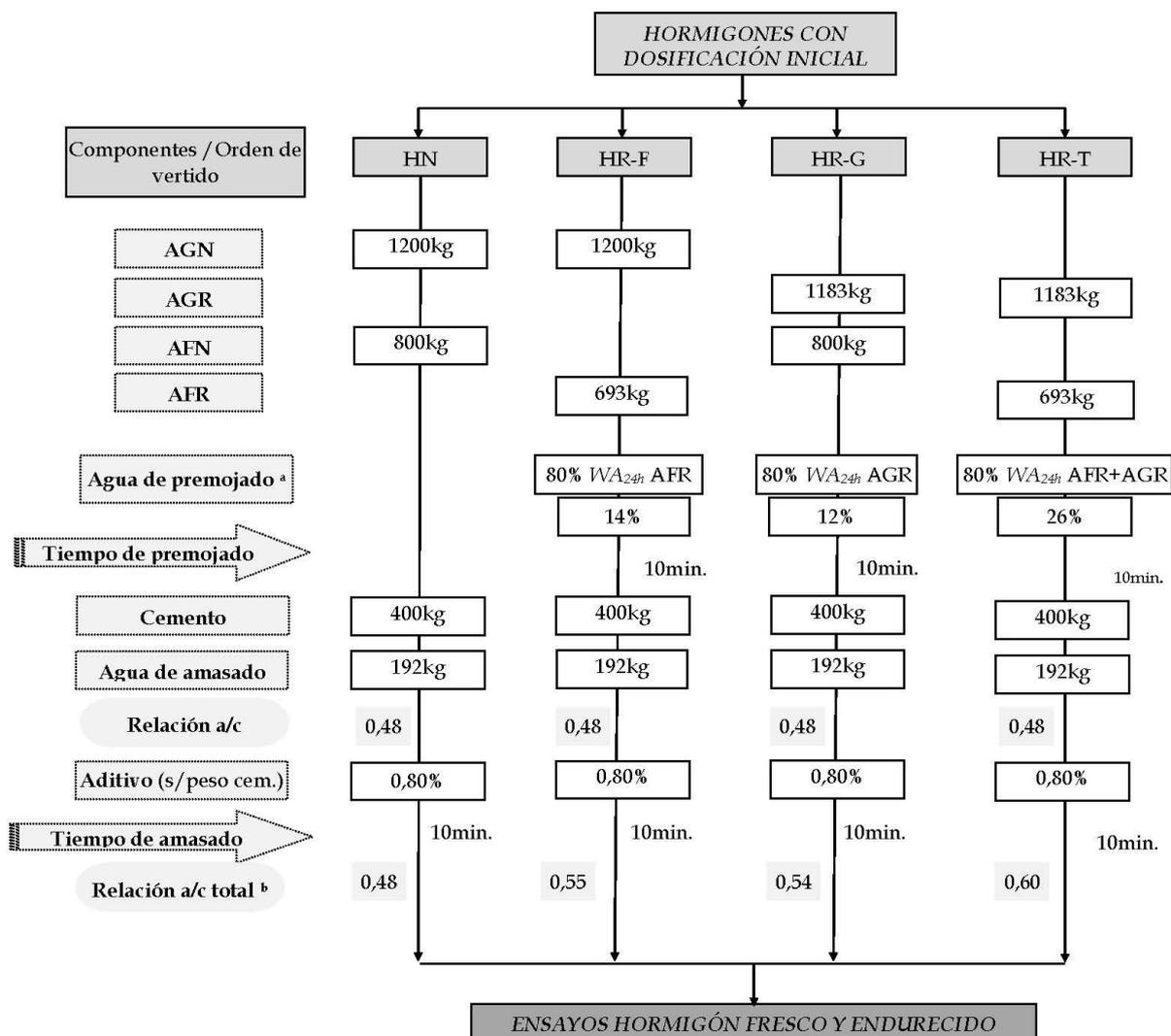


Figura 23. Distribución granulométrica de la curva de Fuller y de los áridos utilizados para la fabricación de hormigones

4.2.1. Dosificación inicial

Tal y como se explicó en el apartado de “Materiales y Métodos” (3.2.2), se elaboraron diferentes mezclas de áridos reemplazando los naturales por reciclados, tanto la

fracción fina o gruesa de forma alternativa como la totalidad de los áridos (Tabla 17), preferentemente para observar el efecto de la calidad de estos áridos en el nuevo hormigón. Las granulometrías resultantes se muestran en la Figura 23, junto con la curva teórica de Fuller (Fernández Cánovas, 2013) para el tamaño máximo del árido, de 16 mm, de acuerdo a la dosificación proporcionada por el fabricante. Al comparar la distribución granulométrica de cada una de las curvas con la de Fuller se observa que las mezclas estudiadas adoptan granulometrías bastante ajustadas con respecto de la curva patrón, aunque ligeramente menos finas, pero adecuadas para proporcionar hormigones de máxima compacidad y trabajabilidad.



^a Porcentaje calculado sobre el agua de total, en este caso corresponde con la cantidad adicional de agua.

^b Calculada en base al contenido de agua total.

Figura 24. Procedimiento de fabricación de muestras de hormigón según la dosificación inicial (en peso)



Teniendo en cuenta la mayor capacidad de absorción de estos áridos (Tabla 27), en la dosificación inicial se optó por realizar un tratamiento previo de premojado de los áridos reciclados con una cantidad adicional de agua del 80% de su capacidad de absorción en 24 horas, durante 10 minutos, de acuerdo con lo establecido en la primera fase experimental. En la Figura 24 se muestra la dosificación inicialmente utilizada basada en la facilitada por el fabricante (columna izquierda del diagrama de flujo); también se incluyen los componentes de cada hormigón, el orden en que éstos se añadieron a la amasadora, los tiempos de premojado y de mezclado requeridos para llevar a cabo su fabricación, así como la relación a/c efectiva y la total calculada de acuerdo a la cantidad total de agua utilizada en cada caso. A continuación, se recogen los resultados obtenidos en la dosificación inicial, así como en el estudio de premojado.

4.2.1.1. Resultados de la dosificación inicial

En una primera fase se evaluaron y compararon los resultados obtenidos de los hormigones reciclados (HR-F, HR-G y HR-T) con el hormigón de referencia (HN), desde el punto de vista de la trabajabilidad (Figura 25) y de la resistencia mecánica (Figura 26). Para ello se partió de la dosificación inicial recogida en la Figura 24.

4.2.1.2. Consistencia del hormigón fresco

De acuerdo a la bibliografía consultada, la consistencia de un hormigón prefabricado depende del tipo de elemento no estructural a fabricar. En el caso de los hormigones vibro-comprimidos sólo se requiere una pequeña cantidad de agua para obtener una mezcla cohesiva, sin que importe el asentamiento, como es el caso de elementos como bloques, adoquines, bordillos, bovedillas, etc. (Poon et al., 2002; Poon y Chan, 2006b; Jankovic et al., 2012; López Gayarre et al., 2013; Martín-Morales et al., 2017; Juan-Valdés et al., 2018). Por otro lado se encuentran las piezas que precisan mantener una mezcla trabajable y dócil necesaria para su correcta puesta en obra, tales como productos para mobiliario urbano (Espinar Albertí, 2009; Mena Sebastiá, 2015).

En este estudio se siguieron las recomendaciones del fabricante que especificaban la consistencia tipo blanca (6-9 cm) como la más adecuada e imprescindible para facilitar la colocación y consolidación del hormigón prefabricado. La Figura 25 recoge el valor

medio de la consistencia de los hormigones fabricados, medida mediante el ensayo del cono de Abrams, junto con la consistencia tipo marcada como referencia. Los resultados obtenidos presentan valores que varían entre 3 y 6 cm, dependiendo del tipo de reemplazo efectuado, siendo todos considerados como hormigones de consistencia plástica. El hormigón reciclado compuesto por árido grueso reciclado (HR-G) muestra un valor del asentamiento más próximo al establecido por el fabricante (6-9 cm) y al del hormigón natural (6 cm); en el caso de los hormigones confeccionados con la fracción fina reciclada se obtuvieron descensos del 50% por debajo del límite mínimo recomendado (HR-F y HR-T).

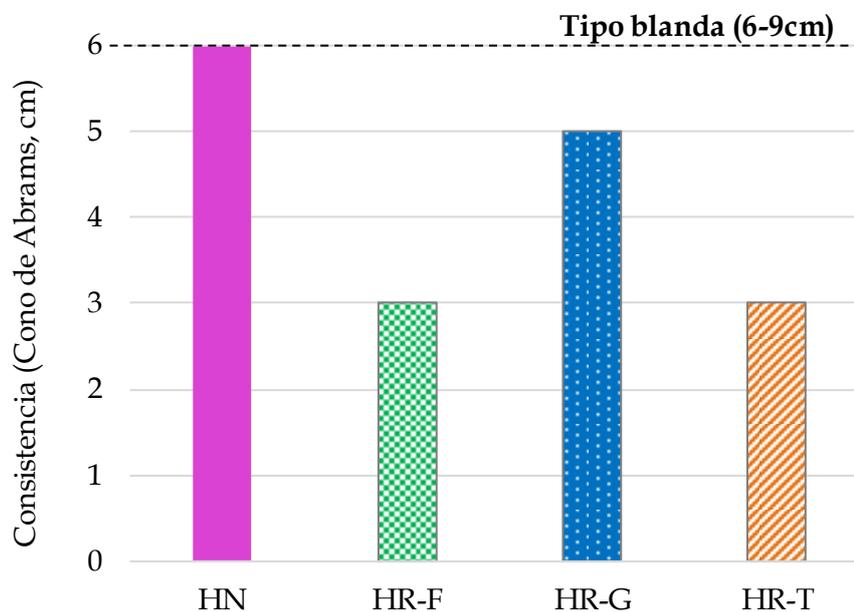


Figura 25. Consistencia de los hormigones fabricados con la dosificación inicial

Estos resultados ponen de manifiesto la clara influencia del uso del árido fino reciclado en la trabajabilidad del hormigón, como consecuencia de la presencia de una mayor cantidad de mortero adherido y finos, lo que implica que para obtener la consistencia establecida estos áridos necesiten más agua para mojar la totalidad de su superficie específica. Estos resultados son similares a los obtenidos en otros estudios consultados (Pereira et al., 2012a; Fan et al., 2015) en los cuales se constató que el uso de la fracción fina del árido reciclado, y en mayor medida cuando el reemplazo es total, produce una disminución considerable en la fluidez del hormigón para una dosificación similar; los descensos referenciados fueron superiores al 50% respecto del valor obtenido por el convencional (Khatib, 2005; Yaprak et al., 2011).



4.2.1.3. Resistencia del hormigón endurecido

La Figura 26 presenta los resultados de la resistencia a compresión a 7 y 28 días de los hormigones confeccionados. Se observa que todos ellos superan la limitación más restrictiva establecida por la normativa específica de productos prefabricados (Tabla 23), de 35 MPa a 28 días (AEN/CTN 127, 2004a). Al comparar los resultados del hormigón natural (50,36 MPa a 7 días y 55,42 MPa a 28 días) con los de los reciclados se observa una reducción significativa de las resistencias. En el caso de las muestras fabricadas con árido fino reciclado (HR-F y HR-T) estas reducciones fueron del 35% y 30% a los 7 y 28 días, respectivamente. En los hormigones elaborados con árido grueso reciclado (HR-G) las disminuciones fueron menores, concretamente del 21% y 9% a los 7 y 28 días, respectivamente.

Estos resultados se explican, igual que se observó para la consistencia, por la presencia del árido fino reciclado en el hormigón, además de por el contenido en mortero, más blando y fisurable, que provoca que el árido reciclado sea menos resistente y del aumento de las zonas débiles dentro de su microestructura. Resultados análogos fueron obtenidos por otros autores al reemplazar la arena natural por reciclada con porcentajes que variaron desde el 20% (Kenai et al., 2002; Gesoğlu, Güneyisi, Öz, Taha, et al., 2015; Fan et al., 2015) al 30%, incluso superiores (Khatib, 2005; Yaprak et al., 2011; Bravo et al., 2015b); mientras que al sustituir totalmente los áridos naturales por reciclados, los descensos publicados fueron superiores al 30% (Kenai et al., 2002; Hadjieva-Zaharieva et al., 2003; Gesoğlu, Güneyisi, Öz, Taha, et al., 2015).

En cuanto al desarrollo de las resistencias en el tiempo, todos los hormigones reciclados mostraron inicialmente (7 días) un rápido desarrollo de las mismas, aunque en todos los casos fueron inferiores a las alcanzadas por el hormigón natural, con un valor que se encontró en torno al 90% de las resistencias a 28 días y oscilaron entre el 79% para el caso de los hormigones fabricados con árido grueso reciclado (HR-G) y el 85% para los que aplicaron árido fino (HR-F). No obstante, estos valores fueron similares al recomendado por la EHE-08 para un cemento 42,5R, del 82% (Ministerio de Fomento, 2008). La menor relación a/c total del hormigón natural ha favorecido el mayor crecimiento de su resistencia inicial con relación a la de 28 días, debido a que cuanto más baja sea esta relación, más próximos se encuentran los granos de cemento

y al hidratarse, los productos formados pueden crear rápidamente un sistema estable (Fernández Cánovas, 2013).

Finalmente, la adquisición más lenta de resistencias alcanzada en los hormigones reciclados no se ve influenciada por el tipo de reemplazo llevado a cabo, ya éstos han presentado en todos los casos un desarrollo acorde al tipo de cemento utilizado (82%), sino que se justifica por el mecanismo de auto-curado que ejerce el árido reciclado sobre el hormigón (absorción y liberación gradual del agua); constancia de ello se ha dado en la bibliografía relacionada (Khatib, 2005; Cachim, 2009; Rodríguez López, 2013).

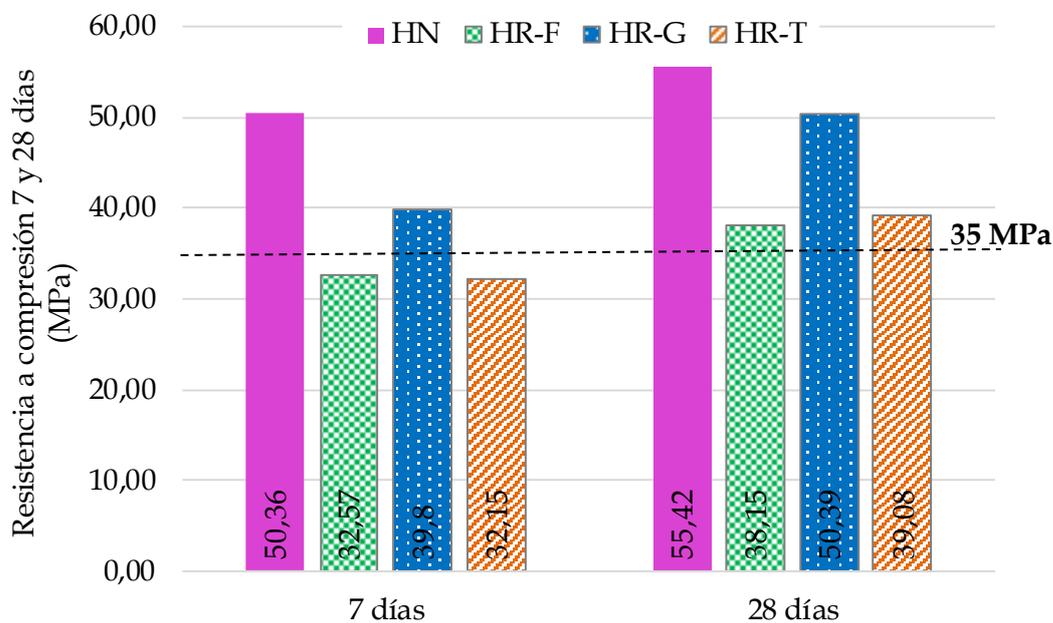


Figura 26. Resistencia a compresión de los hormigones fabricados con la dosificación inicial a 7 y a 28 días

4.2.1.4. Consideraciones particulares de la dosificación inicial

De los resultados obtenidos tras la elaboración de hormigones con diferentes reemplazos de árido natural por reciclado de acuerdo a la dosificación inicial (proporcionada por el fabricante), y premojándolos según la primera fase del tratamiento previo, se concluye que la consistencia se vio condicionada por la fracción del árido reciclado utilizada, concretamente por la fina, la cual precisa de más agua de amasado para obtener la trabajabilidad deseada (más mortero adherido, que genera un mayor número de partículas finas, con el consiguiente aumento de su superficie



específica). A pesar de ello, las resistencias obtenidas en todos los casos han sido elevadas, incluso en el hormigón fabricado con la totalidad del árido reciclado, debido al alto contenido de cemento usado en la dosificación proporcionada por el fabricante, siendo éstas demasiado elevadas para hormigones de uso no estructural.

Partiendo de estos resultados, y primando la consistencia del hormigón sobre la resistencia mecánica, se decidió realizar un estudio comparativo de diferentes métodos de premojado sólo sobre el árido grueso reciclado, dados los efectos negativos obtenidos en la trabajabilidad al utilizar la fracción fina reciclada. Los resultados obtenidos se analizan a continuación.

4.2.2. Estudio de premojado

En esta fase se formularon cinco métodos de premojado que variaban en términos de contenido en agua total, procedimiento de añadir el agua de premojado, y tiempos de premojado y de mezclado (Figura 16). Cuatro de los métodos ensayados se seleccionaron a partir de la bibliografía consultada (métodos 1 a 4) (Cachim, 2009; Mas, Cladera, Olmo, et al., 2012; Etxeberria, Vázquez-Ramonich, et al., 2007; Evangelista y De Brito, 2007); finalmente se hizo una propuesta de un quinto método (método 5) basado en la necesidad generalizada de premojar los áridos gruesos reciclados para que éstos no resten agua a los demás materiales, pero sin añadir agua adicional a la mezcla. En este caso los áridos se premojaron con el 80% del agua de amasado, cantidad suficiente para garantizar una adecuada hidratación de los mismos, y posteriormente se añadieron el resto de los componentes sólidos, junto con el 20% del agua restante, necesaria para diluir el aditivo líquido. En este método, a diferencia de los otros, la relación a/c total permanece invariable, aunque se premojaron los áridos reciclados.

Tabla 29. Contenido de agua de los hormigones fabricados

Método	Hormigón	Agua efectiva (%) ^a	Agua añadida (%) ^b	Agua total (%) ^c	Agua de premojado (%) ^d	Relación a/c total ^e
HN	HN	8,00	0,00	8,00	0,00	0,48
Método 0	HR-G-0	8,00	0,00	8,00	0,00	0,48
Método 1	HR-G-1	8,00	0,90	8,90	8,90	0,53
Método 2	HR-G-2	8,00	1,10	9,10	4,60	0,54
Método 3	HR-G-3	8,00	1,10	9,10	1,10	0,54
Método 4	HR-G-4	8,00	0,90	8,90	6,20	0,53
Método 5	HR-G-5	8,00	0,00	8,00	6,40	0,48

^a En masa respecto del peso de los materiales sólidos; ^b En masa respecto del agua efectiva, correspondiente al agua adicional añadida según cada método; ^c Agua efectiva más agua añadida; ^d En masa respecto del agua total; ^e En base al contenido de agua total.

De acuerdo a esto, se fabricaron seis hormigones con el reemplazo total de la fracción gruesa del árido natural por reciclado (HR-G-0 a HR-G-5) y un hormigón con árido natural (HN) según la dosificación obtenida en la fase anterior. Todos ellos mantuvieron fija su composición respecto al contenido de los siguientes materiales: árido grueso natural o reciclado (50%), árido fino natural (33%), cemento (17%), aditivo



(0,80%), agua de amasado o efectiva (8,00%) y relación a/c efectiva (0,48); mientras que las diferencias existentes entre cada método en lo relativo al contenido de agua se recogen en la Tabla 29.

4.2.2.1. Resultados obtenidos

Los resultados obtenidos de los diferentes métodos de premojado se han analizado y comparado desde la perspectiva de la trabajabilidad (Figura 27 y Figura 28), así como de la resistencia a compresión (Figura 29 a Figura 31). Adicionalmente, y teniendo en cuenta que la microestructura del sistema poroso del hormigón tiene gran influencia en sus propiedades físicas y mecánicas, o lo que es lo mismo, que el comportamiento del hormigón depende de las características microestructurales de la región próxima a la superficie de contacto con los áridos, interfase árido-matriz de cemento (Puertas Maroto et al., 1991; Sidorova, 2013), se completó esta parte del estudio con la caracterización del sistema poroso de todos los hormigones fabricados, mediante la técnica de observación directa de microscopía óptica (Figura 32 a Figura 41) y la basada en la medición indirecta de porosimetría de inyección de mercurio (Figura 42 y Figura 43). Ambas técnicas proporcionan una información complementaria entre sí, ya que permiten medir la porosidad, así como la distribución de tamaño de los poros, pero en diferentes rangos de radio. Mediante la microscopía óptica se obtienen los poros de tamaño más grande, desde 1 μm hasta más de 1 mm y con la porosimetría los de radio menor, generados principalmente en la pasta de cemento hidratada, desde 0,01 μm a 100 μm (Aligizaki, 2006).

Gráficamente se han incluido, además de los valores medios, la desviación estándar y las variables de agua total, agua de premojado y tiempo de premojado correspondientes a cada método. Los resultados muestran los datos de las series de referencia (HN y HR-G-0, respectivamente) y seguidamente los de las series premojadas (HR-G-1 a HR-G-5), ordenadas de menor a mayor valor para facilitar el análisis de la influencia de dichas variables sobre los resultados obtenidos.

4.2.2.1.1. Consistencia del hormigón fresco

En la Figura 27 se presenta la consistencia de los hormigones estudiados en función del asiento del cono de Abrams, junto con los valores de las variables de agua total,

agua de premojado y tiempo de premojado. Se observa que el asentamiento ha variado desde 1 a 22 cm, correspondiendo a consistencias que oscilan de seca (HR-G-5) a líquida (HR-G-2), respectivamente. En el método 4, en el que se premojaron los áridos reciclados con el 70% del agua total durante 10 minutos, se obtuvo un hormigón reciclado (HR-G-4) con un valor del cono más cercano al del hormigón natural (6 cm), así como al recomendado por el fabricante (6-9 cm).

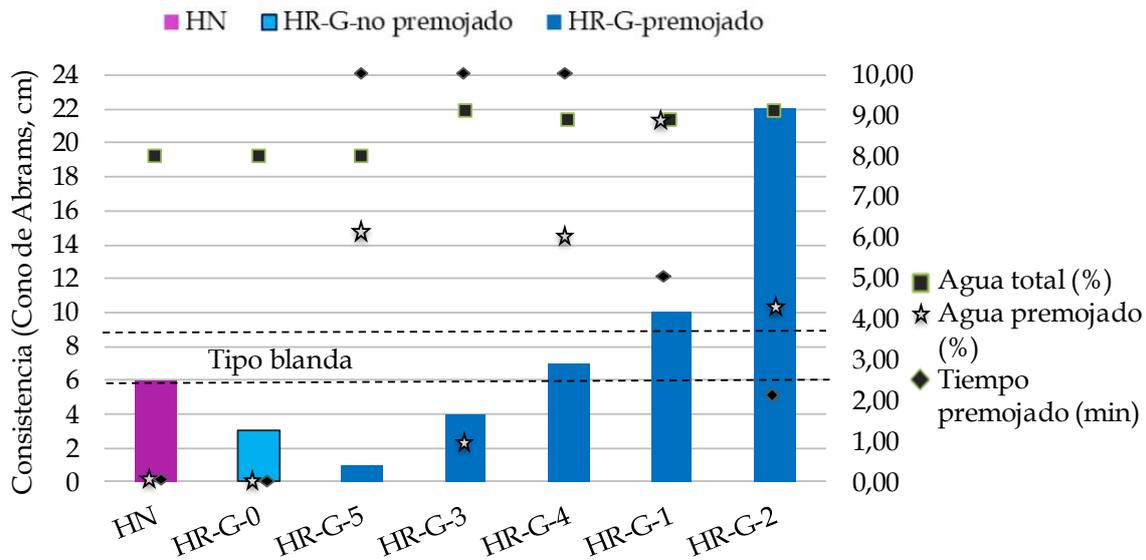


Figura 27. Consistencia de los hormigones producidos según el estudio de premojado

Respecto del tiempo óptimo de premojado la Figura 28 muestra la relación entre los valores de asentamiento obtenidos y el tiempo previo de contacto del árido reciclado con el agua correspondiente a cada serie de hormigón ensayada (HR-G-1 a HR-G-5). Se puede observar la buena correlación entre ambas variables ($R^2 = 0,858$), de la que se deduce que existe un adecuado ajuste entre el tiempo de premojado y el valor del cono de Abrams resultante, estableciéndose en 10 minutos el tiempo teórico de premojado más adecuado.

Los resultados obtenidos coincide con lo establecido por otros autores (Evangelista y De Brito, 2007; Cabral et al., 2010; Mas, Cladera, Olmo, et al., 2012; Ismail y Ramli, 2014; González-Taboada, González-Fonteboa, Martínez-Abella y Carro-López, 2016). Por ello, este tiempo aseguraría un porcentaje óptimo de humedad en los áridos reciclados, proporcionándole a éstos una superficie más efectiva, debido al llenado de los poros en la superficie del árido. Igualmente, se observa que con tiempos más cortos de premojado de 2 y 5 minutos, correspondientes a las series HR-G-2 y HR-G-1,

respectivamente, los áridos reciclados no absorbieron el agua suficiente y necesaria para proporcionar una buena trabajabilidad a la mezcla, ya que la absorción de agua se realizó de forma lenta y gradual.

En la Figura 27 se muestra también la influencia de la variable de agua de premojado. En este caso se observa que este parámetro también afecta a los valores de consistencia obtenidos ya que un contenido óptimo de agua de premojado evita que los áridos reciclados absorban parte del agua de amasado, la cual se añade a la mezcla para la hidratación del cemento; sin embargo, se ha comprobado que no existe una correlación recíproca entre esta variable y el asentamiento obtenido. Finalmente, el contenido de agua total no influye en dichos resultados, dado que la variación porcentual de unos métodos a otros fue muy pequeña (Tabla 29).

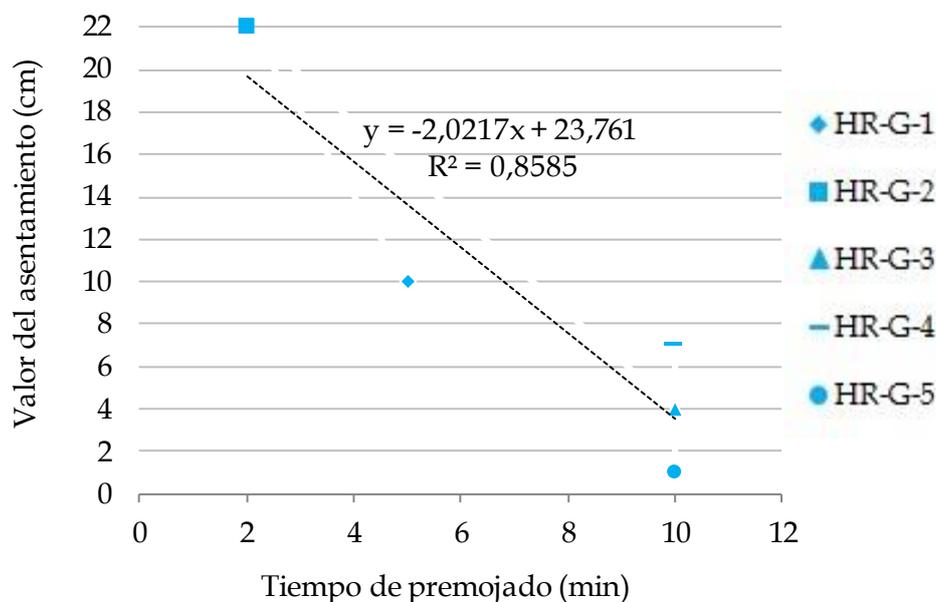


Figura 28. Relación entre la consistencia y el tiempo de premojado de las series de hormigón fabricadas con áridos gruesos reciclados premojados

En base a todo lo expuesto se deduce que, para obtener la consistencia deseada para la fabricación de hormigón reciclado para uso no estructural, el árido grueso reciclado necesita premojarse durante 10 minutos con un contenido adicional de agua de premojado acorde a la mayor demanda de agua de estos áridos. Con ello se consigue alcanzar un nivel de humedad estable y se evita que se produzca una disminución de la relación a/c efectiva, ya que, si la cantidad de agua en la matriz del hormigón es insuficiente para cubrir la demanda de agua de todos los componentes la

trabajabilidad del hormigón fresco se reduce de forma significativa.

4.2.2.1.2. Resistencia del hormigón endurecido

Si se comparan los resultados obtenidos para las resistencias del hormigón natural (50,36 MPa a 7 días y 55,42 MPa a 28 días) con la de los hormigones reciclados (Figura 29) se observa una disminución en los valores de las series premojadas, respecto de las otras dos (HN y HR-G-0), con una variación máxima del 21% (HR-G-3) a 7 días y del 16,8% (HR-G-4) a los 28 días, correspondiendo a unas resistencias mínimas de 39,80 MPa y de 46,09 MPa, respectivamente.

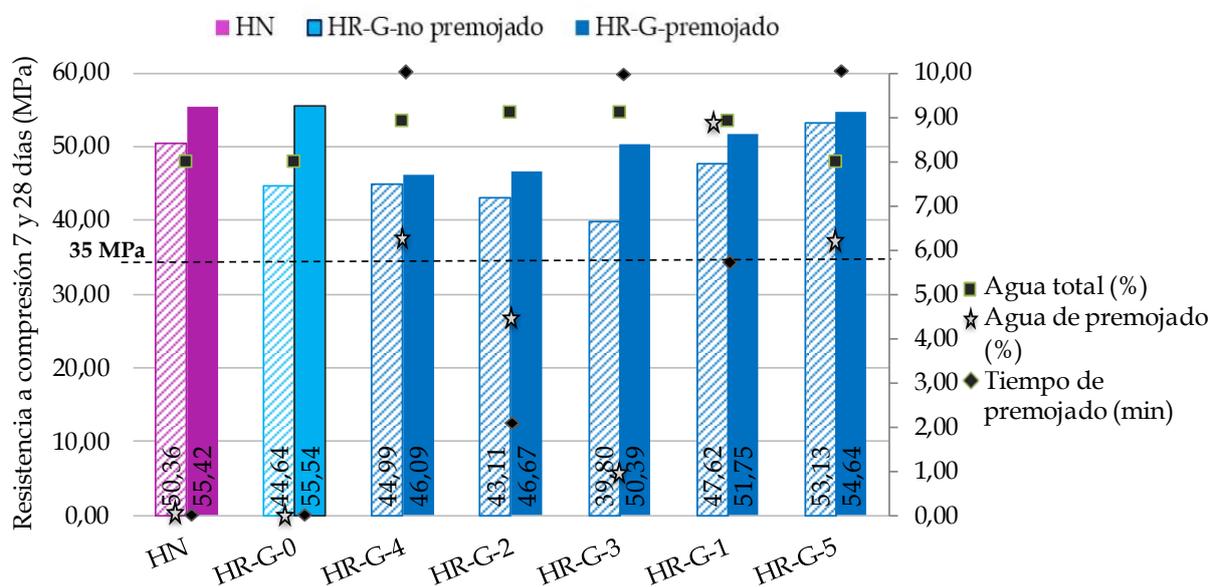


Figura 29. Resistencia a compresión a 7 días (barra rayada) y a 28 días (barra lisa) de los hormigones producidos

Las disminuciones obtenidas son semejantes a las referenciadas por otros autores, tanto en los primeros días de curado (Poon et al., 2007; Etxeberria, Vázquez-Ramonich, et al., 2007) como a 28 días (Sánchez de Juan, 2004; Pedro et al., 2014b) al reemplazar la fracción gruesa del árido natural por reciclado. Dichos descensos se explican por el aumento en la relación a/c total, es decir, del contenido de agua necesario para compensar la mayor demanda de estos áridos, lo cual implica una reducción directa en la resistencia mecánica. También son debidos a la calidad del hormigón a partir del cual se obtienen los materiales reciclados, ya que éste es un factor importante a tener en cuenta, entre otros. No obstante, todas las muestras ensayadas alcanzan resistencias superiores al valor mínimo exigido de 35 MPa a 28 días (AEN/CTN 127, 2004a).

En referencia a la evolución de las resistencias con el tiempo (Figura 30), las series de hormigón premojadas (HR-G-1 a HR-G-5) presentaron a 7 días un rápido crecimiento de las mismas, superiores al 92%, a excepción de la serie HR-G-3 (79%), la cual se realizó con un bajo contenido de agua de premojado, correspondiente al 80% de la WA_{24h} durante 10 minutos (Tabla 29 y Figura 29). A los 28 días, la resistencia a compresión de dichas series no siguió la misma tendencia observada en los primeros días de curado, por lo que se demuestra que el premojado sólo colabora en los primeros días del proceso de fraguado y endurecimiento del hormigón, provocando un rápido incremento de la resistencia inicial, superior al 82%, valor recomendado por la EHE-08 (Ministerio de Fomento, 2008) para la clase de resistencia del cemento usado en este estudio (42,5R). En el caso del hormigón HR-G-3, los resultados obtenidos se explican por el retardo en la hidratación del cemento que ha dado lugar a un hormigón más denso, lo cual se ve reflejado en la mejora de la resistencia con el paso de los días, de 50,39 MPa a 28 días.

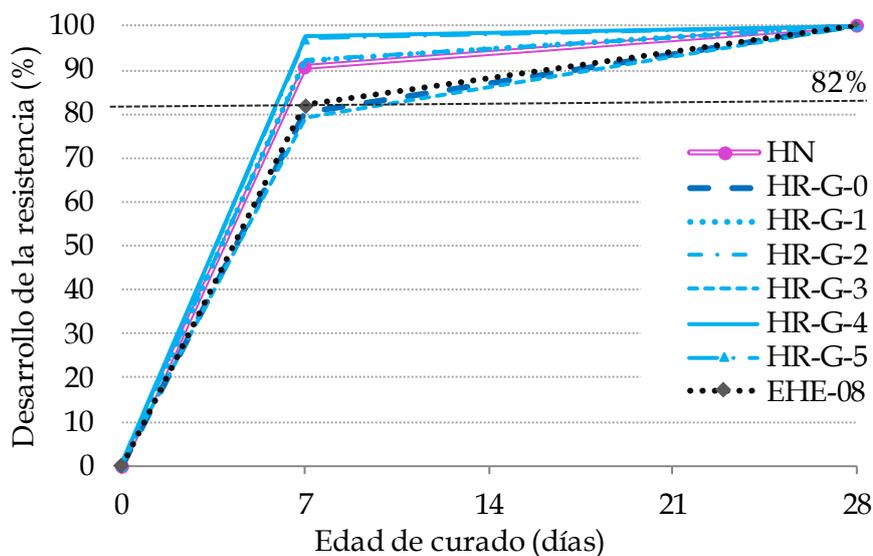


Figura 30. Desarrollo de la resistencia del hormigón hasta los 28 días de edad

En este sentido, se puede afirmar que el premojado de los áridos reciclados actúa como auto-agente de curado del hormigón, garantizando que haya agua suficiente para la hidratación de la mezcla más allá de los 7 días (Cachim, 2009; Soutsos et al., 2011a), creándose un mejor enlace entre las partículas del árido y el cemento en el período inicial de curado. De acuerdo a lo publicado en la bibliografía consultada, este resultado estaría garantizado siempre y cuando el árido no presente un exceso de agua

en la superficie, ya que, en este caso, se forma una zona de transición más ancha y porosa que provoca una disminución de las resistencias a medio y largo plazo (Barra de Oliveira y Vázquez-Ramonich, 1996; Mefteh et al., 2013).

Por el contrario, cuando se utilizan los áridos reciclados sin premojar (en estado seco), éstos absorben agua de la pasta generando una pequeña capa de porosidad en la zona de contacto pasta-árido, pero de espesor reducido en comparación con la formada cuando el árido está húmedo, y con ello se crea una mejor unión entre la matriz de cemento y las partículas del árido, que favorece la ganancia de resistencias a edades superiores (Poon, Shui, Lam, et al., 2004; Sidorova, 2013). De esta forma, se justifica el adecuado desarrollo de las resistencias obtenidas en la serie de hormigón no premojada (HR-G-0), la cual presentó un retardo en la ganancia de las mismas en los primeros 7 días (80%), pero un posterior incremento a los 28 días (55,54 MPa).

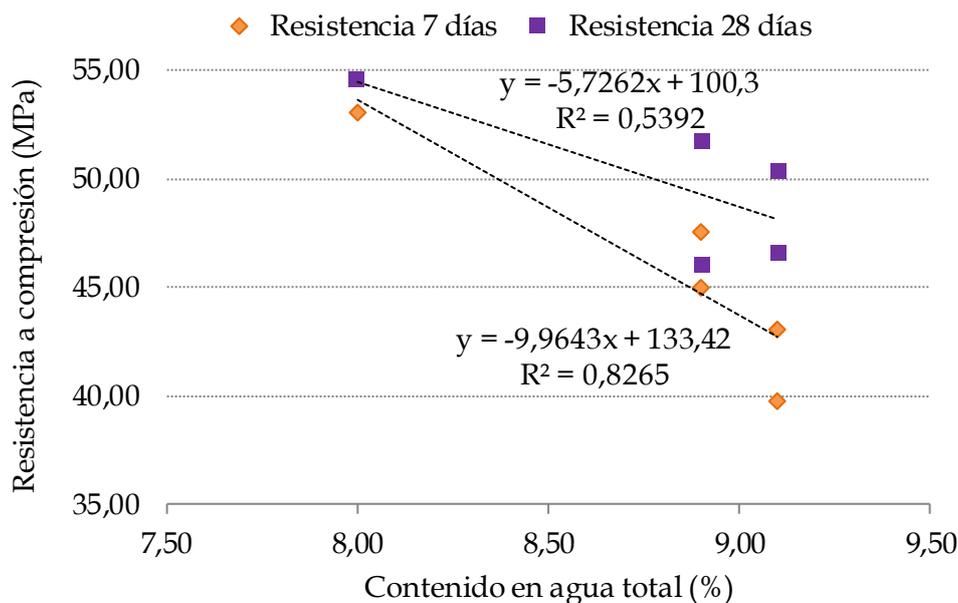


Figura 31. Relación entre resistencia a compresión y contenido de agua total de los hormigones premojados

En cuanto al efecto que el contenido de agua total (agua efectiva más añadida a la mezcla) ejerce sobre la resistencia de las series premojadas (HR-G-1 a HR-G-5), se observa en la Figura 31 que existe una relación lineal inversa entre los dos parámetros a ambas edades. A los 7 días las resistencias obtenidas se han visto afectadas considerablemente por el porcentaje de agua total añadido a la mezcla ($R^2=8265$), mientras que a los 28 días la correlación ha sido menor ($R^2=5392$).



Los resultados obtenidos vienen a demostrar que la disminución en el contenido total de agua reduce la cantidad de agua libre en la mezcla y, consecuentemente, proporciona un incremento en la resistencia en el hormigón. Sin embargo, un excesivo descenso en el agua libre puede afectar significativamente a la trabajabilidad, además de dar lugar a una peor docilidad en la puesta en obra, reduciendo con ello la resistencia en el hormigón reciclado, debido al retraso en la hidratación del cemento y al mayor volumen de huecos en la masa. Ambos hechos ha sido confirmados por otros autores al estudiar el comportamiento del hormigón fabricado con áridos reciclados (González-Fonteboa y Martínez-Abella, 2008; de Brito y Saikia, 2013; Fernández Cánovas, 2013).

Finalmente, respecto a la influencia de las variables de agua y tiempo de premojado, se observa en la Figura 29 como éstas no intervinieron de forma significativa en las resistencias a 7 y 28 días obtenidas en las series de hormigón evaluadas.

4.2.2.1.3. Microscopía óptica y análisis digital de imágenes

En la Figura 32 se recoge un ejemplo de algunas submuestras embutidas en resina pertenecientes a los hormigones fabricados según el estudio de premojado, tanto con árido natural (Figura 32a) como de los producidos con árido grueso reciclado y arena natural (Figura 32b-g). En ellas se observa que a nivel macroscópico las partículas del árido, con formas mayoritariamente alargadas, están dispersas en la matriz de cemento blanco.

Igualmente, se aprecia la heterogeneidad de los áridos gruesos reciclados, que muestran diferente tonalidad en función de su naturaleza y composición, por ejemplo: áridos gruesos reciclados con mortero adherido a su superficie procedente de hormigón fabricado con cemento gris (Figura 33b) o con cemento blanco (Figura 33c), árido de procedencia asfáltica (Figura 33e) o cerámica (Figura 33f), incluso partículas de árido sin tratar o piedra natural de naturaleza diferente dentro del hormigón reciclado (Figura 33d).

La microestructura de la zona interfacial varía en función del tipo de cemento, de la naturaleza de los áridos y de la humedad que éstos hayan presentado durante el proceso de dosificación, entre otros. Según la bibliografía consultada hay aproximadamente la misma cantidad de casos de interfaz fallida en un hormigón

convencional que en uno reciclado (Etxeberria, 2004; Sidorova, 2013; Thomas et al., 2018), no obstante, dada la alta capacidad de absorción de agua de los áridos reciclados se hace evidente que la creación de una interfaz efectiva es menos probable.

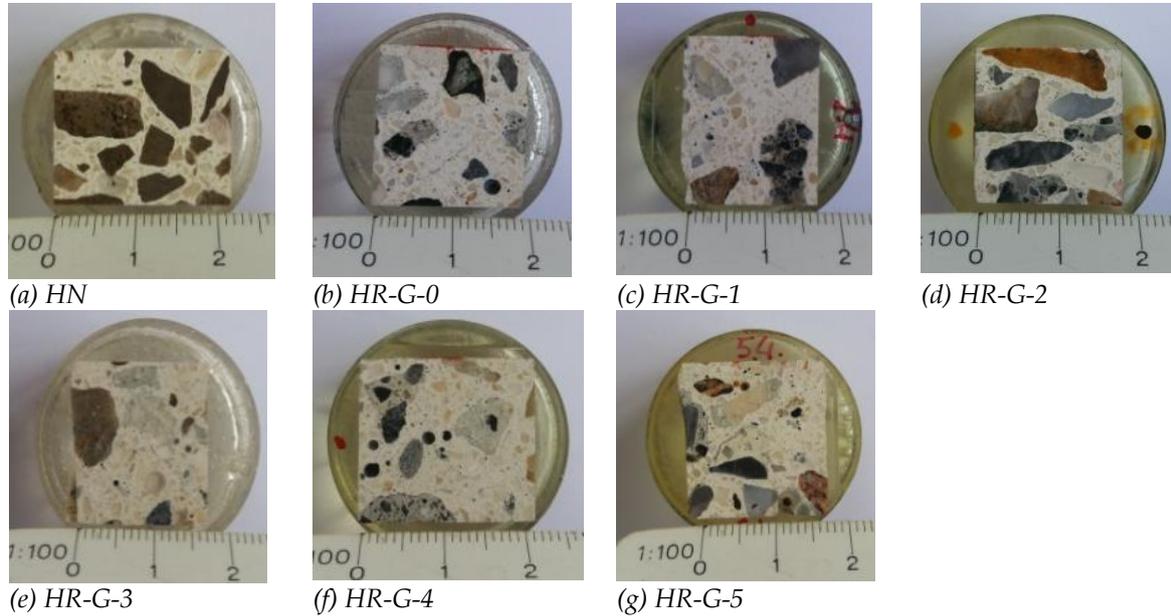


Figura 32. Submuestras embutidas y pulidas de cada tipo de hormigón fabricado, a escala 1:100

En este sentido, el comportamiento observado en el análisis de la unión de los áridos, tanto naturales (Figura 33a) como reciclados con mortero adherido (Figura 33b,c), con la nueva pasta de cemento ha dependido fundamentalmente del estado de humedad que éstos presentaban y de su absorción de agua, así como de su naturaleza. Esto es debido a que el exceso de agua en el árido da lugar a que ésta se desplace hacia la pasta generando una unión caracterizada por ser más porosa. En cambio, si el árido está seco éste absorbe parte del agua de la mezcla y a su vez libera el aire ocluido en el interior de sus poros, el cual se distribuye alrededor de la superficie del mortero adherido al árido (burbujas aisladas), siendo relativamente más fuerte la unión interfacial desde el punto de vista resistente. En el caso de árido reciclado sin mortero adherido a su superficie (Figura 33d), la interfaz se desarrolló de forma muy similar a la de un árido natural (Figura 33a); en particular, el árido con asfalto (Figura 33e), recubierto de una película de betún impermeable (6-9 μm), generó un enlace árido-pasta poco efectivo, dando lugar a una unión interfacial porosa y menos densa que el resto de la matriz; finalmente, el árido cerámico (Figura 33f), al ser más poroso, se comportó de forma similar a si éste se hubiese utilizado en estado seco. Estas observaciones concuerdan,

en cierto modo, con lo obtenido en otros estudios (Etxeberria, 2004; Huang et al., 2005; Sidorova, 2013; Leite y Monteiro, 2016).

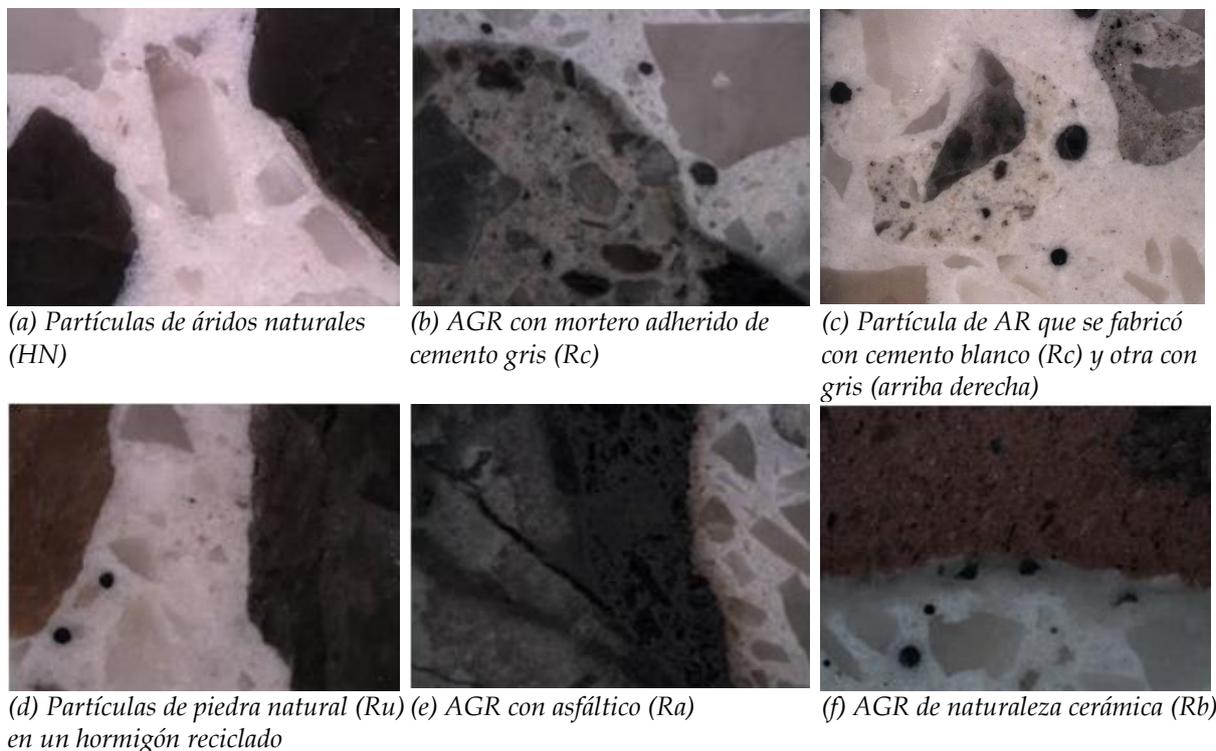


Figura 33. Ejemplo de partículas de árido de naturaleza distinta presentes en el hormigón natural (a) y en los reciclados (a-f) fabricados en este estudio, 5x con luz polarizada plana

En vista de lo comentado, la importancia que tiene el estado de humedad de los áridos reciclados en la formación de la microestructura del hormigón fabricado con ellos hace necesario analizar con mayor detenimiento su estructura interna, en relación al método de premojado utilizado, para así llegar a entender mejor su comportamiento mecánico. Para ello se han analizado los aspectos cualitativos más destacables (uniones árido-pasta/mortero, porosidad, fisuras o empaquetamiento de las partículas) de cada uno de los hormigones evaluados, tras el análisis digital de las imágenes captadas con el microscopio óptico (Figura 34 a Figura 40), agrupándolos según las similitudes observadas en cada uno de los métodos de premojado estudiados. Así mismo, se han analizado los aspectos cuantitativos obtenidos, cuyos valores medios se resumen en la Tabla 30, correspondientes a la porosidad total cerrada en 2D (Figura 41) de las submuestras estudiadas (cuatro por cada tipo de hormigón), además de la distribución del porcentaje de poros en función del tamaño y de la forma.

Tabla 30. Resultados cuantitativos obtenidos del análisis de imágenes (valores medios)

Propiedad		HN	HR-G-0	HR-G-1	HR-G-2	HR-G-3	HR-G-4	HR-G-5
Porosidad cerrada (%)		5,4	8,3	9,6	10,8	11,0	10,0	7,8
Distribución según tamaño de poro, radio (%)	1-10 μm	2,38	11,05	1,33	4,43	10,42	17,16	0,76
	10-100 μm	88,62	79,99	79,88	91,08	76,81	75,62	79,11
	100-1000 μm	8,60	8,95	18,71	4,49	12,65	7,16	19,84
	>1000 μm	0,39	0,01	0,09	0,00	0,12	0,06	0,29
Distribución según forma de poro, circularidad* (%)	Irregular (0-0,125)	24,51	23,56	34,27	32,11	25,94	28,83	19,75
	Elíptica (0,125-0,8)	68,57	60,69	62,94	62,21	65,90	62,20	72,29
	Circular (0,8-1)	6,92	15,75	2,79	5,67	8,16	8,97	7,96

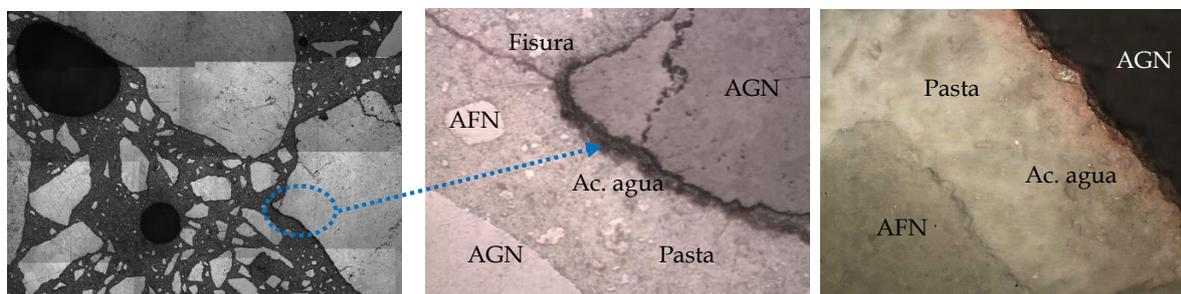
(*) Parámetro que hace referencia al factor de forma obtenido mediante el software de análisis de imágenes (Aligizaki, 2006)

4.2.2.1.4. Microestructura del hormigón fabricado con árido natural (HN)

En el hormigón natural (Figura 34) se destaca inicialmente la discontinuidad entre el árido natural y la pasta de cemento (Figura 34a,b), en ocasiones marcada por la acumulación de agua superficial en la cara inferior de las partículas del árido de mayor tamaño (Figura 34b-d); esto es indicativo de que éste es un punto de debilidad en la zona de contacto árido-pasta (banda de agua que rodea al árido con espesor máximo de 35 μm). Aunque esta zona sea la más vulnerable en los hormigones convencionales (Etxeberria et al., 2006) su calidad también va a depender de las características superficiales de las partículas del material granular como textura, irregularidad y porosidad (López Orozco, 2004; Arizzi y Cultrone, 2012) o del grado de exudación del hormigón en estado fresco (Maso, 1996; Etxeberria, 2004).

La porosidad observada en el hormigón natural es generalmente aislada y está distribuida de forma aleatoria a través de la pasta de cemento, correspondiente a aire ocluido (Figura 34a); no obstante, también se aprecia la formación de poros de aire producidos durante las operaciones de mezclado y compactado del hormigón (Aligizaki, 2006) y atrapados bajo los áridos de más de 1 mm^2 de superficie con forma irregular (Figura 34a). Igualmente, las imágenes muestran la presencia de fisuras simples e irregulares de unos 8 μm de anchura media formadas en los puntos más débiles, como los poros (Figura 34b); también se observan estas irregularidades en forma de fisuras aisladas propias del árido triturado (Figura 34e,f), que atraviesan la

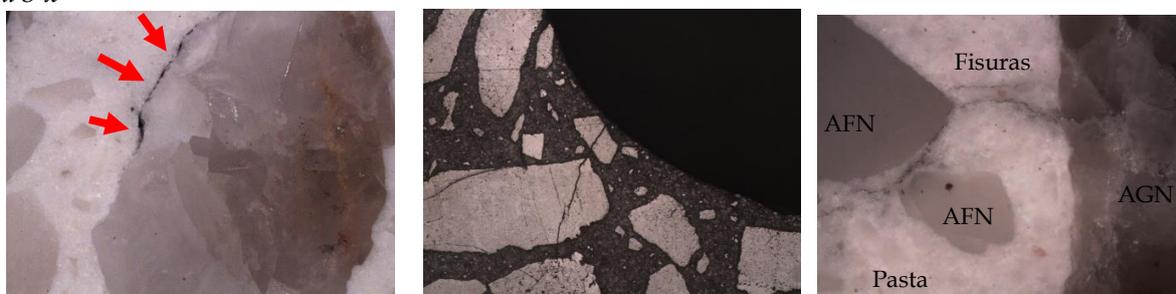
pasta hasta encontrar zonas más densas, y que posiblemente se generaron durante el endurecimiento del hormigón o en el proceso de preparación de las muestras.



(a) Conjunto de 9 imágenes, equivalente a un área de unos 56 mm²; poro grande de radio aprox. 1,25 mm y el pequeño de 0,42 mm, a 5 x

(b) Acumulación de agua bajo el AN (30-35 μm) y fisura en la pasta (8 μm), a 20x

(c) Discontinuidad en la interfase pasta-árido por acumulación de agua (5 μm), a 100x



(d) Acumulación de agua sobre la superficie del AGN, a 5x (con nícoles paralelos)

(e) Fisuras generada en el poro, atraviesa la pasta y los áridos, 11 μm (sin resina), 5x

(f) Fisuras que atraviesan y rodean a los áridos, de 8 μm aprox. (sin resina), 20x (con nícoles paralelos)

Figura 34. Análisis de imágenes de las muestras del hormigón natural, con luz polarizada y nícoles cruzados

4.2.2.1.5. Microestructura del hormigón sin premojar (HR-G-0)

En la Figura 35 se recoge la estructura interna del hormigón HR-G-0. En ese caso se observa la formación de pequeñas burbujas de aire atrapado a una distancia media de 150-200 μm de los áridos gruesos de mayor tamaño (Figura 35a-c); las burbujas se encontraban aisladas unas de otras (Figura 35c) aunque concentradas a modo de banda equidistante alrededor del mortero adherido (Figura 35b). Esta porosidad se explica, en gran medida, por la menor relación a/c en la unión entre árido-pasta, ya que el árido reciclado se utilizó sin premojar, lo que dio lugar a una consistencia seca y, por ello, absorbió gran parte del agua de la mezcla y a su vez liberó el aire atrapado en su interior. Igualmente, se observa la formación de poros distribuidos aleatoriamente en la matriz de cemento, de tamaño variable y de morfología circular (Figura 35d) además

de la presencia, en zonas puntuales, de agua acumulada en la unión entre el mortero y la pasta, así como en la interfase AGR-pasta (indicado en la Figura 35e mediante una flecha), dando lugar a una mínima discontinuidad entre las distintas fases presentes en el hormigón reciclado.

Finalmente, se observa que dentro de la disposición aleatoria de las partículas del árido dentro de la pasta, las de menor tamaño se alinean hacia las de mayor tamaño (Figura 35e), hecho apreciable en todos los hormigones analizados y que ha sido discutido en la literatura consultada como consecuencia del empaquetamiento natural de la estructura granular del hormigón (Valcuende et al., 2012; Leite y Monteiro, 2016).

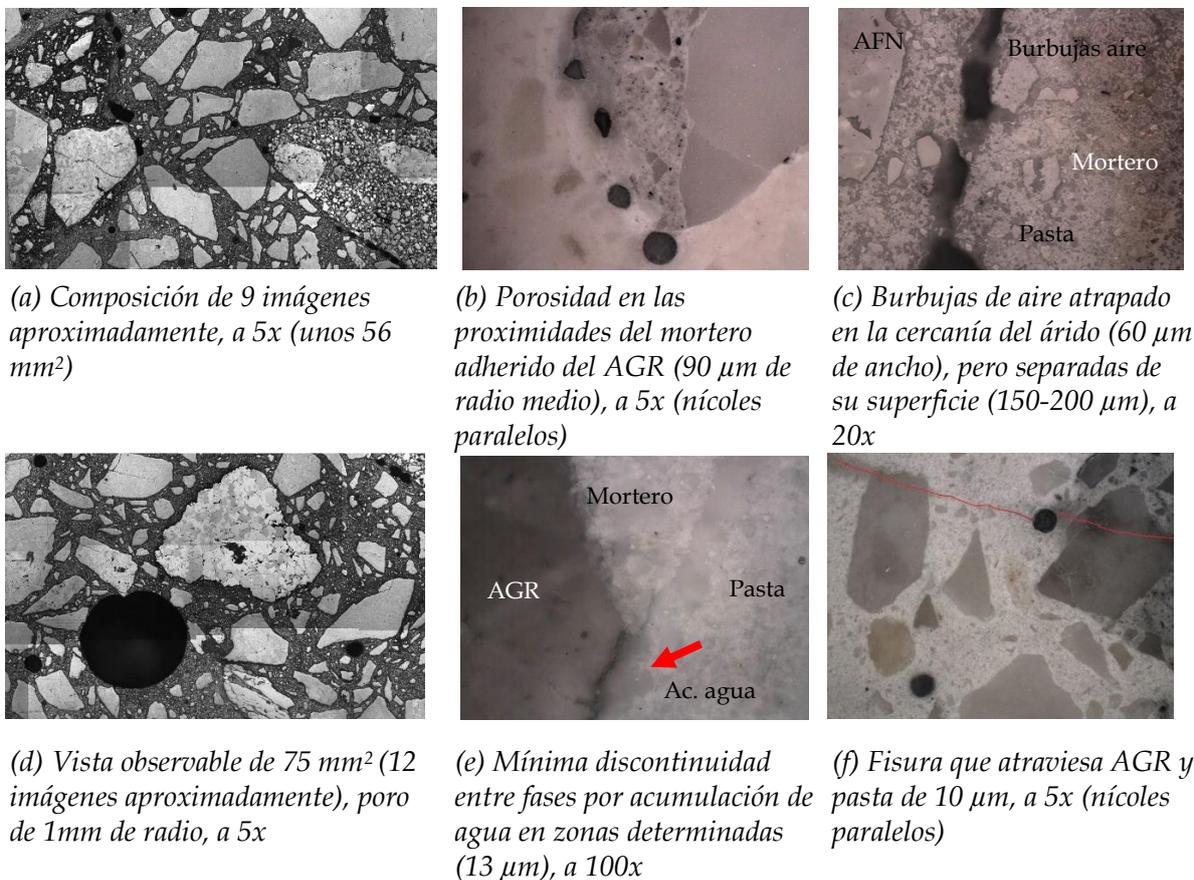


Figura 35. Análisis de imágenes de la muestra de hormigón no premojado (HR-G-0), con luz polarizada y nícoles cruzados

Se concluye, por tanto, que en el caso particular de que los áridos reciclados no se premojen, junto con los finos desprendidos del mortero adherido, la superficie más rugosa de dichos áridos, así como su irregularidad, da lugar a que se produzca un buen acoplamiento de éstos dentro de la matriz de cemento y, por consiguiente, la

creación de una microestructura más homogénea y densa. Todas estas razones, junto con la existencia de una porosidad escasamente intercomunicada y no localizada en la zona de transición, han contribuido favorablemente a que este hormigón reciclado haya desarrollado una resistencia mecánica similar a la del hormigón de referencia (55,42 MPa a 28 días).

El resultado obtenido también puede corroborarse al tener en cuenta que el mecanismo de transferencia de cargas en el hormigón depende de las propiedades de las superficies de contacto existentes entre sus constituyentes (áridos, matriz de cemento y zonas de transición) (Thomas et al., 2018). En este sentido, en el caso concreto del hormigón HR-G-0, la unión entre los áridos reciclados sin premojar y la pasta ha sido realmente efectiva.

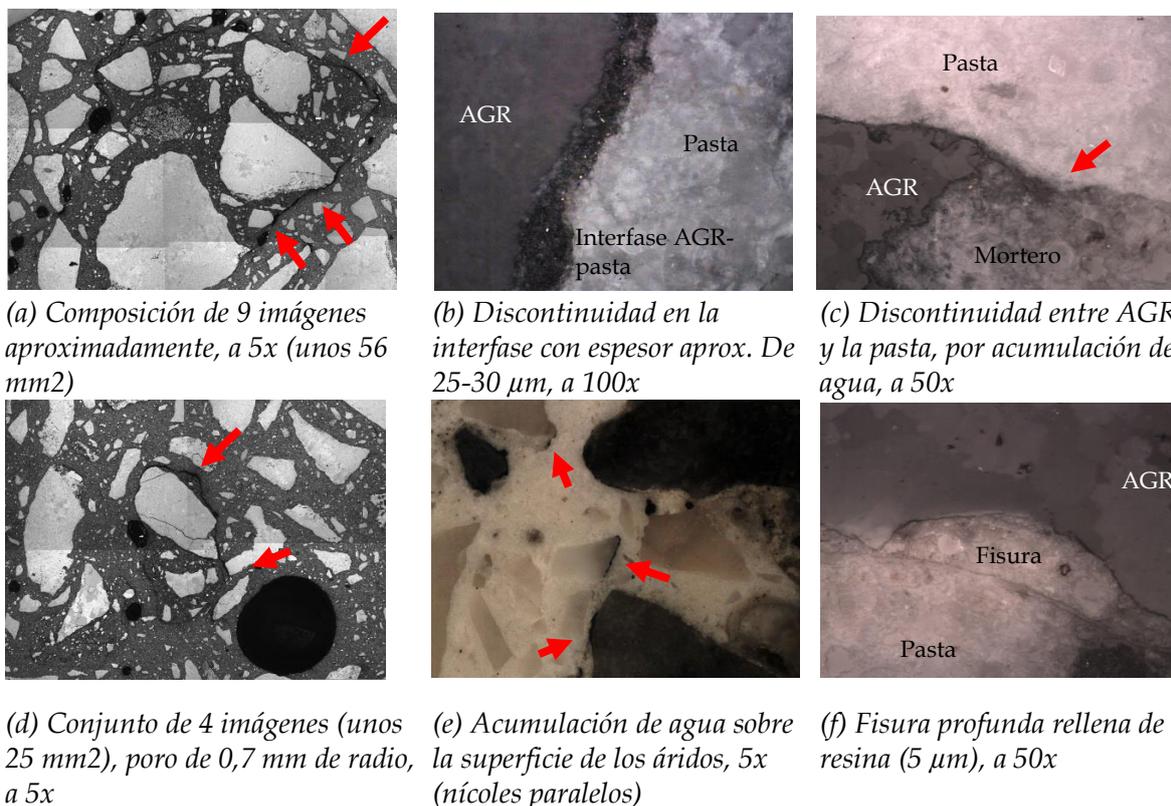


Figura 36. Análisis de imágenes de la muestra del hormigón reciclado HR-G-1, con luz polarizada y nículos cruzados

4.2.2.1.6. Microestructura de los hormigones HR-G-1, HR-G-2 y HR-G-4

El análisis de la estructura porosa de los hormigones HR-G-1 (Figura 36), HR-G-2 (Figura 37) y HR-G-4 (Figura 38) ha sido muy similar, destacando la porosidad

asociada a la acumulación de agua sobre la superficie de los áridos, con un espesor variable entre 7 μm y 55 μm (flechas en las Figuras). El mayor contenido de agua de premojado utilizada en estas mezclas generó un exceso de agua de hidratación, que migró hacia la superficie de los áridos en un proceso de exudación, haciendo que la relación a/c en la zona de transición árido-pasta fuese más elevada que en el resto de la matriz. Este hecho se observa en las interfases caracterizadas por su alta porosidad y mayor anchura (Figura 36b, Figura 37b y Figura 38b) que han proporcionado la discontinuidad entre fases.

Así mismo, la porosidad presente en este tipo de hormigones también está formada por vacíos de aire distribuidos por la pasta (Figura 36d, Figura 37a y Figura 38a), los creados junto a los áridos gruesos reciclados (Figura 36a) por la evaporación del agua o los propios del material reciclado (Figura 37d y Figura 38c, d).

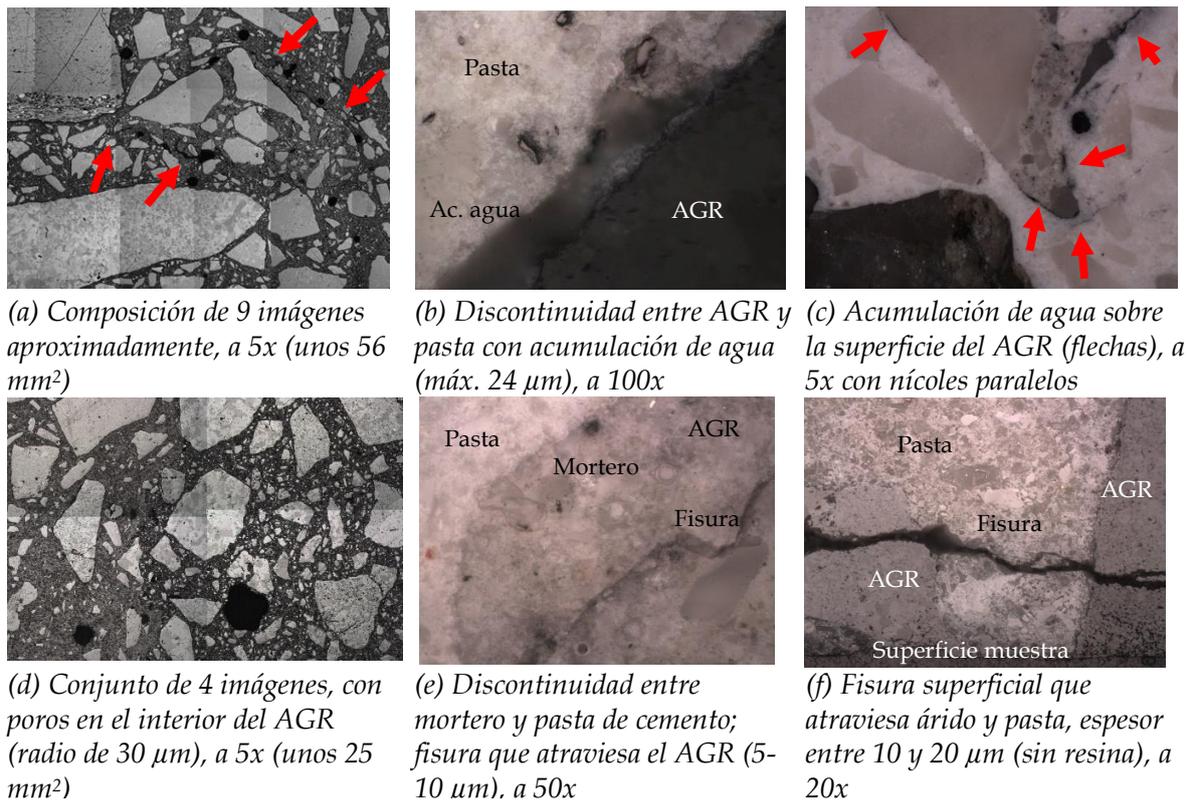


Figura 37. Análisis de imágenes de la muestra HR-G-2, con luz polarizada y nícoles cruzados

En relación con la forma de los áridos, tal y como se ha comentado, se observa que los reciclados presentan una forma menos angulosa, en comparación con la de los naturales, debido a la mayor friabilidad de los primeros que provoca el desprendimiento de una cierta cantidad de finos; esta característica, junto con el mejor

acoplamiento de las partículas (Figura 36a), proporcionó una mayor compacidad al conjunto (Bustillo Revuelta, 2010). Este hecho, en cierto modo, contrarrestó la debilidad en las uniones interfaciales, lo cual se ha visto reflejado en su resistencia a 28 días, con disminuciones respecto del valor obtenido en el hormigón de referencia (55,42 MPa) del 7% para el premojado HR-G-1 y del 16% para los HR-G-2 y HR-G-4.

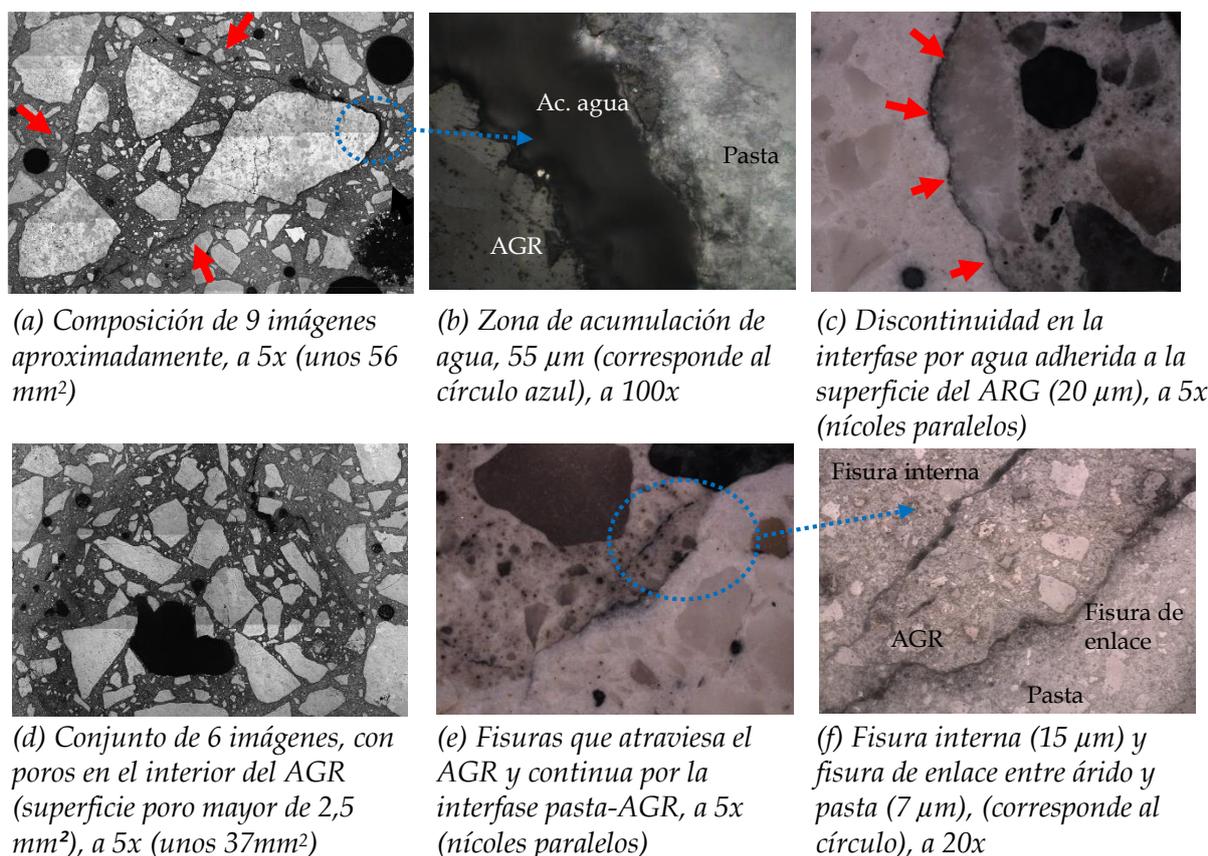


Figura 38. Análisis de imágenes de la muestra HR-G-4, con luz polarizada y nícoles cruzados

4.2.2.1.7. Microestructura de los hormigones HR-G-3 y HR-G-5

Finalmente, la estructura interna de los hormigones HR-G-3 (Figura 39) y HR-G-5 (Figura 40) se caracteriza por la presencia de una cierta cantidad de burbujas de aire alrededor de los áridos gruesos reciclados (Figura 39a-c), alineadas a modo de banda equidistante alrededor de su superficie, con un valor medio de 103 μm (Figura 40a-c), aunque con menos frecuencia que en el hormigón no premojado (HR-G-0). Este tipo de porosidad está provocada en el caso del HR-G-3 porque los áridos se premojaron con tan sólo el 12% del agua total durante 10 minutos (unión interfacial con baja relación a/c), lo que dio lugar a una consistencia plástica (4 cm de asiento), mientras que este fenómeno se produce en el HR-G-5 debido a que los áridos gruesos reciclados

se premojaron con el 80% del agua de amasado, pero sin añadir agua adicional a la mezcla (obteniendo una consistencia seca).

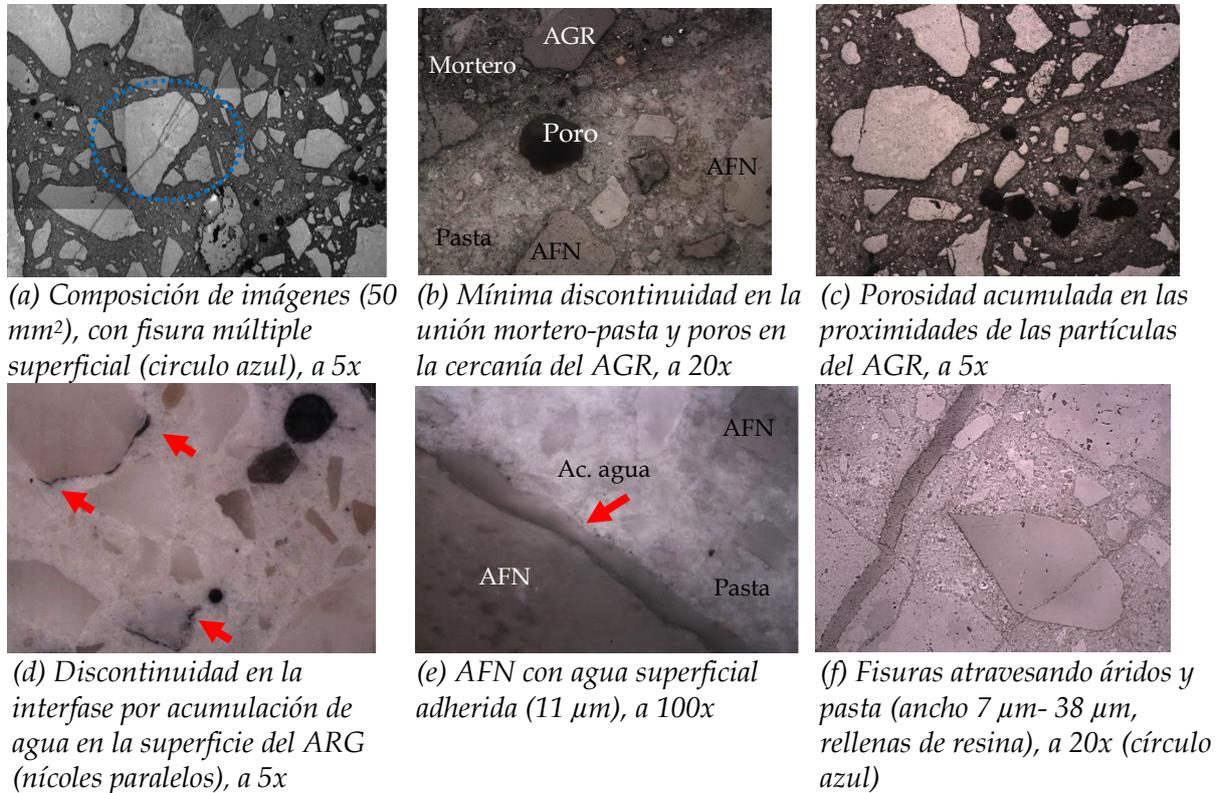


Figura 39. Análisis de imágenes de la muestra HR-G-3, con luz polarizada y nícoles cruzados

También se observa la acumulación de una pequeña capa de agua en zonas aleatorias de la superficie de algunos áridos (flechas en Figura 39d,e), que ha dado lugar a una mínima discontinuidad entre la pasta de cemento y el mortero adherido (Figura 39b y Figura 40c,e). Además de apreciarse la existencia de porosidad de mayor tamaño distribuida por toda la matriz que corresponde a poros de aire que quedaron atrapados durante el amasado y vertido del hormigón, cuya forma tiende a ser menos esférica a medida que aumenta su diámetro (Figura 39a) o los generados en el interior del mortero reciclado (Figura 40d). A pesar de ello, la estructura porosa generada, junto con otras de las cualidades de los áridos reciclados anteriormente mencionadas, han dado lugar a un adecuado comportamiento mecánico de dichos hormigones; similar al del fabricado con árido natural (55,42 MPa), en el caso de la serie premojada HR-G-5 o con una disminución de tan sólo el 9% en el hormigón HR-G-3.

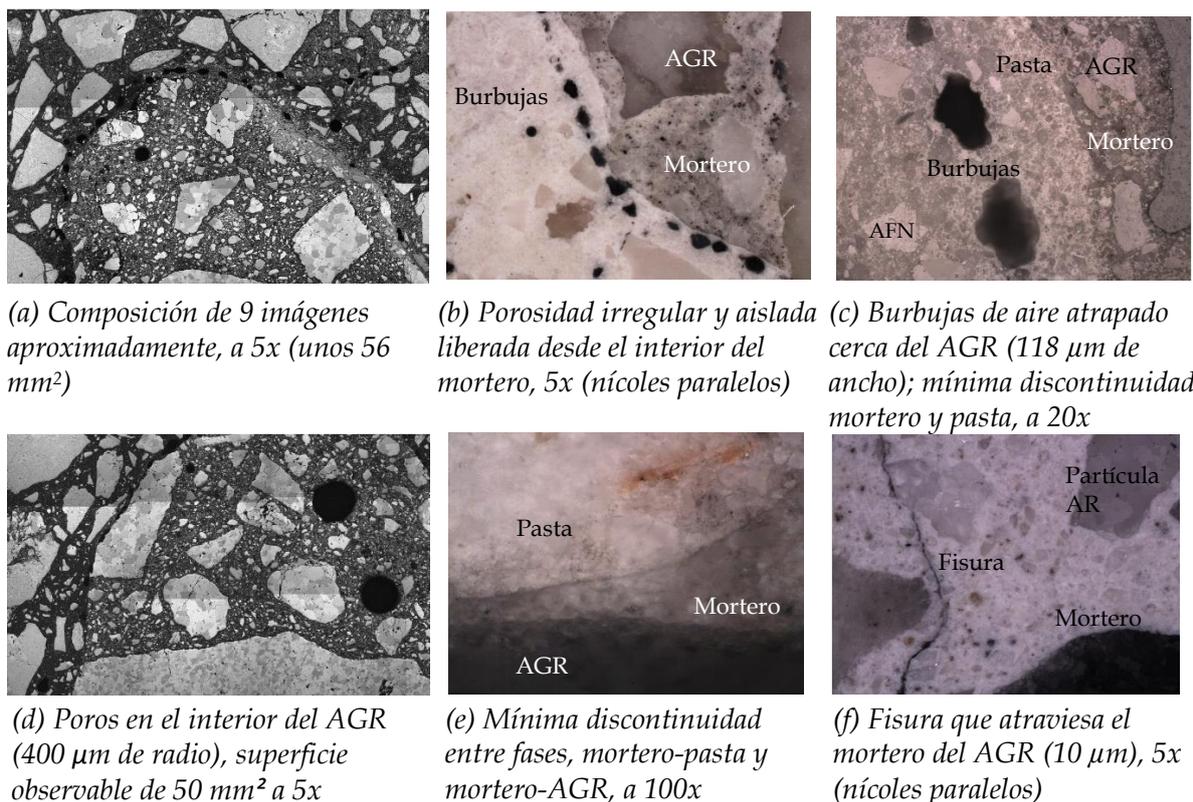


Figura 40. Análisis de imágenes de la muestra HR-G-5, con luz polarizada y nícoles cruzados

4.2.2.1.8. Fisuras en hormigones reciclados

En relación con la presencia de fisuras, éstas se observan en los hormigones reciclados con independencia del método de premojado utilizado, ya que son inherentes al material granular procesado por trituración (Nagataki et al., 2004; Tam et al., 2005; Lee y Choi, 2013). Las imágenes muestran que su presencia ha sido frecuente en los puntos de mayor fragilidad del árido reciclado, con espesores máximos de 20 a 40 μm y longitudes que dependen de la escala de observación utilizada (Figura 35f, Figura 36f y Figura 37e).

Las grietas ya existentes en el interior del árido reciclado generalmente se iniciaron en las zonas de transición mortero-árido cuando el hormigón original estuvo sometido a carga (Zheng et al., 2018), no precisando de niveles de energía muy elevados para que éstas se propagaran nuevamente, primero por la zona interfacial, después a través de la matriz de la nueva pasta de cemento hasta llegar a regiones más sólidas; esto dio lugar al debilitamiento de la unión AGR-pasta (a nivel resistente) y, por consiguiente, se condicionó su resistencia mecánica final (Puertas Maroto et al., 1991; Lee y Choi, 2013). Otras se formaron durante el proceso de endurecimiento del hormigón (Figura

38f y Figura 40f) a causa de la diferencia entre los módulos de elasticidad de los componentes en la interfase, dando lugar a mayores tensiones tangenciales, radiales y/o cortantes en esta zona (Sidorova, 2013; Al-bayati et al., 2016; Güneyisi, Gesoğlu, Kareem, et al., 2016). Por ello, durante el ensayo de rotura a compresión el hormigón reciclado rompe, con mayor frecuencia, por las grietas internas del árido reciclado, mientras que el natural lo puede hacer también por la zona de transición entre árido y pasta. Incluso se observan grietas que se han generado en las zonas más externas de la superficie de la muestra (Figura 37f y Figura 39a,e), producidas durante el proceso de preparación de las submuestras (Struble y Stutzman, 1989).

4.2.2.1.9. Porosidad cuantitativa (análisis de imágenes)

En cuanto al porcentaje medio de poros cuantificado a partir del análisis de las cuatro submuestras estudiadas (Tabla 30) el hormigón natural ha presentado una porosidad cerrada (5,4%) menor que los hormigones fabricados con árido reciclado, concentrándose principalmente entre los tamaños 10 y 100 μm (88,62%) y cuya morfología se presenta en formas mayoritariamente elípticas (68,57%). Dentro de los valores obtenidos en los reciclados la serie de hormigón no premojada muestra una de las porosidades más bajas, del 8,3%, con poros mayoritariamente comprendidos entre los tamaños 10 y 100 μm (80%) y de formas elípticas (60,69%), tal como se refleja en la Figura 35b,c. En el caso de las series de hormigón premojadas, el porcentaje de poros medido ha variado desde 7,8% (HR-G-5) al 11% (HR-G-3), con formas tanto irregulares (entre el 20% y el 35%) como elípticas (superior al 60%), y cuya distribución se concentra también en el intervalo 10-100 μm (80%, aproximadamente), incluyendo tanto a los poros que se han formado en el interior de la matriz de cemento como a los inherentes del árido reciclado.

En la Figura 41 se comparan los datos obtenidos en la porosidad cerrada de cada uno de los hormigones ensayados, junto con los valores de las variables que diferencian al método de premojado aplicado en cada caso (Tabla 29) y la desviación obtenida. Se puede observar un mayor volumen de poros en los hormigones reciclados respecto del obtenido en el hormigón de referencia (5,4%), con aumentos que han variado desde el 44% o 54% para los hormigones HR-G-5 (premojado, pero sin añadir agua adicional) y HR-G-0 (sin premojar), respectivamente, hasta más del doble para el resto de

hormigones premojados (HR-G-1 a HR-G-4). Dichas porosidades aumentan a medida que lo hace el contenido de agua total, lo cual viene a confirmar la influencia que tiene este parámetro sobre los resultados obtenidos; además de con lo obtenido por otros autores (Thomas García et al., 2019). Este hecho ha quedado constatado en las series de hormigón HR-G-1 a HR-G-4 en las que se observó una mayor acumulación de agua sobre la superficie de los áridos premojados, así como en el empeoramiento de su comportamiento mecánico. En cambio, en relación al resto de variables analizadas (agua y tiempo de premojado), en la Figura 41 se observa la escasa influencia de las mismas sobre los resultados obtenidos, confirmando los resultados discutidos en cuanto a la resistencia a compresión de las series de hormigón estudiadas.

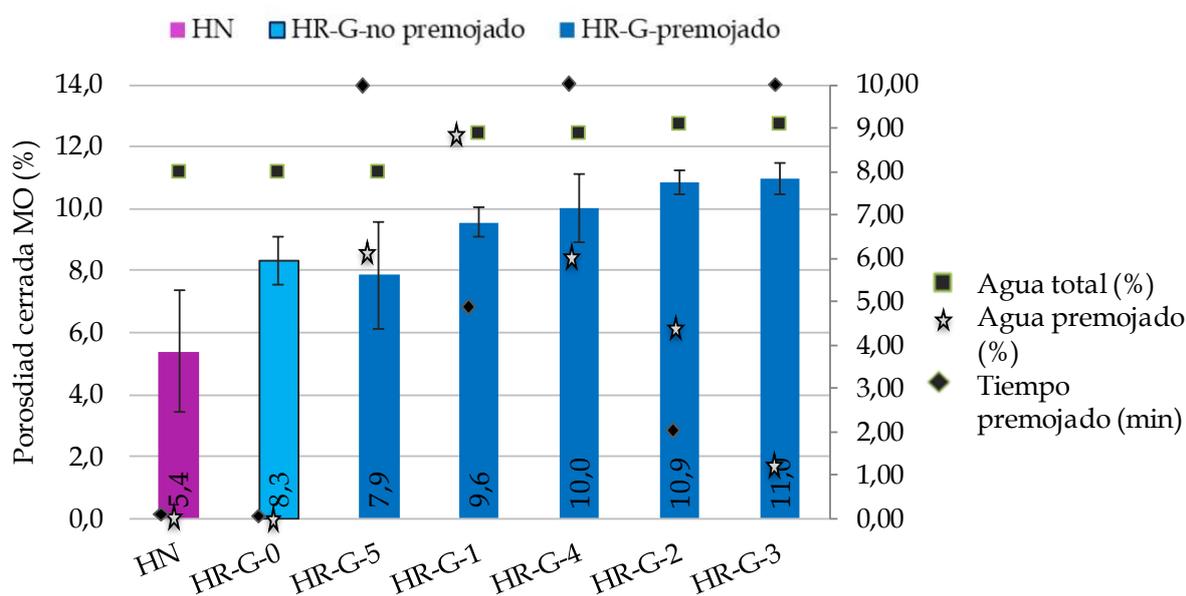


Figura 41. Porosidad de los hormigones observados mediante microscopía óptica (MO)

4.2.2.1.10. Distribución de poros según tamaño

La Tabla 30 muestra que la distribución de los poros en los hormigones evaluados ha mantenido una tendencia similar en todos ellos, con independencia del tipo de árido y método de premojado utilizado, mostrando que el rango máximo de poros se ha concentrado entre 10 y 100 μm , con un valor máximo de 91% (HR-G-2) y un mínimo del 75% (HR-G-4). Éstos corresponden a la porosidad generada en la matriz de cemento (tanto nueva como la vieja), que suele ser generalmente esférica y procede de burbujas de aire que se han quedado atrapadas durante el amasado y compactado del hormigón, con distribución aleatoria en el interior de la misma. Además, se incluyen

las pequeñas burbujas generadas en las proximidades de los áridos gruesos reciclados (Figura 35b, Figura 39c y Figura 40b), a causa de la gran diferencia de humedad entre el árido y la pasta, aunque, debido a que son sistemas de poros cerrados, su presencia no interviene en los fenómenos de transporte como la permeabilidad o la capilaridad (Segura Pérez, 2008). En cuanto al contenido de poros cuantificado en los tamaños superiores a 100 μm (hasta $> 1000 \mu\text{m}$), éste ha sido menos significativo, con porcentajes que oscilan entre el 7% (HR-G-4) y el 20% (HR-G-5); en este rango se incluyen a todos aquellos poros que han quedado retenidos entre o bajo los áridos de mayor tamaño por el mismo agua de exudación y que al evaporarse han dejado en su lugar estos vacíos con formas elípticas (Figura 34a, Figura 35d, Figura 36d y Figura 39a).

Teniendo en cuenta que esta porosidad afecta negativamente a la resistencia mecánica por su gran tamaño, además de jugar un papel importante de cara a la resistencia a las heladas (Benavente García, 2002; Aligizaki, 2006), su menor contenido influirá favorablemente en la menor degradación de los hormigones estudiados. Mientras que el porcentaje de poros medido en los tamaños más pequeños (1-10 μm) ha sido también poco representativo, con valores comprendidos entre el 1% (HR-G-5) y el 17% (HR-G-4); relacionados con poros capilares de tamaño mediado cuya influencia en la permeabilidad y en la resistencia se prevé mínima debido al escaso porcentaje que representan (Aligizaki, 2006).

4.2.2.1.11. Distribución de poros según la forma

Finalmente, los datos obtenidos de la morfología de los poros (Tabla 30) muestran la tendencia de éstos a formas elípticas, independientemente del tipo de hormigón analizado, con un valor mínimo del 60% (HR-G-0) y un máximo del 72% (HR-G-5) para las series no premojada y premojada pero sin añadir agua adicional, respectivamente. Esta porosidad, de acuerdo a lo observado en las imágenes analizadas, corresponde a las burbujas y poros de aire atrapadas en el interior de la pasta de cemento hidratada de radio variable (Figura 35c, Figura 37d, Figura 39c y Figura 40c), que ocupan los espacios intergranulares en la matriz y presentan una escasa o nula interconexión entre ellos, reduciendo con ello su influencia sobre la permeabilidad. En relación con el porcentaje de poros irregulares obtenido, éste representa, en cierto modo, la acumulación de agua en zonas interfaciales, observable



prácticamente en todos los tipos de hormigones, aunque con un valor mínimo cercano al 20% en el hormigón HR-G-5 y un máximo del 34% en el HR-G-1, correspondiendo con las series de premojado con menor relación a/c y la que mayor contenido en agua utilizó para el premojado de los áridos reciclados, respectivamente. Los poros circulares representan el menor porcentaje cuantificado, comprendido entre el 3% (HR-G-1) y el 16% (HR-G-0), los cuales hacen referencia a las burbujas esféricas de aire de radio superior a 10 μm . Dichos resultados contrastan con lo obtenido anteriormente en el análisis de imágenes.

4.2.2.1.12. Porosimetría por intrusión de mercurio

La porosidad en el hormigón está formada, por un lado, por los poros presentes en la pasta de cemento hidratada, tanto capilares (de 0,01 μm a 0,1 μm para una baja relación a/c y hasta 5 μm para una alta relación a/c) como de gel ($< 0,01 \mu\text{m}$); por el otro, se encuentran aquellos poros contenidos en los áridos reciclados, cuyo tamaño varía en un amplio rango, incluso los poros más pequeños son mayores que los poros de gel de la pasta de cemento (Neville y Brooks, 2010; Jiménez y Moreno, 2015). Teniendo en cuenta estos aspectos, y a pesar de las limitaciones que pueda presentar la técnica de porosimetría (Abell et al., 1999; Diamond, 2000; Benavente García, 2002; Kumar y Bhattacharjee, 2003; Aligizaki, 2006), los datos que proporciona complementan a los obtenidos mediante el análisis de imágenes y, generalmente, permiten obtener una información útil sobre la estructura de los materiales; además se consigue una mejor aproximación al sistema poroso del hormigón, especialmente en los poros de menor tamaño que están presentes en la pasta de cemento (Galán García, 2011).

En la Figura 42 se muestran los resultados del ensayo de porosimetría de mercurio de todos los hormigones ensayados, en función del porcentaje de poros abiertos y las variables del método utilizado para la fabricación de cada uno de ellos. En la Figura 43 se analiza la distribución de su estructura porosa dada la importancia de la distribución de los poros y el tamaño que éstos presentan en la durabilidad del hormigón. Los datos medios obtenidos muestran menor porosidad por intrusión de mercurio en el hormigón de referencia (5,6%) frente a los reciclados (HR-G-0 a HR-G-5); el porcentaje de variación máximo encontrado en el premojado HR-G-2 fue del 33%, debido a su mayor contenido de agua total (9,1%); por el contrario la mínima diferencia

fue del 5,6% y se obtuvo en el hormigón HR-G-5, correspondiente al método de premojado que no varió su relación a/c total y cuyos datos de porosidad y resistencia mecánica a 28 días fueron similares a los obtenidos en el natural (55,42 MPa).

Estos resultados confirman, nuevamente, la influencia que ejerce la variable del contenido en agua total sobre la porosidad accesible de los hormigones fabricados con árido reciclado (Figura 42), de forma similar a lo obtenido en el análisis de la porosidad por microscopía óptica (Figura 41), así como en la resistencia. Este hecho se debe a que el incremento de este parámetro, necesario para compensar la mayor demanda de agua de los áridos reciclados, provoca de forma directa el aumento en el contenido de poros abiertos y una reducción de la resistencia (HR-G-2, HR-G-3 y HR-G-4). Similares observaciones se muestran en la literatura consultada (Uchikawa y Hanehara, 1996) con porosidades máximas entre el 12% y 15% para hormigones fabricados con árido grueso reciclado (Gómez-Soberón, 2002; Juan-Valdés et al., 2018).

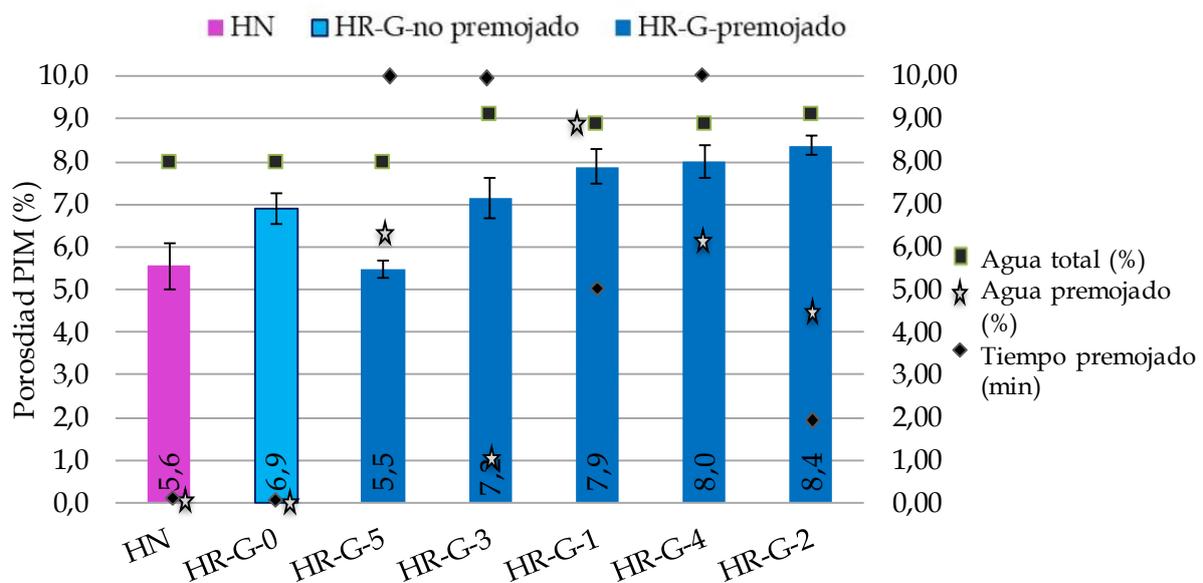


Figura 42. Porosidad accesible al mercurio de los hormigones analizados según la técnica de porosimetría de mercurio (PIM)

Finalmente, la distribución en el porcentaje de poros abiertos de la Figura 43 refleja la mayor concentración de éstos en el intervalo 0,01 μm -1 μm , para todos los hormigones estudiados, correspondiendo a pequeños capilares. Este resultado podría implicar una mayor permeabilidad o absorción por capilaridad del material, siempre que dichos poros estén conectados por una red de intersticios que permita que el fluido atraviese la sustancia sólida (Aligizaki, 2006). Cabe destacar el menor porcentaje de poros de

radio inferior a $0,1 \mu\text{m}$ del hormigón no premojado HR-G-0 (44,97%), lo que proporcionaría a este hormigón mejores prestaciones frente a la durabilidad, ya que los poros tan pequeños no permiten la movilidad de los líquidos y, consecuentemente, la degradación del material sería muy lenta (Ye, 2003).

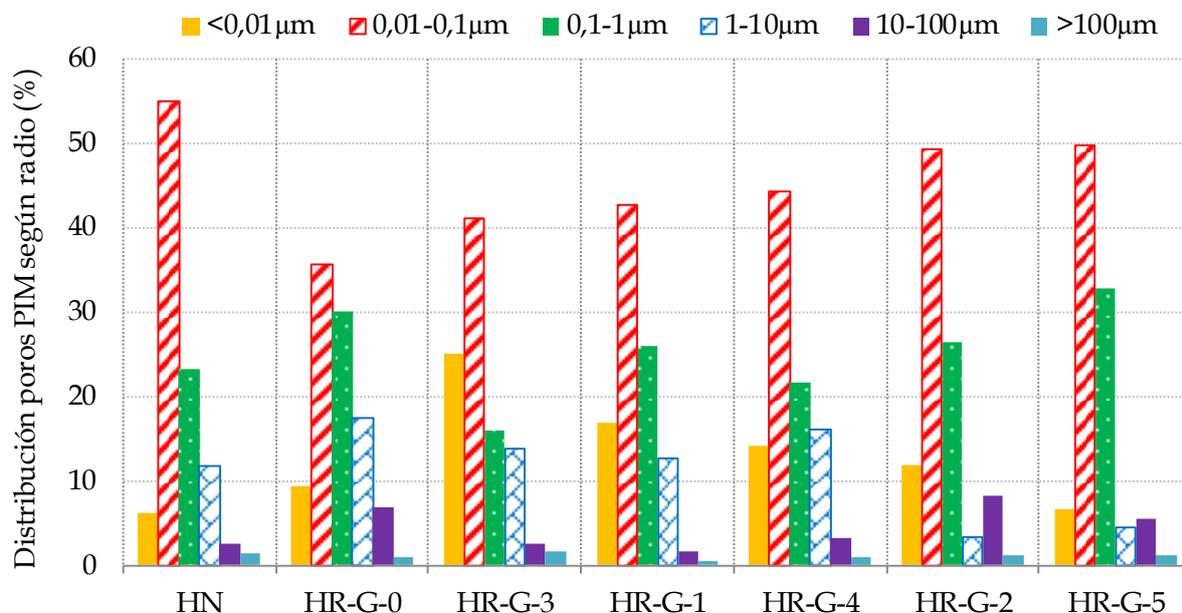


Figura 43. Porcentaje de poros en el intervalo comprendido entre $0,01$ y $100 \mu\text{m}$, obtenido por porosimetría

En este sentido, en la bibliografía consultada (Sagoe-Crentsil et al., 2001; Sánchez de Juan, 2004; Bustillo Revuelta, 2010; Rodríguez Robles, 2016) se confirma que el mayor incremento de poros observado en todos los hormigones (intervalo $0,01-0,1 \mu\text{m}$) corresponde efectivamente con la porosidad capilar que se forma en la pasta de cemento y en el mortero adherido que incorporan los áridos reciclados (Aligizaki, 2006). El contenido más elevado de poros en el rango de $0,1-10 \mu\text{m}$ puede explicarse por las microfisuras producidas durante el proceso de procesamiento y trituración de estos áridos (Müller y Winkler, 1998; Bustillo Revuelta, 2010). Por último, los poros superiores a $10 \mu\text{m}$ corresponden a las burbujas de aire retenido durante el mezclado y compactado del hormigón, tal y como se ha visto anteriormente mediante el análisis de imágenes.

4.2.2.2. Consideraciones particulares del estudio de premojado

Los resultados obtenidos tras el análisis comparativo de los diferentes métodos de

premojados sobre hormigones elaborados con áridos gruesos reciclados han puesto de manifiesto que, a pesar de la mayor porosidad inherente del mortero de cemento adherido a los áridos reciclados y del consiguiente aumento en su capacidad de absorber agua, el método de premojado utilizado o más bien la cantidad de agua adicional añadida a la mezcla influye de forma considerable en la trabajabilidad obtenida, así como en la formación de su microestructura y, consecuentemente, en el desarrollo de su resistencia a compresión.

El premojado de los áridos gruesos reciclados ha proporcionado una mejora en la trabajabilidad de los hormigones reciclados (con un tiempo teórico recomendable de 10 minutos y un contenido adicional de agua de premojado acorde a la mayor demanda de agua de estos áridos), además de un rápido crecimiento de la resistencia en los primeros 7 días. Sin embargo, el estudio de la caracterización del sistema poroso ha demostrado que los áridos premojados, en función del método aplicado (relación a/c total variable), han generado un enlace interfacial áridos reciclados-pasta de cemento más poroso, lo cual se ha visto reflejado en el empeoramiento de su resistencia a compresión a 28 días.

El uso de áridos gruesos reciclados sin premojar ha dado lugar a hormigones poco trabajables, aunque a nivel de su microestructura se ha observado que la escasa interconexión de los poros formados alrededor de los áridos reciclados ha generado un enlace árido-pasta más fuerte, permitiendo un excelente desarrollo de su resistencia a compresión, lo que reducirá su influencia sobre la durabilidad.

Por tanto, teniendo en cuenta la complejidad y los costos más elevados involucrados en la implantación de técnicas de premojado a escala industrial, se puede concluir que para la producción a gran escala de productos de hormigón no estructural con árido reciclado, el método de dosificación más óptimo es aquel que utiliza los áridos en su estado natural, es decir, sin necesidad de premojarlos, lo que conlleva incorporar una dosis óptima de aditivos superplastificantes con el objeto de aumentar su trabajabilidad, favoreciendo su docilidad, además de su compactación.



4.2.3. Dosificación definitiva

Los resultados obtenidos hasta el momento han permitido conocer, que:

- Mediante el uso de la dosificación inicial, premojando los áridos reciclados durante 10 minutos con el 80% de su WA_{24h} , la consistencia deseada sólo se alcanzó al usar la fracción gruesa del árido reciclado.
- Del estudio de comparativo de varios métodos de premojado, el premojado de los áridos gruesos reciclados sólo benefició a las resistencias en los primeros días y únicamente mejoró la trabajabilidad cuando éstos se premojaron durante 10 minutos con un contenido adicional de agua de premojado (acorde a su mayor demanda de agua).
- Las resistencias obtenidas a 28 días, según ambas fases experimentales, fueron innecesarias para hormigones de uso no estructural, además de ser superiores a las establecidas para la clase de hormigón a fabricar.

En consecuencia, y con la finalidad de obtener un hormigón reciclado de resistencia característica 35 MPa, recomendable para prefabricados de mobiliario urbano (AEN/CTN 127, 2004a), se planteó un ajuste en la dosificación inicial partiendo de los datos preliminares. Se optó por:

- Optimizar la relación a/c (0,45) y el contenido de cemento (350 kg/dm^3) para minimizar los impactos ambientales que provienen del mismo (Calkins, 2009; Akhtar y Sarmah, 2018).
- Ajustar el contenido de aditivo para cubrir la pérdida de agua libre en la mezcla debido a la mayor absorción de los áridos reciclados y, de esta forma, asegurar que la docilidad de todos los hormigones fuese similar (consistencia blanda).
- Utilizar los áridos reciclados sin premojar. En base a esto, se fabricó un hormigón natural, usado como referencia (HN) y dos tipos de hormigones reciclados, uno reemplazando la fracción gruesa de los áridos naturales por reciclados (HR-G) y otro sustituyendo totalmente unos áridos por otros (HR-T). La decisión final de fabricar este último hormigón tuvo por objeto comprobar que a partir del ajuste realizado en la dosificación el efecto combinado de ambas fracciones podía dar

lugar a un hormigón tan duradero como lo pueda ser el producido con árido grueso reciclado. Además, el número de estudios publicados hasta la fecha en los que se usa la totalidad de los áridos reciclados para fabricar hormigón es minoritario, en comparación con todos los existentes que utilizan la fracción gruesa reciclada (Verian et al., 2018).

El diagrama de flujo de la Figura 44 muestra el procedimiento seguido en la fabricación de los hormigones indicados según la dosificación definitiva, así como las diferencias entre cada uno de ellos, cuyos resultados se analizan a continuación.

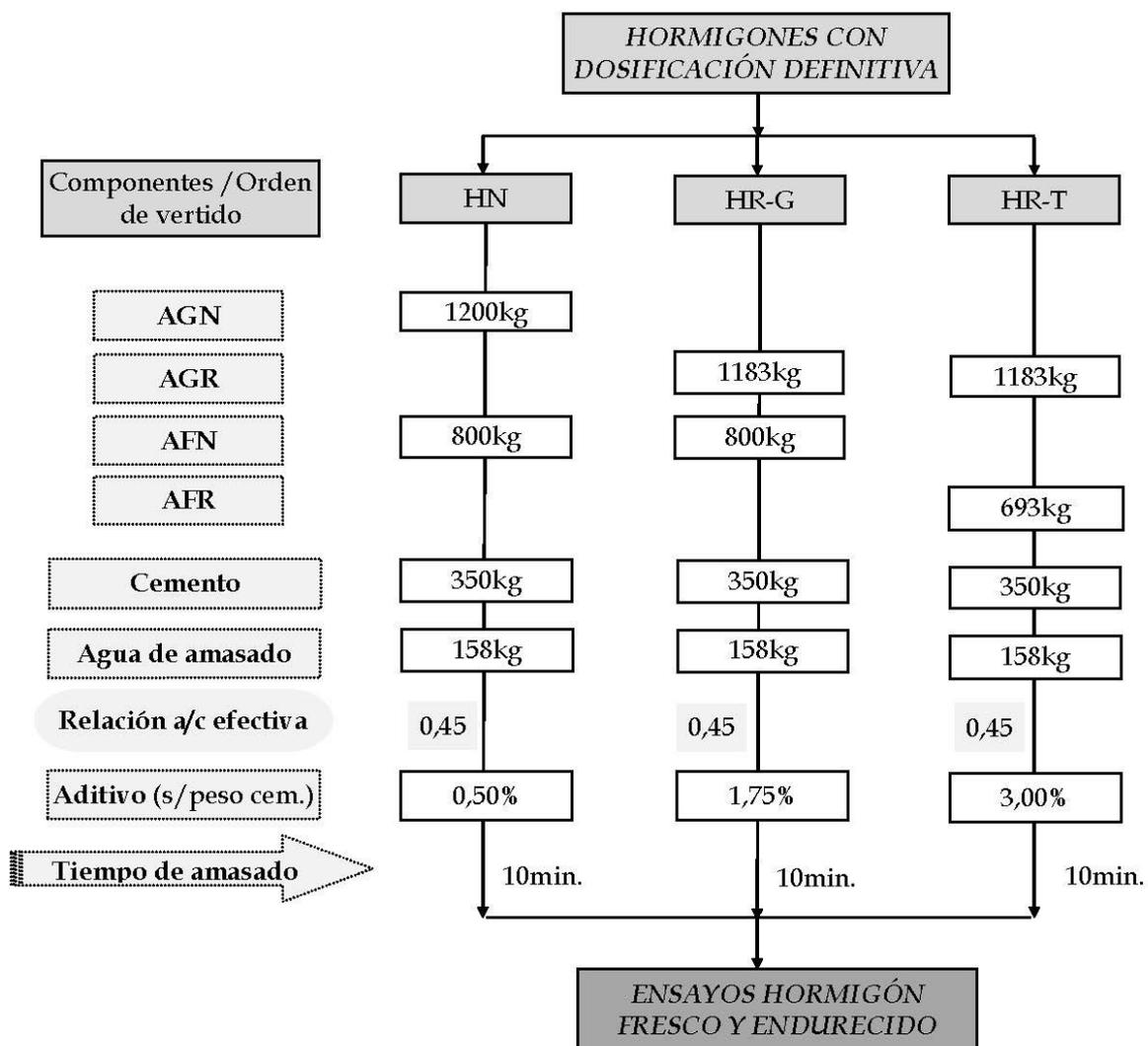


Figura 44. Proceso de elaboración de hormigones según la dosificación definitiva (en peso)

4.2.3.1. Propiedades del hormigón fresco

Dentro de los requisitos técnicos que establece la normativa para el material utilizado



en los productos prefabricados (AEN/CTN 127, 2004a) no existe limitación alguna para el contenido de aire, ni tampoco para la densidad. No obstante se trata de parámetros que permiten caracterizar las mezclas de hormigón en estado fresco, además de la trabajabilidad, y a su vez permiten evaluar y controlar la calidad del hormigón endurecido (Fernández Cánovas, 2013; Ismail y Ramli, 2014). Por este motivo se han evaluado dichas propiedades, cuyos valores medios y la desviación estándar correspondiente se muestran en la Figura 45 y en la Figura 46, respectivamente y son analizadas a continuación.

4.2.3.1.1. Contenido de aire

Por lo general, no existe una relación clara entre el porcentaje de árido reciclado utilizado y el contenido total de aire obtenido en la mezcla (Bustillo Revuelta, 2010; Kurda et al., 2017), aunque teóricamente el uso de este material granular más poroso dota al hormigón de un mayor porcentaje de aire atrapado (González-Fonteboa, 2002; Katz, 2003; Larbi et al., 2015; Cantero et al., 2018). En diversos estudios este contenido ha variado desde el 13% (Tahar et al., 2016) al 25% (Omary et al., 2016) en hormigones con árido grueso reciclado y entre el 38% (Omary et al., 2016) y el 60% (Kurda et al., 2017) al usar la totalidad de estos áridos, respecto del correspondiente hormigón de referencia.

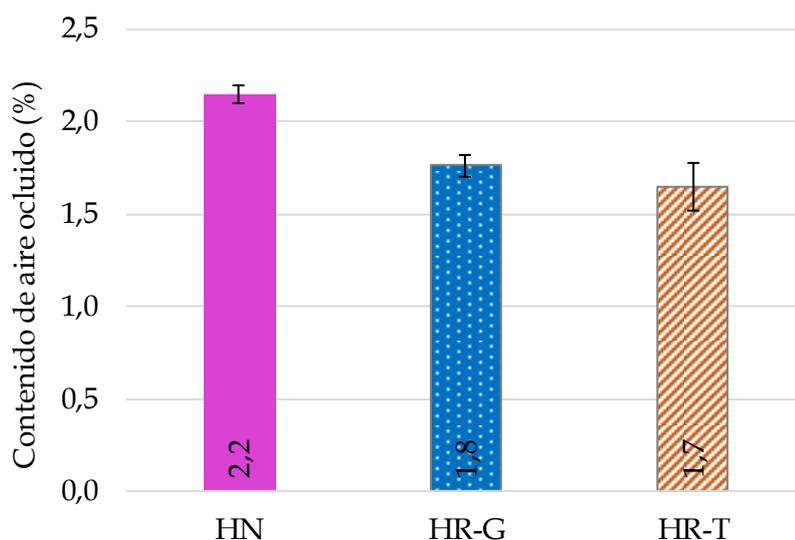


Figura 45. Contenido de aire en el interior de los hormigones fabricados

Los resultados del contenido de aire ocluido de los hormigones reciclados fabricados (Figura 45), por el contrario, muestran un menor valor en este parámetro en

comparación con el natural (2,2%), con reducciones que han variado entre el 18% y del 23% para los hormigones reciclados HR-G y HR-T, respectivamente.

Este hecho se debe al mayor contenido de aditivo superplastificante de alta actividad utilizado en los hormigones reciclados que favorece la menor formación de aire atrapado en su interior (López Orozco, 2004; Tahar et al., 2016). Además, las bajas relaciones a/c utilizadas en la fabricación de dichos hormigones han hecho que la mezcla sea más cohesiva, lo que ha ayudado a reducir la segregación y el sangrado (Sánchez de Juan, 2004; Kurda et al., 2017), contribuyendo adicionalmente a disminuir la formación de estas burbujas atrapadas. Otros estudios han aportado reducciones similares a las obtenidas en este trabajo (Barbudo et al., 2013; Larbi et al., 2015) o, incluso, descensos máximos en este parámetro del 30% (Sánchez de Juan, 2004).

4.2.3.1.2. Densidad en fresco

De acuerdo a lo reflejado en la Figura 46 los hormigones reciclados ensayados muestran una menor densidad que el hormigón natural (2,47 kg/dm³), consecuencia de la menor densidad de los áridos reciclados utilizados en su fabricación. Las disminuciones varían entre el 2,6% si se usa solo la fracción gruesa (HR-G) y el 4,1% al utilizar la totalidad de los mismos (HR-T).

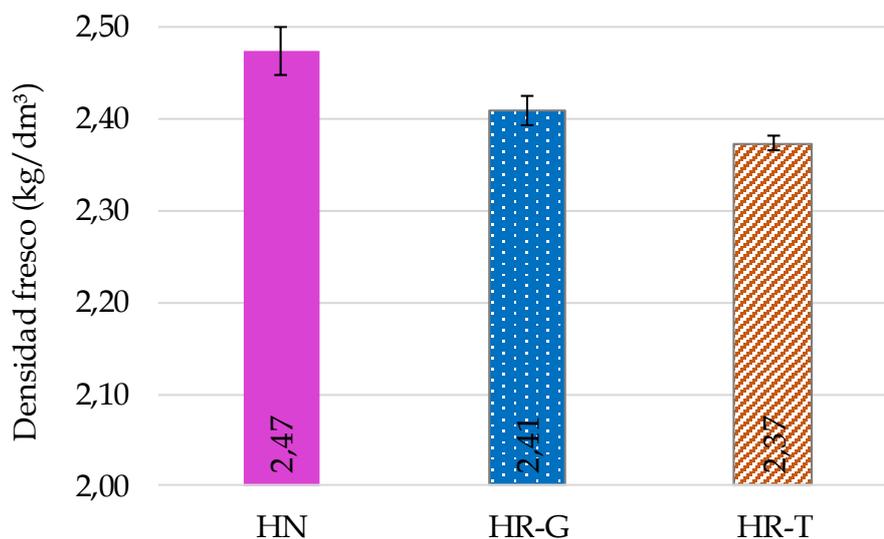


Figura 46. Densidad en estado fresco de los hormigones ensayados

Los resultados obtenidos, si bien son semejantes a los publicados en otros estudios (Tahar et al., 2016), se pueden considerar bajos, ya que se han llegado a publicar



reducciones de densidad de hasta el 12% al usar el árido grueso reciclado (Katz, 2003; Jiménez, Cristián et al., 2013) y del 8% aproximadamente al utilizar la fracción fina junto con la gruesa (Gesoglu, Güneyisi, Öz, Taha, et al., 2015; Kurda et al., 2017). Los menores porcentajes de reducción obtenidos en este parámetro son compatibles con el bajo contenido de aire atrapado observado en los hormigones reciclados, así como por el uso de aditivo superplastificante que ha evitado un mayor descenso de la densidad, proporcionando a su vez una similar compacidad en todas las mezclas, lo que se verá reflejado en una durabilidad y propiedades mecánicas mejoradas (González-Fonteboa, 2002; Katz, 2003; Barbudo et al., 2013; Agrela et al., 2013; Larbi et al., 2015; Tahar et al., 2016; Omary et al., 2016).

4.2.3.2. Propiedades físicas

La norma UNE-EN 13198 requiere que los hormigones utilizados en elementos prefabricados para uso externo cumplan con el requisito de absorción de agua (Tabla 23), en función de que éstos estén sometidos a condiciones de hielo-deshielo con y sin sales descongelantes, del 6% y 7%, respectivamente (AEN/CTN 127, 2004a). En consecuencia, ha sido necesario analizar esta propiedad.

Además, en este apartado se ha incluido el estudio de la densidad tras el secado en estufa y la velocidad de ultrasonidos, si bien no existe requisito normativo para estos parámetros. El análisis de la densidad del hormigón endurecido está justificado debido a su menor densidad en estado fresco (Chakradhara Rao et al., 2011; Martín-Morales et al., 2017). En cuanto a la velocidad de ultrasonidos, ésta técnica se emplea para la evaluación de la resistencia in-situ de elementos prefabricados de hormigón (AEN/CTN 83, 2009i), además de como ensayo de información complementaria para evaluar la calidad del hormigón por su relación directa con la compacidad, elasticidad, porosidad y densidad del material a través del cual pasa la onda ultrasónica (Naik et al., 2004; Kou et al., 2012).

Los valores medios obtenidos para los tres ensayos indicados y su desviación estándar se muestran entre la Figura 47 y la Figura 49. Estos resultados son analizados y discutidos a continuación.

4.2.3.2.1. Absorción de agua

En la Figura 47 se muestran los resultados de absorción de agua obtenidos en los hormigones evaluados. Se observa que los fabricados con material reciclado presentan valores superiores en este parámetro que el producido con árido natural (1,7%), con variaciones que han oscilado entre el 5,8% al utilizar la fracción gruesa del árido reciclado y el 35% al sustituir totalmente unos áridos por otros. En cualquier caso, todos los valores obtenidos al utilizar árido reciclado se encuentran por debajo del máximo establecido por la norma de elementos prefabricados (6%).

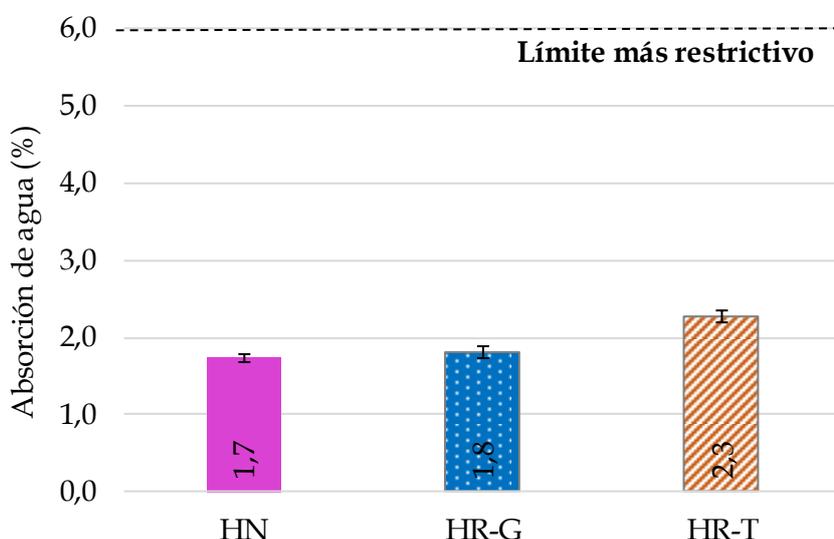


Figura 47. Absorción de agua de los hormigones ensayados, junto con la limitación exigible

El incremento del valor de esta propiedad se atribuye a la mayor porosidad observada en el árido reciclado, condicionada por la fracción del árido reemplazada (áridos naturales, AFN: 1,0% y AGN: 0,7%, frente a los reciclados, AFR: 5,2% y AGR: 2,1%). Además de por la calidad y naturaleza de los materiales granulares utilizados, tal y como han puesto de manifiesto otros autores (Poon et al., 2002; López Gayarre et al., 2013; Verian et al., 2018), principalmente por la naturaleza más porosa del árido reciclado, que conduce a un aumento general de los poros abiertos en la matriz de cemento y, consecuentemente, a una mayor capacidad de absorber agua.

A pesar del incremento observado en el coeficiente de absorción de agua en el caso de hormigones fabricados con áridos reciclados, los valores obtenidos han sido inferiores a los referenciados en la bibliografía consultada. En ella se justifican aumentos en la absorción de agua que variaron entre el 8,5% (Thomas García, 2012) y en torno al 30%

(López Gayarre et al., 2009; Pedro et al., 2017) al usar áridos gruesos reciclados; entre el 42% (árido reciclado de hormigón) y el 60% (residuo mixto) con la incorporación de ambas fracciones (López Gayarre et al., 2013; Martín-Morales et al., 2017) o, incluso, llegar a triplicar el valor de referencia al utilizar materiales obtenidos del rechazo de la industria cerámica (Suárez González et al., 2017).

4.2.3.2.2. Densidad del hormigón endurecido

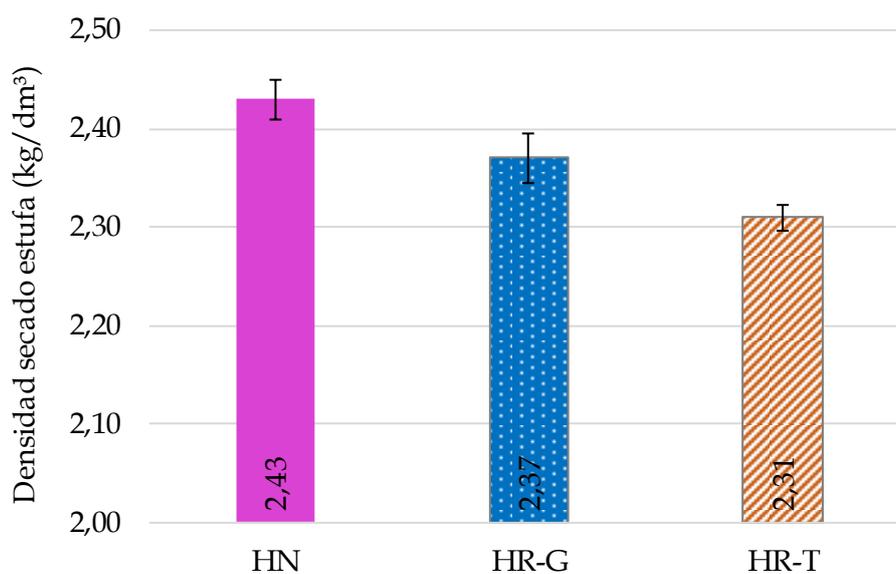


Figura 48. Densidad tras secado en estufa de los hormigones ensayados

En la Figura 48 se puede observar que, al igual que ocurría en el caso de la densidad en estado fresco, esta propiedad está estrechamente relacionada con la densidad de los áridos utilizados (Sánchez de Juan, 2004; López Gayarre, 2008), ya que éstos constituyen un elevado porcentaje sobre los componentes del hormigón (del orden del 80%). En este sentido, los hormigones reciclados presentan unas reducciones de la densidad en el hormigón en estado endurecido similares a las obtenidas en el caso del fresco, con descensos del 2,5% al incorporar los áridos gruesos reciclados (HR-G) y del 4,9% al sustituir todo el árido natural por reciclado (HR-T), en comparación con la densidad del hormigón natural (2,43 kg/dm³). La disminución en este parámetro está condicionada por el mortero adherido, que contiene un mayor volumen de poros y microfisuras en su interior, lo que proporciona una menor densidad a estos áridos (Sánchez de Juan, 2004) y, consecuentemente, al material fabricado con ellos (Hansen, 1986).

Si bien estas variaciones son poco significativas si se contrastan con las publicadas en

otros estudios, que han alcanzado valores del 7% al reemplazar la grava reciclada (Ferreira et al., 2011; Thomas García, 2012; Abdulla, 2015) y entre el 9% (Hadjieva-Zaharieva et al., 2003) y el 13% (Kurda et al., 2018) al sustituir totalmente el árido natural por reciclado, éstas se consideran favorables de cara a la resistencia y a la durabilidad del hormigón endurecido producido con árido reciclado (Martín-Morales, Zamorano, et al., 2013).

4.2.3.2.3. Velocidad de los impulsos ultrasónicos

Los resultados de la velocidad de propagación de los impulsos ultrasónicos a través de los hormigones estudiados a diferentes edades (7, 28 y 120 días) se presentan en la Figura 49. En ella se comprueba que los valores obtenidos han disminuido con el uso del árido grueso reciclado (HR-G) y, en mayor medida, al utilizar la fracción fina del árido reciclado (HR-T), aunque se observa un leve aumento en los valores con el tiempo de curado.

Si se compara la velocidad obtenida en el hormigón natural a 7, 28 y 120 días (4,94 km/s, 5,01 km/s y 5,08 km/s, respectivamente) se observan mayores valores en éstos con respecto a los reciclados. Concretamente se han obtenido velocidades un 7% y 12% menores para el hormigón HR-G y el HR-T, respectivamente, en todas las edades estudiadas. La reducción de la velocidad de ultrasonidos de los hormigones reciclados se justifica por el descenso obtenido anteriormente en la densidad, que a su vez provoca una pérdida en la capacidad de propagación de las ondas, siendo ésta mayor al incorporar la totalidad de los áridos reciclados (Thomas García, 2012; González-Corominas y Etxeberria, 2014a).

La literatura relacionada con esta temática (Kou et al., 2012; Soares et al., 2014a; Kou y Poon, 2015) ha mostrado porcentajes de variación similares al usar áridos reciclados de hormigón. Así, en hormigones con la fracción gruesa reciclada éstos oscilaron entre el 7% (Latif Al-Mufti y Fried, 2012) y el 16% (López-Uceda, Ayuso, Jiménez, et al., 2016) a edades tempranas; entre el 3,6% (Thomas García, 2012) y el 24% (López-Uceda, Ayuso, Jiménez, et al., 2016) a los 28 días; y para los 120 días, la diferencia entre el hormigón natural y el reciclado fue del 12% (López-Uceda, Ayuso, Jiménez, et al., 2016). En cambio, para el reemplazo total los datos publicados son escasos, aunque han mostrado descensos que oscilaron entre el 15% (Kurda et al., 2018) y el 23%

(Suárez González et al., 2017) a los 28 días y en torno al 11% a edades más avanzadas de curado, 90 y 180 días (Kurda et al., 2017).

En cuanto a la evolución de la velocidad con respecto a la edad del hormigón (de 7 a 120 días) se observa un leve aumento a medida que avanza el tiempo de curado, calculado en un 2,8% en el hormigón natural, del 1,5% en el reciclado con árido grueso reciclado (HR-G) y del 2,3% en el reciclado con el reemplazo total (HR-T). Esto se debe al crecimiento de productos de hidratación con el paso del tiempo y, en consecuencia, a la disminución del volumen de poros capilares en la pasta, lo que permite el aumento progresivo de la velocidad de ultrasonidos del hormigón (SriRavindrarajah et al., 1988; Kou et al., 2012). El mayor incremento observado en el caso del hormigón fabricado con la totalidad de los áridos reciclados, respecto al que incorpora sólo la fracción gruesa reciclada, se justifica por la presencia de partículas adicionales de cemento no hidratado del mortero adherido que reaccionan y dan lugar a nuevos productos de hidratación con el tiempo (Khatib, 2005; Evangelista et al., 2015).

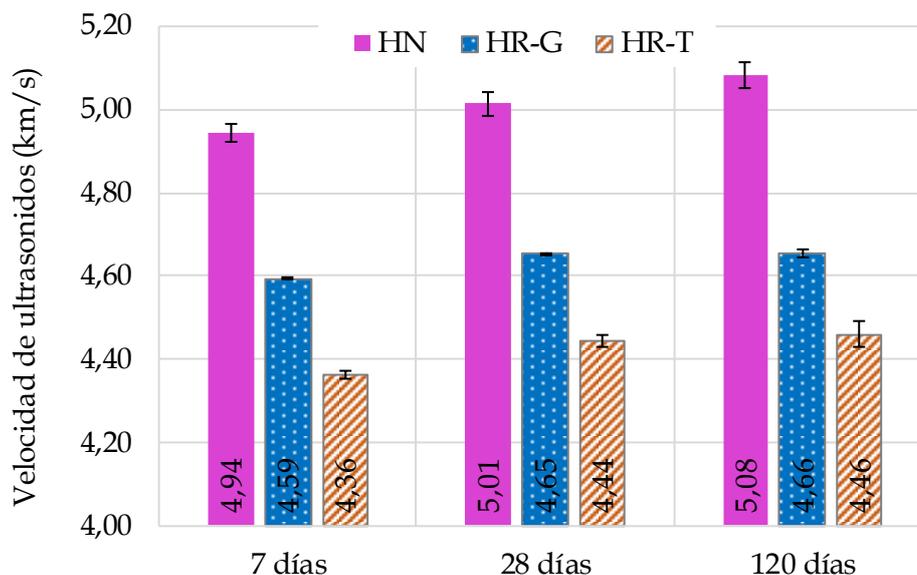


Figura 49. Velocidad de ultrasonidos a 7, 28 y 120 días de los hormigones fabricados

Los valores observados en otros estudios varían dependiendo de la naturaleza del árido reciclado utilizado (Kurda et al., 2018), entre otros factores (condiciones de curado o conexión de los poros). Así la bibliografía consultada ha publicado variaciones en el tiempo ligeramente superiores a las obtenidas en este estudio, que oscilaron entre el 6% al utilizar áridos reciclados cerámicos (López-Uceda, Ayuso, Jiménez, et al., 2016) y el 38% para áridos mixtos, desde 1 a 90 días (Kou et al., 2012).

4.2.3.3. Propiedades mecánicas

En relación a los requisitos que debe de cumplir el hormigón destinado a la fabricación de productos no estructurales, desde el punto de vista mecánico, se encuentra únicamente la clase mínima de resistencia del material, que debe ser de C30/37 para condiciones de uso externo sometidos a hielo-deshielo sin sales descongelantes o, en el caso más desfavorable, de C35/45, cuando exista el contacto del hormigón con este tipo de sales (AEN/CTN 127, 2004a).

Diversos estudios relacionados con la prefabricación, sin embargo, realizan también los ensayos de flexión y de módulo de deformación (estático y dinámico). El de flexión se realiza principalmente en hormigones sometidos a esta condición, como puede ser el caso de piezas cuya longitud predomina sobre su anchura (Soutsos et al., 2012; Jankovic et al., 2012; Rodríguez Robles, 2016; Juan-Valdés et al., 2018). El módulo de deformación se considera interesante para determinar cómo trabajará el material al formar parte de un elemento prefabricado no estructural, estudiándose como método de ensayo de información complementaria, por su relación directa con la resistencia del hormigón (Malhotra y Sivasundaram, 2004; Gencel et al., 2012).

En consecuencia, en este apartado se analizan los resultados obtenidos de las tres propiedades indicadas; entre la Figura 50 y la Figura 54 se muestran los datos medios y la desviación estándar correspondiente.

4.2.3.3.1. Resistencia a compresión

Los resultados obtenidos del ensayo de resistencia a compresión llevado a cabo sobre los hormigones evaluados a tres edades distintas, 7, 28 y 120 días (Figura 50), muestran que los valores decrecen con el uso del árido reciclado, siendo mayor en el caso en el que se sustituye la totalidad de este tipo de material. Concretamente, la resistencia a compresión del hormigón fabricado con la fracción gruesa ha variado un 3%, un 13,2% y un 21,7%, con respecto a los valores obtenidos en el hormigón natural a 7 días (41,97 MPa), 28 días (49,15 MPa) y 120 días (64,15 MPa), respectivamente. En cambio, en el hormigón fabricado con un reemplazo total de árido reciclado el porcentaje ascendió a valores del 17,2% a los 7 días, del 20,5% a los 28 días y del 25,5% a los 120 días de curado.

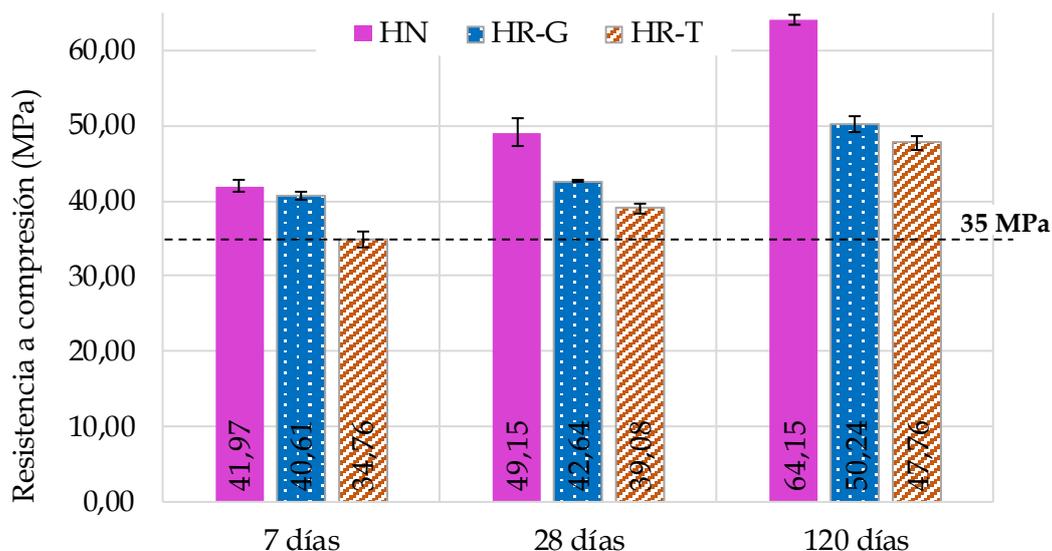


Figura 50. Resistencia a compresión a 7, 28 y 120 días de los hormigones fabricados, junto con el valor exigido más restrictivo (AEN/CTN 127, 2004a)

Estos resultados se encuentran dentro de los valores publicados por otros autores, que mostraron variaciones en este parámetro muy amplias, oscilando entre el -46% (Katz, 2003) y el +29% (Barbudo et al., 2013) a los 7 días y entre un -37% (Kou et al., 2012) y un +40% (de Brito et al., 2016) a los 28 días al reemplazar la fracción gruesa del árido natural por reciclado. En el caso de sustituciones totales de un árido por otro, la pérdida de resistencias varió entre el 4% (Corinaldesi y Moriconi, 2009) y el 44% (Kurda et al., 2018) en los primeros días de edad, mientras que a los 28 días se han publicado descensos que oscilaron entre el 6% (Omary et al., 2016) y el 30% (Hadjieva-Zaharieva et al., 2003; Dilbas et al., 2017; Suárez González et al., 2017). Estas fluctuaciones en los porcentajes encontrados en la literatura se deben principalmente a diferencias en la dosificación (relación a/c), a la calidad del árido reciclado o al uso de superplastificantes de alta actividad, entre otros factores, por lo que en ciertas ocasiones dificulta la comparación directa entre resultados (Nepomuceno et al., 2018).

Aunque las disminuciones obtenidas en esta propiedad mecánica se justifican debido a la influencia que ejercen diversos factores sobre la misma (de Brito et al., 2018), fundamentalmente se atribuye a la menor resistencia observada en el árido reciclado a ser fragmentado (ensayo de desgaste de Los Ángeles), además de a su menor densidad y mayor absorción, en virtud de la porosidad más alta que proporciona el mortero adherido. A pesar de ello, en todos los casos los hormigones fabricados con

árido reciclado alcanzaron la resistencia a compresión requerida para ser utilizados en prefabricados y expuestos a las condiciones de intemperie más desfavorables (de 35 MPa a 28 días). Igualmente, cabe destacar que la máxima reducción obtenida en el hormigón HR-T, respecto al HN, de un 20,5%, es significativamente menor que la obtenida en el mismo hormigón, pero fabricado según la dosificación inicial, del 30%, hecho que demuestra el efecto beneficioso obtenido del ajuste llevado a cabo en la dosificación.

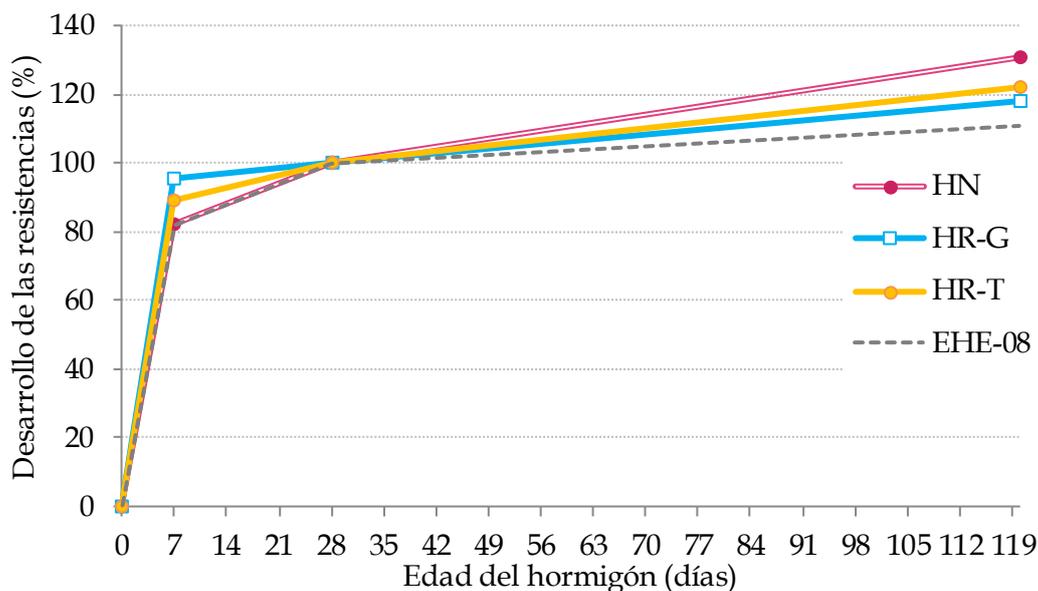


Figura 51. Desarrollo de las resistencias de los hormigones ensayados y de las recomendadas por la EHE-08

En cuanto a la progresión de las resistencias en el tiempo (desde los 7 a los 120 días), la Figura 51 muestra una mayor ganancia de las mismas en el hormigón natural en comparación con la obtenida en los reciclados, con aumentos máximos del 52,8% al utilizar árido natural, frente al 23,7% del hormigón con la fracción gruesa reciclada (HR-G) y al 37,4% del que usa ambas fracciones (HR-T). En las publicaciones consultadas se han constatado incrementos similares (Barbudo et al., 2013; de Brito et al., 2016; Kurda et al., 2018), debido a diferencias en la calidad del árido reciclado utilizado, aunque también se han obtenido otras superiores, que variaron, desde los 7 a los 90 días, entre el 41% (Salesa Bordanaba, Pérez Benedicto, Colorado-Aranguren, et al., 2017) y el 86% (Kou y Poon, 2012) al usar solo la fracción gruesa reciclado o hasta del 73% al reemplazar totalmente unos áridos por otros (Kenai et al., 2002).



Si se analizan el desarrollo obtenido para tiempos inferiores no ocurre lo mismo, observándose un crecimiento a los 7 días, respecto de lo obtenido a los 28 días, más rápido en los hormigones que usan árido reciclado que en el hormigón natural (85%), así como al valor recomendado por la EHE-08 (82%), del 89% y del 95%, al usar ambas fracciones del árido reciclado (HR-T) o tan sólo la gruesa (HR-G), respectivamente. Ahora bien, si la comparación se hace con las probetas curadas desde el inicio hasta los 120 días, el desarrollo de las resistencias ha llegado a alcanzar el 130% para el hormigón natural y en torno al 120% para los reciclados, los cuales vuelven a ser mayores que el estimado por la EHE-08 a los 120 días (110%).

A nivel bibliográfico se ha constatado un crecimiento de las resistencias iniciales bastante variables (utilizando en todos los casos cementos de alta resistencia inicial, 42,5R), entre el 70% (Salesa Bordanaba, Pérez Benedicto, Colorado-Aranguren, et al., 2017) y el 88% (Pedro et al., 2017) al utilizar solo la fracción gruesa reciclada; mientras que el desarrollo obtenido en hormigones con ambas fracciones recicladas osciló entre el 81 y el 95% en mezclas similares sin y con la inclusión de un aditivo superplastificante en su dosificación, respectivamente (Kurda et al., 2018). Este hecho viene a confirmar que efectivamente el uso de aditivos ejerce un efecto beneficioso en la ganancia de resistencias iniciales en hormigones reciclados, cuya actividad también se ve potenciada con el paso del tiempo, actuando de forma similar a un curado extendido (Soares et al., 2014b; Bravo et al., 2018).

En este sentido, cabe destacar la evolución paralela observada en los dos hormigones reciclados (Figura 50), lo cual pone de manifiesto que la arena reciclada utilizada en este trabajo es más perjudicial a cortas edades, en comparación al uso exclusivo del árido grueso reciclado, pero con el paso del tiempo tienden a igualarse las resistencias obtenidas en ambos tipos de hormigones (HR-T y HR-G). Este efecto es consecuencia directa de la mayor compacidad proporcionada por la grava reciclada que usada junto al árido fino reciclado ha ayudado en la ganancia de resistencias del hormigón 100% reciclado (Kenai et al., 2002), además de por el efecto de auto-curado que ejerce el árido reciclado, ya que el agua retenida en su interior se libera gradualmente para permitir la hidratación continua del cemento (Hoffmann et al., 2012; Yildirim et al., 2015; Rodríguez Robles, 2016).

El desarrollo de resistencias observado en los primeros días de edad en hormigones

con árido reciclado se considera positivo en lo que se refiere al proceso de desmolde y puesta en funcionamiento de las piezas a escala industrial, lo que adquiere gran importancia en la rapidez del proceso de producción de los prefabricados, ya que a su vez reduce el intervalo de tiempo entre la producción y la puesta en servicio, haciéndolo más competitivo.

4.2.3.3.2. Resistencia a flexión

En la Figura 52 se muestra la resistencia a flexión a 28 días obtenida a partir de los hormigones ensayados.

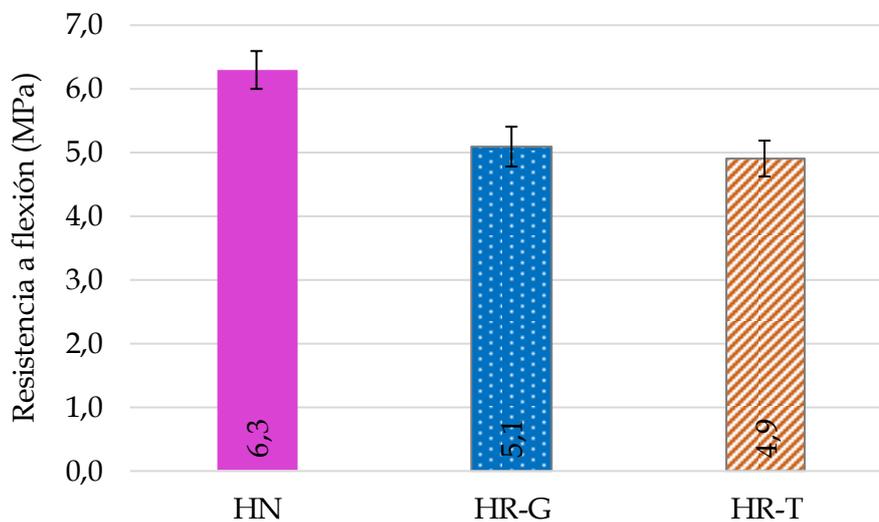


Figura 52. Resistencia a flexión a 28 días de los hormigones fabricados

La bibliografía consultada muestra reducciones en esta propiedad mecánica con la incorporación de árido reciclado. Los valores de reducción referenciados dependen de factores como la dosificación utilizada, la resistencia del hormigón original, y la naturaleza del árido reciclado empleado (Sánchez de Juan, 2004), siendo más notables con el incremento de la cantidad de árido reciclado utilizado (Fernández Cánovas, 2013). Se han observado porcentajes de reducción que oscilaron entre el 6% (Juan-Valdés et al., 2018) y el 34% (López Gayarre et al., 2013) en el caso de un reemplazo total y entre el 5% (Malešev et al., 2010; Chakradhara Rao et al., 2011; Parthiban y Mohan, 2017) y el 30% (Katz, 2003; Debieb y Kenai, 2008) con la sustitución del árido grueso natural por reciclado.

En este estudio se han obtenido valores de reducción en la resistencia a flexión similar

en los dos hormigones reciclados ensayados (HR-G y HR-T), con una variación del 22% con respecto al valor obtenido en el hormigón natural (6,3 MPa). Este resultado está relacionado con la utilización de un material granular más poroso, además del carácter más anguloso de éste, la textura más rugosa de su superficie (mortero adherido), así como a su menor módulo de elasticidad (Thomas et al., 2018). Como ya se ha comentado en la resistencia a compresión, el uso conjunto de la fracción fina y de la gruesa del árido reciclado ha reducido la posible diferencia en el comportamiento mecánico de este hormigón respecto del fabricado sólo con áridos gruesos reciclados, debido a la mejora en la compacidad del mismo por el uso de un mayor porcentaje de aditivo superplastificante (Figura 44). De hecho ha sido posible establecer una relación de tipo lineal entre ambos parámetros (Figura 53), con un descenso de la resistencia a compresión al disminuir la de flexión.

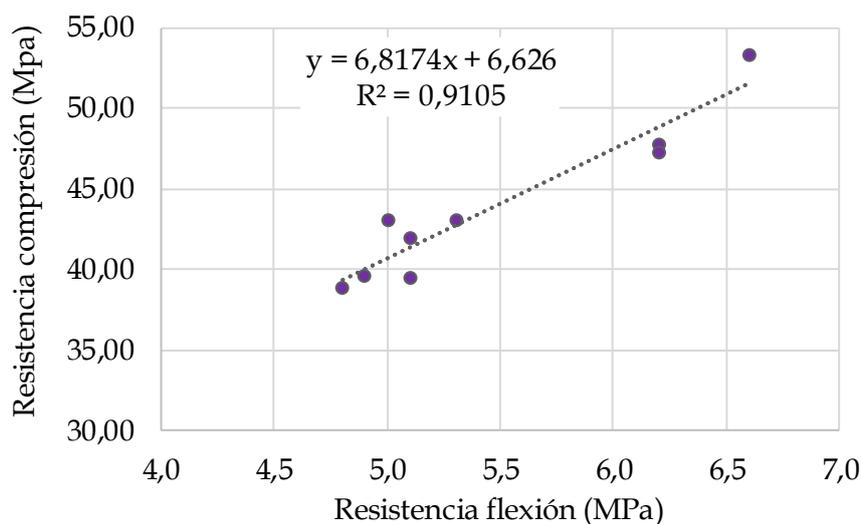


Figura 53. Relación entre la resistencia a compresión y la de flexión de los hormigones evaluados

Los resultados obtenidos coinciden con los publicados por otros autores (Katz, 2003; Sánchez de Juan, 2004), por lo que para un mismo tipo de hormigón se puede determinar, de forma fiable, una resistencia a partir de la otra (Bustillo Revuelta, 2010; Beltrán et al., 2014).

4.2.3.3.3. Módulo de elasticidad

La Figura 54 muestra los resultados de la deformación longitudinal de los hormigones fabricados a 28 y 120 días, medida mediante el uso de los módulos de elasticidad dinámico (E_d) y estático (E_s) obtenidos, respectivamente, mediante el método no

destrutivo de frecuencia de resonancia y teniendo en cuenta la deformación axial correspondiente al 10% y al 40% de la tensión máxima, medida a partir del ensayo de compresión uniaxial y registro directo de dichas deformaciones con galgas extensiométricas. Con los valores obtenidos se observa una reducción de esta propiedad, siendo mayor con el incremento de reemplazo del árido natural por reciclado, lo que pone de nuevo de manifiesto la influencia del mismo, al igual que en otras propiedades.

Con respecto al **módulo de elasticidad dinámico** se observa una disminución de los valores obtenidos en los hormigones reciclados con relación a lo del natural a 28 (52,80 GPa) y 120 días (57,63 GPa). La reducción observada es mayor en el caso del reemplazo de la totalidad de árido (HR-T) frente al uso únicamente de árido grueso reciclado (HR-G), con porcentajes de variación a 28 días del 24,8 y 16,7% respectivamente; y a 120 días dichas reducciones fueron del 23,8% (HR-T) y 20,2% (HR-G).

Los resultados obtenidos son similares a los publicados en otros estudios (Malešev et al., 2010; Ferreira et al., 2011), aunque también se han referenciado reducciones superiores que oscilaron, en el caso de la sustitución de la fracción gruesa, entre el 30% (Debieb y Kenai, 2008) y el 50% (Katz, 2003); y entre el 32% (Omary et al., 2016) y el 50% (Debieb y Kenai, 2008; Suárez González et al., 2017) con el uso de la totalidad de los áridos reciclados. Por tanto, las mejoras obtenidas en el rendimiento de esta propiedad mecánica, con respecto a lo publicado en la bibliografía, se justifican por la utilización de aditivo superplastificante (Soares et al., 2014b).

En cuanto a la evolución del módulo dinámico con respecto a la edad del hormigón, se observa un crecimiento de este parámetro de aproximadamente el 9%, desde los 28 a los 120 días, para todos los hormigones ensayados. Diversos autores también han publicado aumentos, debido a la mejora de su microestructura con el paso del tiempo (Gómez-Soberón, 2002; Kou y Poon, 2013).

En el **módulo de deformación estático** las diferencias obtenidas han sido menores que las observadas en el ensayo no destructivo, con reducciones del 6% para el hormigón con árido grueso reciclado (HR-G) y del 15% para el fabricado con el reemplazo total de un árido por otro (HR-T), respecto del valor del hormigón natural (39,96 GPa a 28 días y 42,08 GPa a 120 días). Estudios consultados también muestran una reducción de

este parámetro, aunque los valores publicados difieren en función de la tipología del árido y la dosificación utilizada. Así, en el caso de hormigones con sustitución parcial y 28 días de edad, los resultados obtenidos son similares a los de otros estudios (Ajdukiewicz y Kliszczewicz, 2002; Pedro et al., 2017), aunque hay autores que referencian porcentajes superiores, del 45% (Xiao et al., 2005) y que se incrementaron hasta el 60% al utilizar la totalidad de los áridos reciclados (Suárez González et al., 2017). En relación a la evolución del módulo de deformación en el tiempo (de 28 a 120 días) se observa un crecimiento del mismo del 5% aproximadamente, similar en todos los hormigones estudiados.

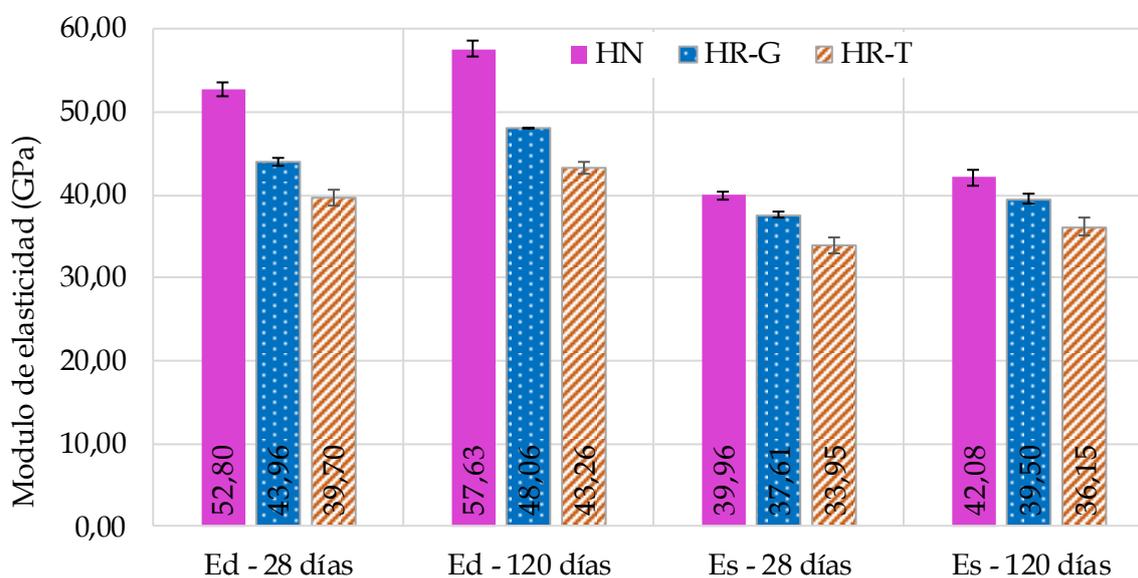


Figura 54. Módulo de elasticidad dinámico (Ed) y estático (Es) de los hormigones ensayados a 28 y 120 días

La pérdida experimentada en el módulo de elasticidad con el uso de áridos reciclados se explica por diferentes motivos, tales como: (i) características mineralógicas del árido original (Salman y Al-Amawee, 2006); (ii) la cantidad y calidad de los áridos reciclados, de acuerdo a lo visto con anterioridad (textura más rugosa y mayor porosidad proporcionada por el mortero); (iii) al menor módulo de elasticidad del árido reciclado, puesto que una parte de él lo constituye el mortero, cuyo módulo también es menor (Xiao, Huang, et al., 2012; Wang et al., 2013); (iv) a una mayor capacidad de deformación de los áridos reciclados, debido a su menor densidad y rigidez (Huda y Alam, 2015), provocada una vez más por el mortero adherido (de Brito et al., 2016); (v) a una conexión más débil entre la vieja y la nueva interfase árido-pasta, con un mayor

número de poros capilares (Sidorova, 2013; Al-bayati et al., 2016); (vi) además de a la presencia de microfisuras inherentes en la zona de transición, que conducen a la reducción de la rigidez del conjunto (Thomas et al., 2018).

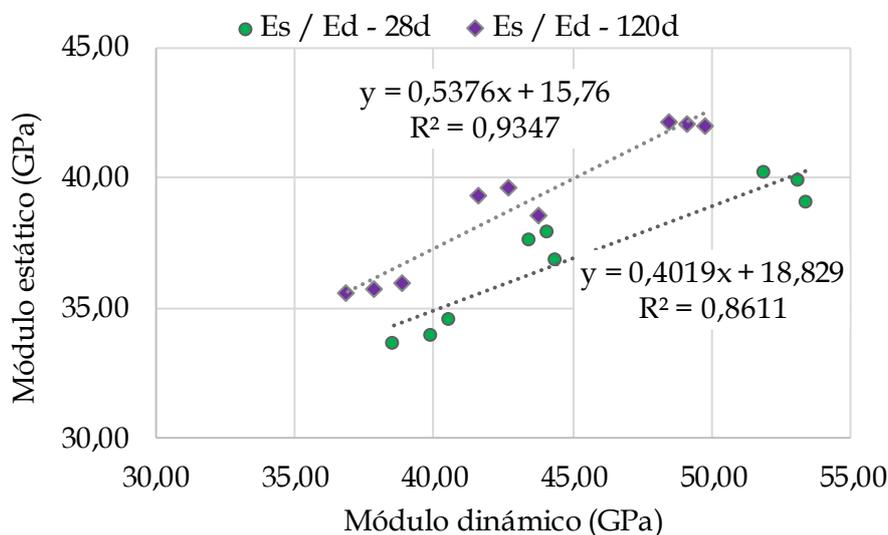


Figura 55. Relación entre el módulo de elasticidad estático y el dinámico

Finalmente indicar que el menor valor del módulo estático frente al dinámico es debido a la heterogeneidad del hormigón, así como a la de los áridos utilizados, que afecta de manera distinta a los dos módulos, además de a los posibles errores introducidos en el procedimiento destructivo (Salman y Al-Amawee, 2006; Pavlů y Šefflová, 2014). En este sentido, los valores reflejados en la Figura 54 muestran un índice de relación entre ambos módulos del 0,75 para el hormigón natural y del 0,85 para los reciclados a la edad de 28 días y ligeramente inferiores a 120 días (0,73 y 0,82, respectivamente).

El resultado obtenido concuerda con lo recogido en la literatura consultada, con coeficientes que variaron entre el 0,75 (Pérez Benedicto et al., 2012; Salesa Bordanaba, Pérez Benedicto, Colorado-Aranguren, et al., 2017) y el 0,83 (Lydon y Balendran, 1986), dependiendo del origen del árido, de la resistencia del hormigón y del tiempo de curado de éste, aumentando dicha relación a medida que disminuye la resistencia del hormigón (Malhotra y Sivasundaram, 2004; Sánchez de Juan, 2004; Pavlů y Šefflová, 2014). La Figura 55 muestra la correlación lineal observada entre los resultados adquiridos del módulo de elasticidad estático y los del dinámico para todos los hormigones estudiados, tanto a 28 días como a 120 días, similar a la encontrada en



estudios similares (Malhotra y Sivasundaram, 2004; Salman y Al-Amawee, 2006).

4.2.3.4. Ensayos de durabilidad

La normativa de prefabricados para mobiliario urbano (AEN/CTN 127, 2004a) no especifica requisitos adicionales de durabilidad cuando éstos puedan estar expuesto a ambientes agresivos. No obstante, este estudio ha optado por estudiar la durabilidad del hormigón no estructural fabricado con árido reciclado para comprobar la degradación que sufriría al estar sometido a cualquier tipo de condición ambiental (urbano, industrial o marino).

En base a lo analizado en investigaciones similares (Thomas García et al., 2013; Howland Albear y Martín Acosta, 2013; Bravo et al., 2015a; Martín-Morales et al., 2017) se estudiaron las siguientes propiedades: absorción por inmersión de agua, porosidad relativa y densidad aparente; permeabilidad, mediante el ensayo de penetración de agua bajo presión y absorción por capilaridad; velocidad de carbonatación y de envejecimiento por niebla salina, a partir de métodos acelerados. Todos los ensayos indicados se realizaron teniendo en cuenta que la durabilidad de un material está relacionada con su comportamiento durante su vida útil bajo las condiciones ambientales a las que estará sometido.

Por todo ello, entre la Figura 56 y la Figura 68 se recogen los datos medios obtenidos en cada una de las propiedades estudiadas relativas a la durabilidad del hormigón, que serán discutidas en los siguientes subapartados.

4.2.3.4.1. Absorción de agua, porosidad accesible y densidad aparente

Ciertos parámetros físicos están relacionados directamente con la durabilidad del material después de los 28 días de curado, entre ellos, la porosidad accesible es uno de los más importantes (obtenida tras el ensayo de absorción de agua por inmersión), ya que los agentes agresivos precisan de una red de poros interconectada para penetrar en el interior del hormigón (Thomas García et al., 2013; Bravo et al., 2015a).

La Figura 56 muestra como el uso de la fracción gruesa de árido reciclado mejora el valor de la absorción y de la porosidad accesible del hormigón HR-G, frente al que utilizó árido natural; no obstante, en el caso de reemplazo total, tanto la absorción

como la porosidad accesible, sufrió un importante incremento. En lo relativo a la densidad aparente, los valores obtenidos son muy similares para ambos hormigones reciclados, aunque ligeramente inferiores que el del natural (Figura 57).

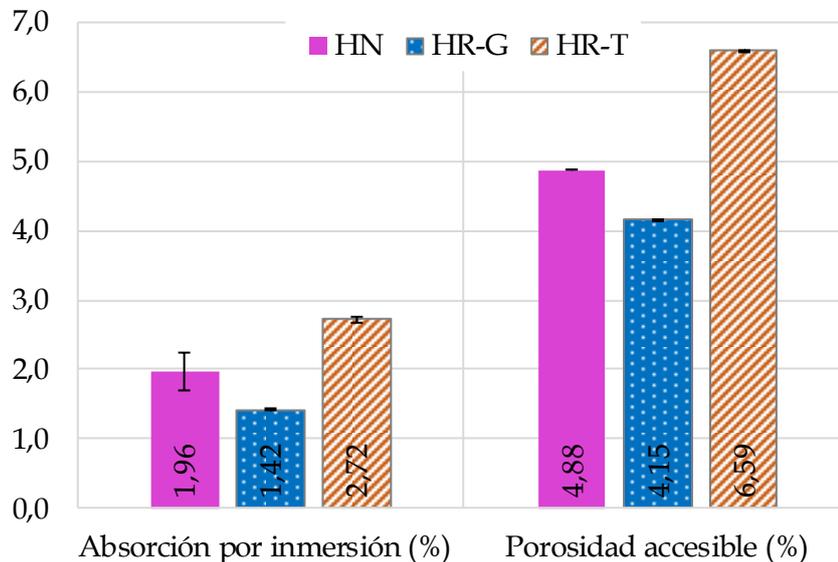


Figura 56. Absorción y porosidad accesible al agua a 28 días de los hormigones estudiados

Si se comparan los valores de la **absorción de agua** a 28 días del hormigón natural (2,0%) con los obtenidos para los reciclados (Figura 56) se observa una disminución de este parámetro del 30% al utilizar sólo la fracción gruesa (HR-G) y un aumento del 35% al incorporar la totalidad de los áridos reciclados (HR-T). Teniendo en cuenta que la capacidad de absorción de agua del hormigón es directamente proporcional a la de los áridos utilizados, el comportamiento normal de este parámetro es que crezca en relación al porcentaje de reemplazo del árido natural por reciclado (Debieb et al., 2010; Bravo et al., 2015a), debido a la presencia de una mayor cantidad de mortero adherido, con el consiguiente aumento de su estructura porosa (Thomas et al., 2018). Sin embargo, la menor absorción de agua obtenida en el hormigón HR-G es debida a una disminución en el contenido de poros a medida que avanza el proceso de hidratación de la pasta de cemento, en comparación con el valor obtenido a 7 días (1,8%) y más teniendo en cuenta la relación directa que tiene esta propiedad con la porosidad abierta del hormigón, es decir, con los huecos que están conectados por capilares de diámetro variable (Bravo et al., 2016). Además, esta disminución está asociada con el efecto beneficioso ya observado del superplastificante (Soares et al., 2014b; Bravo et al., 2018). Los valores obtenidos en este estudio son similares a los publicados en otros trabajos,



en los que se obtuvieron descensos máximos del 5% (Parthiban y Mohan, 2017), aunque también aumentos que oscilaron entre el 13,3% (Bravo et al., 2015a) y el 65% (González-Corominas y Etxeberria, 2014b).

La **porosidad accesible al agua o relativa**, referida a la relación entre el volumen de poros accesibles al agua y el volumen aparente de la muestra, se considera responsable de la durabilidad físico-química de los hormigones, junto con la absorción por capilaridad, especialmente cuando éstos se encuentran sometidos a ambientes agresivos (Thomas García, 2012). Al comparar los resultados del hormigón natural (4,9%) con los de los reciclados (Figura 56) se muestra la misma tendencia observada en la absorción por inmersión, debido a la relación existente entre ambos parámetros. Así en el caso del hormigón con reemplazo parcial del árido (HR-G) el descenso obtenido en este parámetro ha sido del 14,3%, mientras que en el reciclado total (HR-T) el aumento resultante ha sido del 34,7%. Los estudios relacionados con esta temática han publicado incrementos en esta propiedad, con variaciones porcentuales que oscilan entre el 3% (Parthiban y Mohan, 2017) y el 60% (González-Corominas y Etxeberria, 2014b) al reemplazar sólo la fracción gruesa del árido natural por la reciclada y del 63% cuando el hormigón se fabricó con la totalidad de los áridos reciclados (Hadjieva-Zaharieva et al., 2003).

Finalmente el estudio de la **densidad aparente** ha mostrado descensos poco significativos en ambos hormigones reciclados, con respecto al hormigón natural (2,57 kg/dm³), del 1,6% para el fabricado con el árido grueso reciclado (HR-G) y del 3,1% para la totalidad de los áridos reciclados (Figura 57). Estos valores siguen el mismo patrón observado en el hormigón en estado fresco, así como en el estado endurecido a 7 días, estando condicionados, una vez más, por la densidad de la fracción del árido sustituida (Tabla 27).

Diversos autores han publicado similares porcentajes de variación para reemplazos parciales del árido grueso reciclado (González-Fonteboá y Martínez-Abella, 2008), aunque también se han encontrado mayores diferencias, que oscilan entre el 8% (Bravo et al., 2015b) y el 12,7% (González-Corominas y Etxeberria, 2014b) en hormigones confeccionados con árido mixto reciclado, debido a la menor densidad del material cerámico (1,80 a 2,0 kg/dm³). Se deduce, por tanto, que la composición mayoritaria de hormigón y la ausencia de material cerámico (menos denso) en los áridos reciclados

utilizados en este estudio ha garantizado que este parámetro no se vea tan influenciado al sustituir parcial o totalmente un material granular natural por uno reciclado (Khatib, 2005; Bustillo Revuelta, 2010).

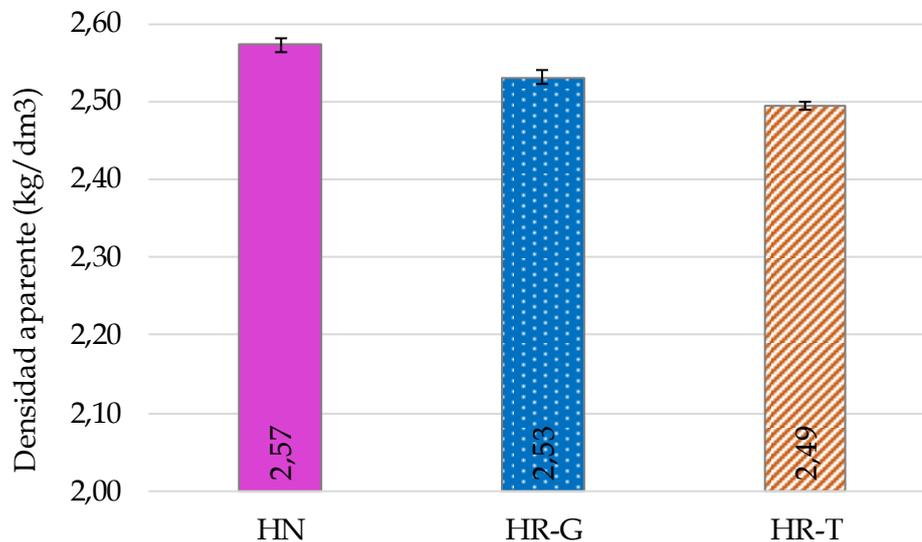


Figura 57. Densidad aparente de los hormigones estudiados a 28 días

4.2.3.4.2. Penetración de agua bajo presión

La impermeabilidad al agua del hormigón se emplea como criterio de durabilidad en la Instrucción (Ministerio de Fomento, 2008), mediante el método de determinación de la profundidad de penetración de agua bajo presión, con especificaciones, tanto para la profundidad máxima (50 mm) como para la media (30 mm), en el caso de elementos en masa o armados sometidos a las clases generales de exposición ambiental (IIIa, IIIb, IV) o a las clases específicas (Qa, Qb, E, H, F).

Los resultados obtenidos, tras someter a las probetas de cada uno de los hormigones estudiados a este ensayo durante 72 horas, se presentan en la Figura 58. Al igual que en otros estudios (Thomas García, 2012) se puede observar la elevada permeabilidad del hormigón fabricado con la totalidad de los áridos reciclados, que es siete veces mayor si se compara con el valor del hormigón natural (28 mm), a la vez que supera ampliamente las especificaciones indicadas en la EHE-08, tanto de profundidad máxima (50 mm) como media (30 mm). No ocurre así en el caso del hormigón con árido grueso reciclado, que presenta un incremento con respecto al natural del 6,6% y cumple simultáneamente con ambos límites. Esta diferencia tan significativa, al usar las dos fracciones del árido reciclado, está provocada por la ya indicada menor calidad

de la arena reciclada, principalmente por su mayor absorción (5,2%).

El hecho obtenido ha repercutido en el aumento de la capacidad de absorber agua por inmersión y de la porosidad relativa del hormigón HR-T (Figura 56) y, consecuentemente, en el incremento de la penetración de agua bajo presión, ayudada por el fenómeno de capilaridad. En la Figura 59 se observa este fenómeno, apreciándose como la acumulación de agua en la base de la probeta ascendió hasta la parte superior de la misma, debido a su red capilar intercomunicada (Barrios Padura et al., 2009; Evangelista y de Brito, 2010).

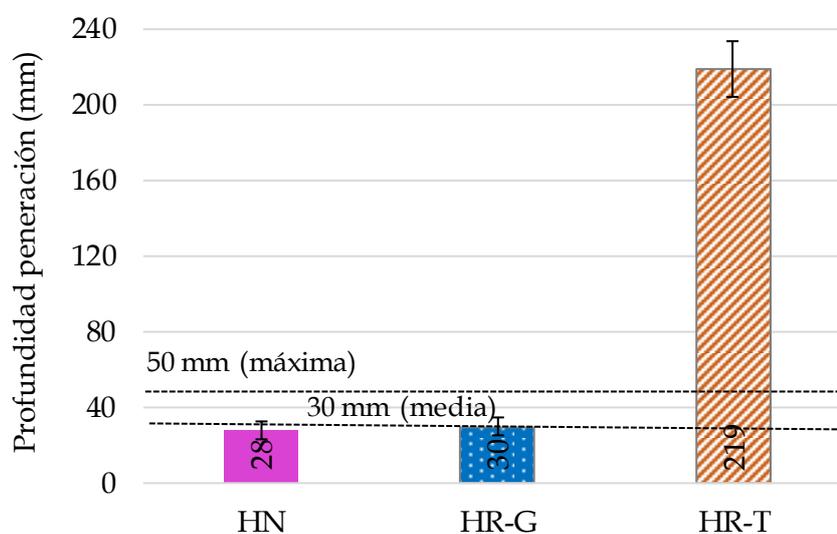


Figura 58. Profundidad media de penetración de agua de los hormigones estudiados y especificación máxima y media de la Instrucción (Ministerio de Fomento, 2008)

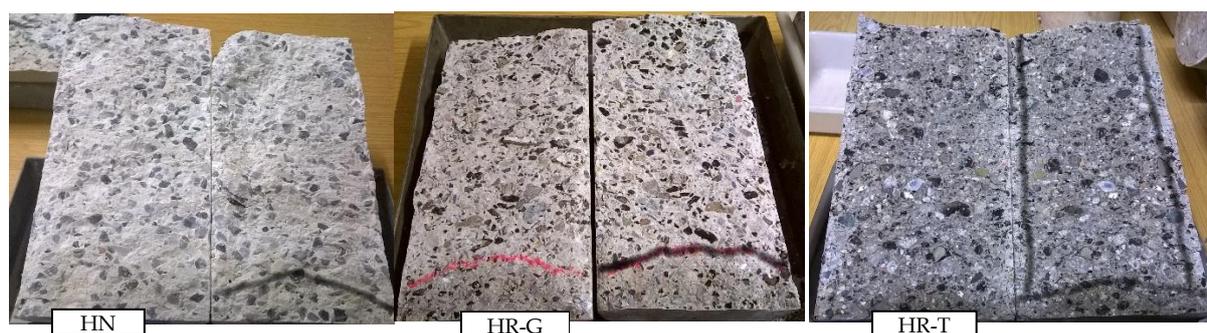


Figura 59. Profundidad de penetración de agua medida en probetas normalizadas de 150 mm de diámetro y 300 mm de alto (partidas mediante el ensayo brasileño después de 72h horas bajo penetración de agua a presión)

En la literatura consultada se obtuvieron incrementos mayores en la penetración de agua, con valores entre el 14% (Kenai et al., 2002) y el 47% (Jiménez et al., 2014) para sustituciones de árido grueso y del 50% para los hormigones fabricados con la

totalidad de los áridos reciclados (Kenai et al., 2002). Los menores incrementos obtenidos en esta investigación al usar la fracción gruesa reciclada se justifican por el uso de superplastificante (Debieb y Kenai, 2008), no ocurriendo lo mismo en el hormigón fabricado con árido fino reciclado, por lo que este resultado podría comprometer su durabilidad cuando se encuentre expuesto a atmósferas altamente agresivas.

4.2.3.4.3. *Absorción por capilaridad*

El parámetro de absorción de agua por la acción capilar está considerado como una medida más del grado de durabilidad del hormigón frente a los agentes agresivos, que a su vez está condicionado por la resistencia y la permeabilidad que tenga el material (Howland Albear y Martín Acosta, 2013; Martín-Morales et al., 2017).

En la Tabla 31 se muestran los resultados obtenidos para el coeficiente de absorción capilar en los hormigones ensayados, tanto a 28 como a 90 días. Además, las curvas generadas al relacionar este coeficiente con la raíz cuadrada del tiempo, a ambas edades, determinado mediante la medida periódica de la ganancia de peso de las probetas en contacto con una lámina de agua (5 mm) se representan en la Figura 60. Al igual que en el caso de la porosidad, la absorción de agua por inmersión y la penetración de agua bajo presión, se observa una ligera mejoría al usar la fracción gruesa del árido reciclado y un empeoramiento al utilizar la fina junto a la gruesa, mostrando un leve descenso del 3,8% y del 8% para el hormigón reciclado HR-G y un aumento del 16,1% y el 10,7% para el HR-T, a los 28 y 90 días, respectivamente, en relación con los valores obtenidos para el hormigón natural (0,026 kg/dm²/√min y 0,025 kg/dm²/√min).

Tabla 31. Resultados obtenidos del coeficiente de absorción capilar

Durabilidad	Edad	HN	HR-G	HR-T
Coeficiente de absorción capilar (kg/dm ² /√min)	28 días	0,026	0,025	0,031
	90 días	0,025	0,023	0,028

La mejora observada en el hormigón con árido grueso reciclado resulta totalmente contraria a lo que han publicado otros autores, que referencian incrementos a medida que lo hace este tipo de árido (Zega et al., 2014; Lotfy y Al-Fayez, 2015) que han ido

desde el 40% (Hadjieva-Zaharieva et al., 2003; Ferreira et al., 2011; Matías et al., 2014; Purushothaman et al., 2015; Parthiban y Mohan, 2017) hasta incluso duplicar el valor de referencia (Thomas et al., 2018). Dicha mejora se atribuye a la creación de una matriz más compacta como consecuencia del uso de superplastificante (Gonçalves et al., 2004). En el caso de sustituciones totales de los áridos naturales por reciclados los incrementos referenciados han oscilado entre el 60% (Debieb y Kenai, 2008) y el 150% (Pedro et al., 2017), debido al mortero adherido a la superficie de los materiales reciclados, más poroso y permeable y, en consecuencia, el aumento de los poros capilares en la microestructura que da como resultado una mayor absorción de agua por la acción capilar (Belin et al., 2013).

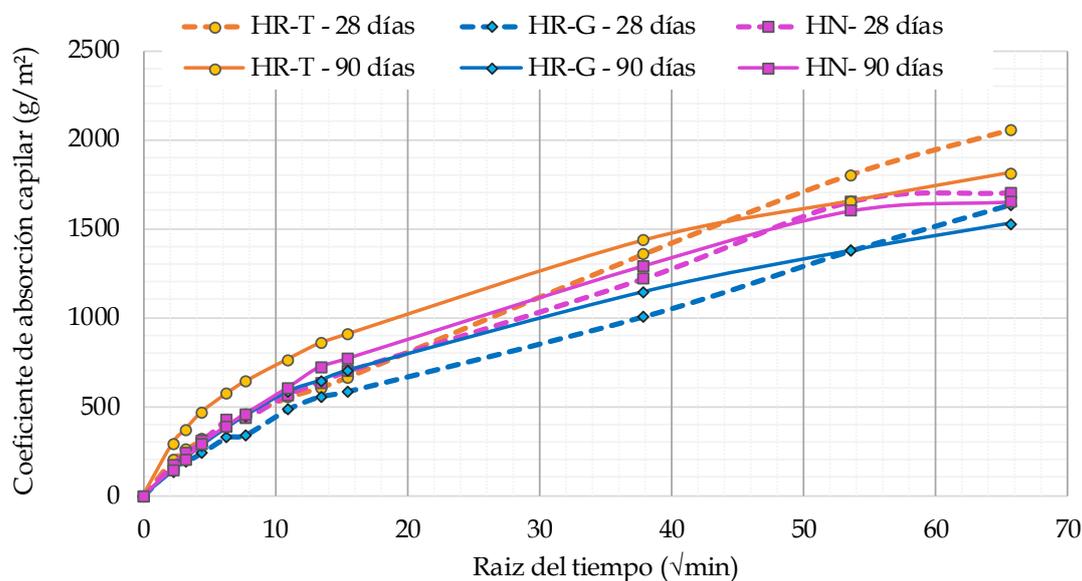


Figura 60. Absorción de agua por capilaridad de los hormigones ensayados a 28 y 90 días, respecto del tiempo

En cuanto a la evolución de esta propiedad en el tiempo, al igual que lo observado en otros estudios (Lotfy y Al-Fayez, 2015), los valores obtenidos a los 90 días han sido inferiores a los presentados a los 28 días (Tabla 31 y Figura 60), con diferencias más acentuadas en los hormigones reciclados (8% para el HR-G y 9,7% para el HR-T) que en el natural (3,8%). Estos resultados se explican por el avance de la hidratación del cemento que da lugar a la disminución de los poros, así como a la reducción de su tamaño y, por tanto, a la menor capacidad de absorber agua del material (Olorunsogo y Padayachee, 2002; Gagné et al., 2011). En consecuencia, el incremento del tiempo de curado del hormigón, antes de la puesta en servicio, podría ayudar a reducir su

absorción capilar y, por tanto, a garantizar una adecuada durabilidad en un ambiente agresivo.

4.2.3.4.4. *Velocidad de carbonatación*

El estudio del fenómeno de carbonatación es uno de los indicadores de durabilidad del hormigón (Tang et al., 2018), además de que se considera de gran importancia para hormigones fabricados con árido reciclado (Thomas García et al., 2013; Bravo et al., 2015a), debido a que la carbonatación puede dar lugar a la retracción del material y a la pérdida de reserva alcalina, aunque también a la disminución de la permeabilidad y al aumento de su resistencia a compresión (Fernández Cánovas, 2013). Por ello, para determinar el comportamiento de los hormigones ensayados frente a la acción acelerada de la carbonatación se sometieron las probetas normalizadas de hormigón al proceso acelerado, a partir de la exposición de las mismas al CO₂ durante 14, 28 y 56 días y, adicionalmente, se obtuvo su resistencia a compresión y su capacidad de absorción de agua (56 días).

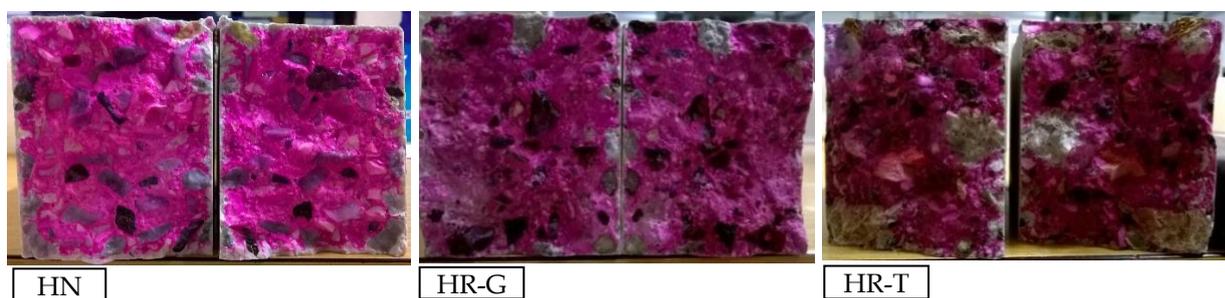


Figura 61. Ejemplo de la carbonatación obtenida en probetas de hormigón ensayadas, identificada mediante la aplicación de fenolftaleína al 1% (zonas no coloreadas de rosa)

La Figura 61 presenta la profundidad de carbonatación de las muestras ensayadas, observándose a primera vista que la incorporación de áridos reciclados ha dado lugar a una mayor carbonatación, ya que al ser éstos más porosos que los naturales facilitan la entrada de CO₂ a través del sistema poroso del hormigón, además de porque en cierta medida los áridos reciclados podrían estar carbonatados; igualmente se aprecia que el frente de carbonatación se propaga a través del hormigón dibujando picos que coinciden con los áridos más porosos, indicio de la mayor permeabilidad del árido reciclado frente a la de la matriz de cemento (Faella et al., 2016).

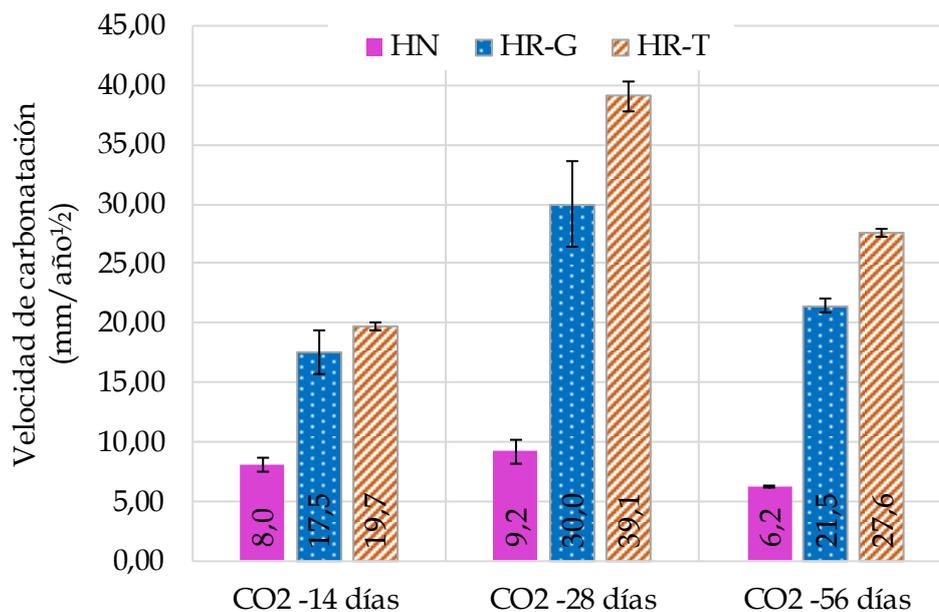


Figura 62. Velocidad de carbonatación en los hormigones evaluados, a 14, 28 y 56 días

Si se analiza la velocidad de carbonatación de los hormigones reciclados en comparación con lo obtenido en el natural (Figura 62), se observan valores mayores con el uso del árido reciclado con respecto a la utilización del natural para todas las edades ensayadas (8 mm/ $\sqrt{\text{año}}$ a 14 días, 9,2 mm/ $\sqrt{\text{año}}$ a 28 días y 6,2 mm/ $\sqrt{\text{año}}$ a 56 días); estos valores han sido del 118,8% para el hormigón HR-G y del 146,3% para el HR-T durante los primeros 14 días de exposición acelerada; mientras que a los 28 días y los 56 días de ensayo se incrementó hasta el 227,2% y 245% para HR-G y del 325% y del 345% para HR-T, respectivamente.

Los resultados obtenidos se justifican por la mayor permeabilidad debida al uso de árido reciclado, tanto grueso como fino, que da lugar a una carbonatación más rápida y extensa que lo observado en el hormigón natural; además, hay que tener en cuenta que la mayor superficie específica del árido fino reciclado es más sensible al proceso de carbonatación que la del árido grueso reciclado, así como al incremento en la sustancia carbonatable, compuesta de cemento hidratado más mortero adherido (Werle et al., 2011; Vidal Lescuyer, 2012; Bravo et al., 2015a). Si se comparan los valores obtenidos, éstos fueron mayores que los referenciados en otros estudios, en el caso del uso de árido grueso, oscilaron entre el 20% (Pedro et al., 2017) y el 31% (de Brito et al., 2016), tras 28 días de exposición; en cambio, en hormigones con el 100% de los áridos reciclados, la velocidad de carbonatación a 28 días fue entre 2 (Pedro et al., 2017) y 4

veces mayor que la del hormigón de referencia (Buyle-Bodin y Hadjieva-Zaharieva, 2002).

En relación a la progresión de la carbonatación en el tiempo (Figura 62), al igual que en otros estudios (Sim y Park, 2011), se observa una tendencia similar en todos los hormigones estudiados, con un notable crecimiento de la velocidad de penetración del CO₂ desde los 14 a los 28 días que varió entre el 15% para el hormigón natural y el 98,5% para el reciclado fabricado con el 100% de los áridos reciclados, pasando por un 72% en el caso del reciclado con solo la fracción gruesa. Por el contrario, posteriormente, entre los 28 y 56 días, se observó una desaceleración de la misma, siendo menor el desarrollo en los hormigones reciclados (40%) que en el natural (48%). Estos resultados se justifican por la completa saturación de CO₂ en los poros, lo que impidió una mayor concentración de este gas en su interior; además, el avance en la hidratación del cemento también redujo el volumen de poros, disminuyendo consecuentemente el proceso de carbonatación con el tiempo (Kou y Poon, 2012; Matías et al., 2014).

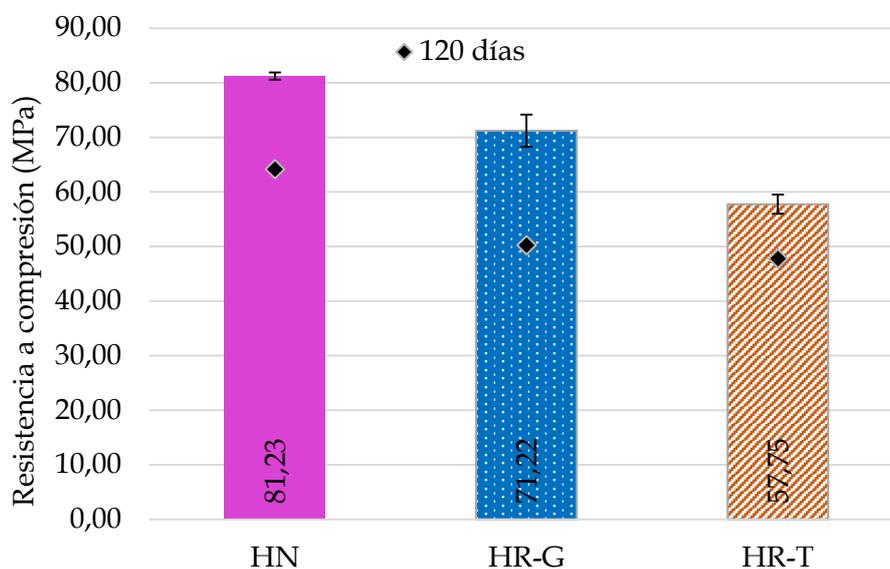


Figura 63. Resistencia a compresión de muestras sometidas a 56 días de carbonatación acelerada y sin carbonatar (con 120 días de edad)

Estos resultados concuerdan con los obtenidos en la absorción capilar, ya que la red de poros constituye un camino para la circulación tanto del CO₂ como de cualquier otro líquido proveniente del exterior (Bravo et al., 2018). De nuevo, la prolongación en el tiempo de curado podría ser uno de los métodos más prácticos para disminuir la



tasa de carbonatación del hormigón reciclado tras su exposición al aire libre, tal y como han constatado otros autores (Buyle-Bodin y Hadjieva-Zaharieva, 2002).

Finalmente, de forma complementaria se ha determinado la resistencia a compresión (Figura 63) y la absorción por capilaridad (Figura 64) de las probetas carbonatadas. Se observa el efecto positivo que ejerció dicho proceso acelerado sobre la resistencia de los hormigones ensayados y sobre la absorción por capilaridad después de 56 días de exposición acelerada. El aumento de la capacidad resistente fue mayor en el hormigón fabricado con la fracción gruesa reciclada que en los otros dos, con respecto a los valores obtenidos en la rotura normalizada de probetas con 120 días (Figura 50), cuantificado en un 27% para el hormigón natural, un 42% para el reciclado HR-G y un 21% el HR-T. La disminución de la absorción por capilaridad ha sido similar en todos los hormigones evaluados (Figura 64), con un porcentaje de variación del 68,5% para el fabricado con árido natural y del 66% para los que utilizaron material reciclado (HR-G y HR-T).

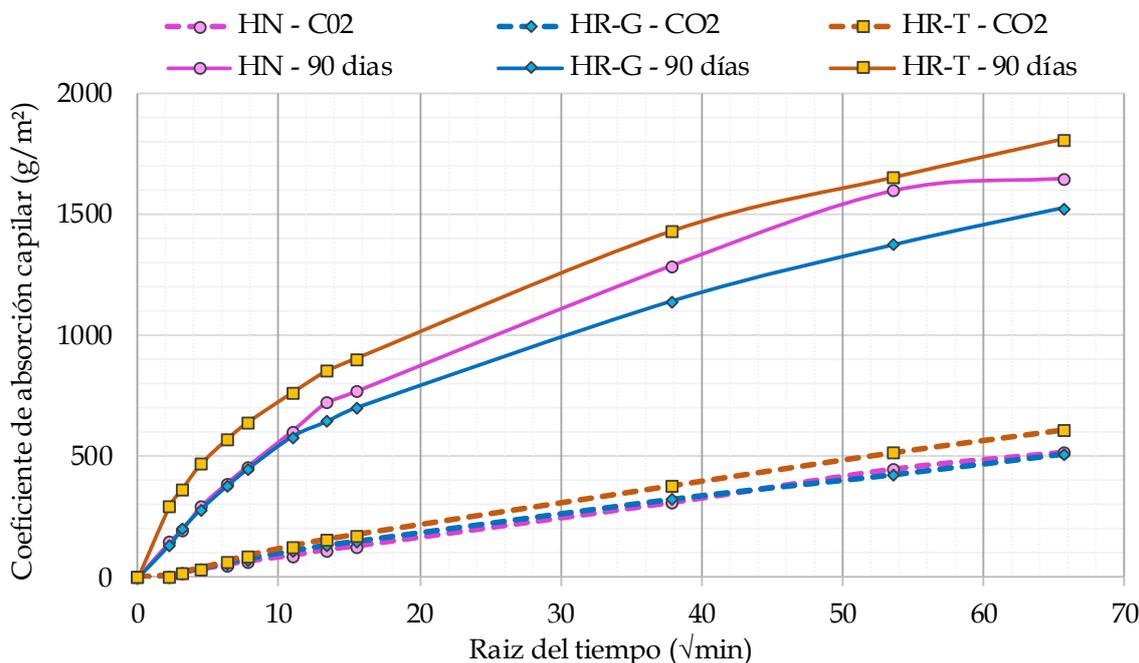


Figura 64. Comparativa entre el coeficiente de absorción por capilaridad de los hormigones sometidos a CO₂ y sin someter, con 90 días

Estos resultados se explican por el hecho de que, en cierto modo, la carbonatación acelerada fortalece la calidad de estos áridos, mejorando las propiedades mecánicas del hormigón fabricado con ellos (Shi et al., 2016; Xuan et al., 2016; Li et al., 2018), al reaccionar el CO₂ con los compuestos no hidratados del mortero adherido para formar

nuevos hidratos, CaCO_3 y gel de sílice (humedad del $65\pm 5\%$ durante el ensayo). Consecuentemente, disminuye la porosidad del material de forma notable (Jerga, 2004; Hanouns Robas, 2008) y, con ello, su permeabilidad, debido al depósito de carbonato cálcico en los poros de la matriz de cemento (Silva et al., 2015; Zhang et al., 2015).

Nuevamente, estos resultados muestran un excelente comportamiento del material fabricado con áridos reciclados al ser expuesto a condiciones de agresividad ambiental (por carbonatación).

4.2.3.4.5. Resistencia al envejecimiento por niebla salina

Como una medida más del grado de calidad del material se ha considerado oportuno determinar el comportamiento de los hormigones reciclados a ambientes marinos, tal y como sugieren otros autores (Thomas García et al., 2010; Martín-Morales et al., 2017).

El riesgo de deterioro, fisuración o descamaciones de los hormigones ensayados se obtuvo mediante la determinación del porcentaje de variación de la masa de las probetas (Figura 65) antes y después de ser sometidas al ensayo acelerado de envejecimiento por salinidad, durante 60 ciclos alternativos de atmósfera de niebla salina (4h) y de secado (8h) (Figura 66). Adicionalmente se determinó la resistencia a compresión y la capacidad de absorción de agua de las muestras tras dicho proceso.

La inspección visual de las probetas tras el ensayo acelerado de envejecimiento por salinidad mostró una ausencia de eflorescencias o de grietas, así como de otros signos relevantes de degradación del material (Figura 65b). Aunque en la bibliografía consultada se han constatado unas pérdidas de peso en bloques de hormigón fabricados con árido reciclado procedentes de residuos de hormigón, del 3% (Martín-Morales, 2013), los resultados obtenidos muestran un porcentaje de disminución relativamente bajo en todos los casos. Los valores observados fueron del 1,66% para el hormigón natural, del 0,56% para el fabricado con árido grueso reciclado y del 1,93% para el confeccionado con la totalidad de los áridos reciclados. La mayor pérdida de peso obtenida en este último se explica por la permeabilidad y porosidad más alta del mismo, que ha dado lugar a un mayor deterioro, debido a la presión ejercida por las partículas de sal cuando cristalizaron dentro de su sistema poroso (Benavente García, 2002; Molina et al., 2013). Caso contrario es el observado en el hormigón con reemplazo parcial del árido (menos poroso) que, a pesar de la acumulación de sal en el interior

de los poros, incluso después del proceso de desalinización con agua desionizada, el deterioro sufrido ha sido menor.

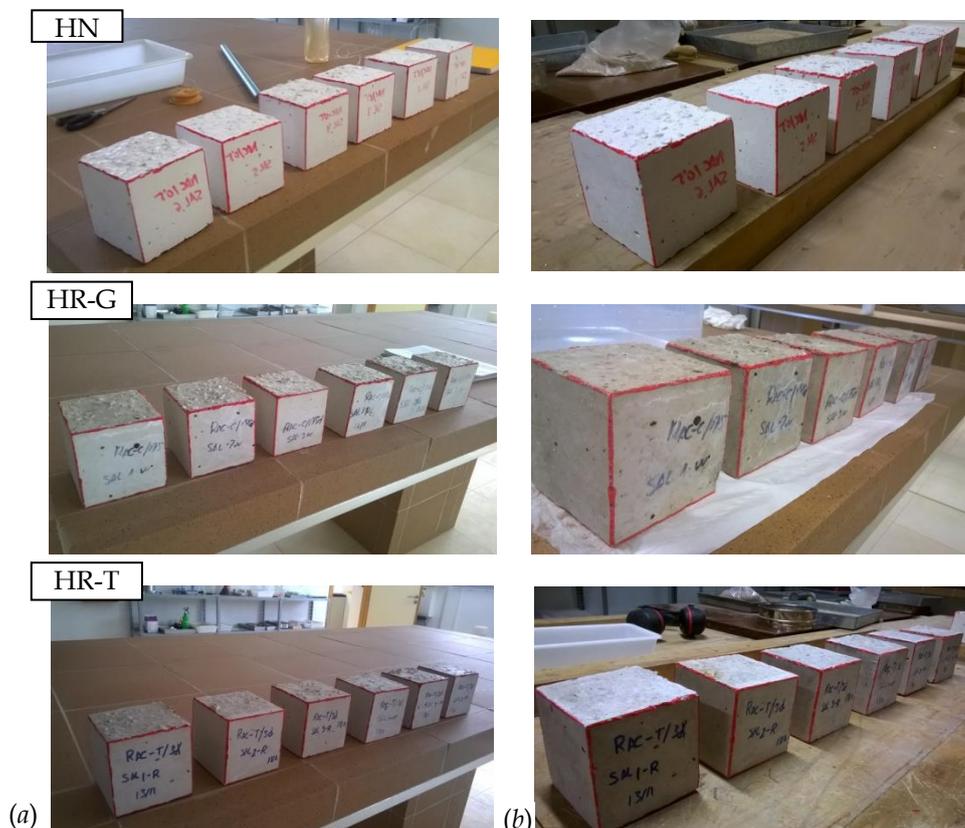


Figura 65. Probetas sometidas a alteración por niebla salina; comparación antes (a) y después del ensayo (b)

De forma adicional se ha determinado la resistencia a compresión (Figura 67) y la absorción por capilaridad (Figura 68) de las muestras envejecidas, obteniéndose ligeras mejoras en ambos parámetros para los hormigones reciclados, principalmente. En cuanto al efecto que el envejecimiento acelerado ha tenido sobre la resistencia a compresión de todos los hormigones ensayados, se aprecia un leve aumento de la misma en los hormigones reciclados (Figura 67), con variaciones del 7,8% para el HR-G, del 9,4% para el HR-T, mientras que el natural muestra un mínimo descenso en la resistencia (3,5%), con respecto a los valores obtenidos a 120 días (Figura 50).

En relación a esto, diversos autores ponen de manifiesto conclusiones similares al comparar mecánicamente hormigones reciclados curados en ambiente normal y otros en ambiente marino, IIIa (Thomas García et al., 2010), con valores que oscilan entre el 4 y el 8% (Wang et al., 2013); otros autores han referenciado descensos más

significativos en la resistencia para reemplazos parciales (11%) y entre el 12 y 18% si éstos eran totales (Martín-Morales, 2013). La evaluación de las resistencias no se desarrolla en paralelo a la variación de masa experimentada en todos los hormigones ensayados, aunque la mejora observada en las resistencias de los fabricados con árido reciclado puede explicarse por un fortalecimiento de las características de la pasta de cemento, así como a la disminución del volumen de poros a causa de la cristalización de sales en su interior (Wegian, 2010).

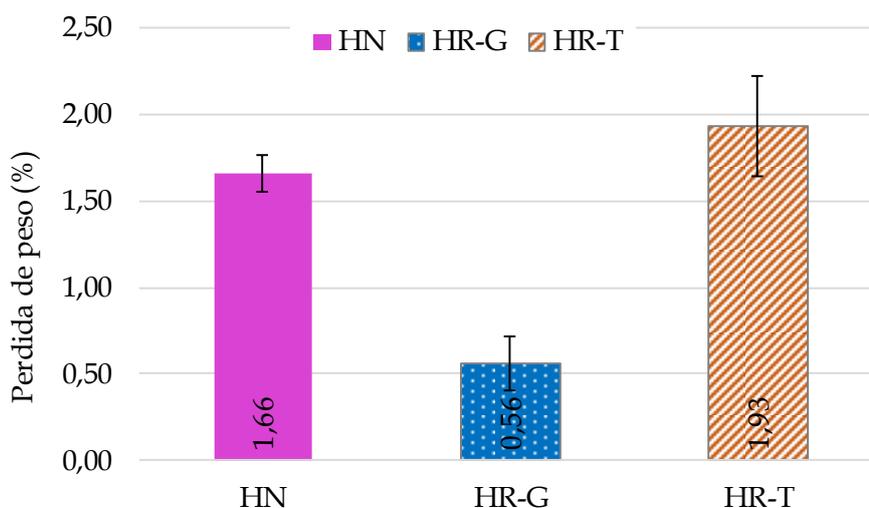


Figura 66. Porcentaje de variación de la masa de las probetas sometidas a envejecimiento salino (tras la eliminación de la sal depositada con agua desionizada)

Finalmente, con relación a la posible repercusión de la salinidad sobre la absorción por capilaridad, los resultados muestran que todos los hormigones ensayados han obtenido un descenso en este coeficiente, mayor en el fabricado con árido natural que en los producidos con reciclado (Figura 68), en comparación con los valores presentados en probetas a 90 días (Figura 60), con variaciones del 21% del hormigón de referencia, frente al 5% y al 11% de los hormigones HR-G y HR-T, respectivamente. Estos beneficios, aunque son mínimos, se atribuyen a una disminución en la conectividad del sistema poroso, consecuencia de una obturación parcial de los poros por la acumulación de sal, dificultando el paso del fluido a través de los mismos (Birginie et al., 2000; Buj et al., 2010).

Se puede por tanto concluir que, a pesar de la disminución de peso de los hormigones reciclados y, en mayor medida, en el hormigón 100% reciclado, el aumento de la resistencia y la reducción en el coeficiente de absorción capilar obtenidos después del

proceso de envejecimiento es indicativo de que éstos pueden ser utilizados en ambientes marinos, quedando completamente garantizado que sus propiedades físico-mecánicas no disminuirán.

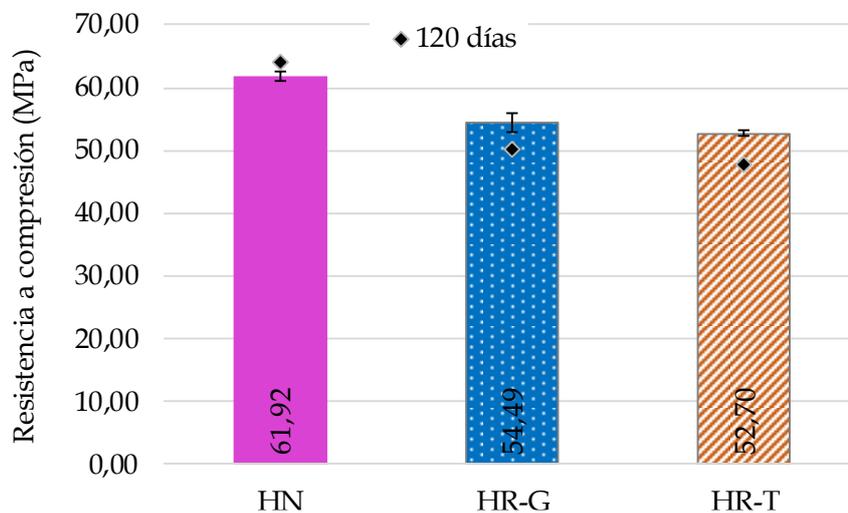


Figura 67. Resistencia a compresión de las muestras sometidas salinidad y resultados comparativos de las muestras ensayadas a 120 días

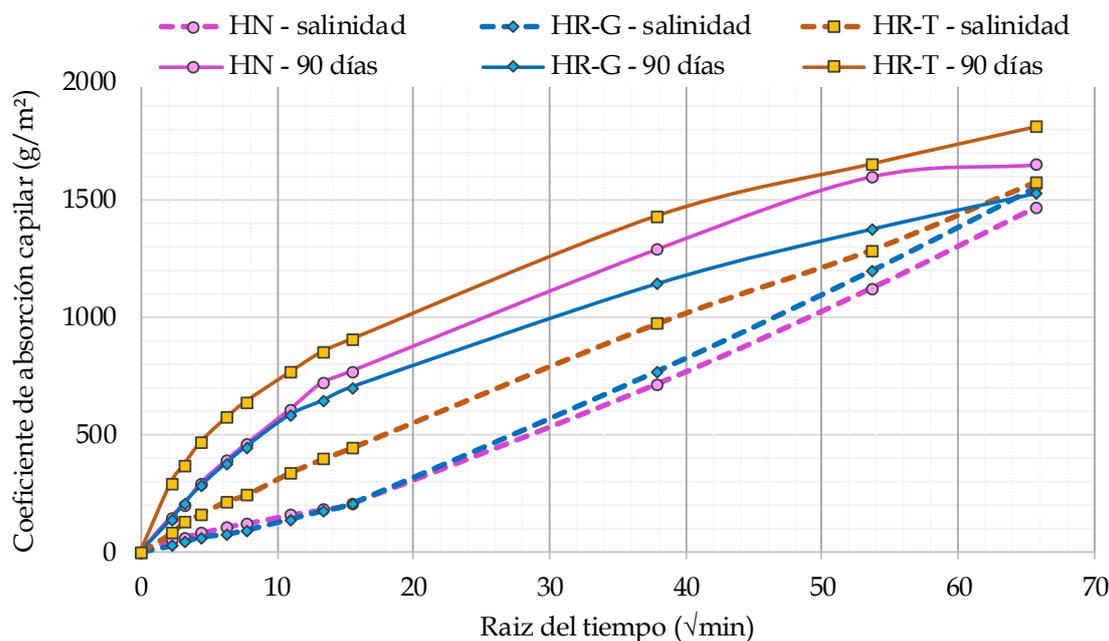


Figura 68. Coeficiente de absorción por capilaridad de los hormigones sometidos a salinidad y del ensayo realizado a 90 días

4.2.3.5. Consideraciones de la caracterización del hormigón no estructural fabricado con la dosificación definitiva

El estudio realizado sobre hormigones fabricados a escala de laboratorio, tanto con

árido grueso reciclado como con el reemplazo total del árido natural por reciclado, de acuerdo a la dosificación definitiva, ha puesto de manifiesto que la fracción del árido sustituida tiene un efecto significativo en las propiedades analizadas, siendo mayor en el caso del reemplazo de ambas fracciones. A pesar de la pérdida de resistencia observada, del incremento de la absorción, así como de su peor comportamiento físico, mecánico y de durabilidad, se ha demostrado que la fabricación de hormigón no estructural con árido reciclado para su uso en piezas de mobiliario urbano cumple con los requisitos establecidos en la normativa de productos prefabricados de hormigón de resistencia a compresión (≥ 35 MPa) y de absorción de agua ($\leq 6\%$), para las condiciones de uso externo más desfavorable (AEN/CTN 127, 2004a).

El estudio del resto de propiedades, no incluidas en la norma UNE-EN 13198, ha mostrado que dichos hormigones pueden ser tan duraderos como el material convencional, excepto en la permeabilidad del producido con el 100% de los áridos reciclados (HR-T). No obstante, este factor es poco significativo en el caso del hormigón no estructural, por lo que estos hormigones exhibirían una durabilidad satisfactoria, quedando totalmente garantizado que sus propiedades físicas y mecánicas no disminuirán a lo largo de su vida útil.

Por lo tanto, los datos obtenidos proporcionan una base sólida para el uso de áridos reciclados, tanto gruesos como finos, en la fabricación a escala industrial de productos no estructurales para el uso indicado, aun así, se recomienda la prolongación en el tiempo de curado de los mismos para disminuir posibles efectos negativos de cara a su durabilidad a largo plazo.



4.3. Fabricación y viabilidad técnica de piezas de mobiliario urbano

Los resultados obtenidos a nivel de laboratorio han puesto de manifiesto la viabilidad técnica del empleo del árido reciclado objeto de estudio para la fabricación de hormigón no estructural. En consecuencia, y dada la escasez de trabajos que estudian el comportamiento de este tipo de piezas a escala real, la última fase de esta investigación ha consistido en una prueba industrial, en la que se han confeccionado bancos, considerados como prefabricados para mobiliario urbano por la norma UNE-EN 13198 (AEN/CTN 127, 2004a). Estos elementos fueron elaborados tanto con áridos naturales (P-HN) como con reciclados (P-HR-G y P-HR-T) y se colocaron en un área pública (Campus de Fuentenueva de la Universidad de Granada) con la finalidad de evaluar el comportamiento de sus propiedades durante dos años de uso en condiciones reales. Los ensayos realizados sobre las piezas (Tabla 32 y Figura 69 a Figura 79) han permitido evaluar en el tiempo su comportamiento desde el punto de vista de los requisitos normativos específicos, así como desde la perspectiva de otros ensayos de información complementaria. Concretamente se han analizado las características geométricas y superficiales, densidad del material, absorción de agua, resistencia a compresión, módulo de deformación, carbonatación natural, índice de rebote y velocidad de ultrasonidos. Los resultados obtenidos se discuten a continuación.

4.3.1. Características geométricas y superficiales

Desde el punto de vista estético el acabado superficial se considera una propiedad importante en los prefabricados para mobiliario urbano al tener que cumplir también una función decorativa; además, las condiciones superficiales están directamente relacionadas con el deterioro exterior del hormigón bajo la influencia de las acciones ambientales.

El análisis de las dimensiones de los bancos fabricados (Tabla 32) puso de manifiesto la ausencia de cambios significativos entre las piezas naturales y las recicladas. Además, se apreció paralelismo y planitud en todo su volumen externo, así como en sus paredes interiores (Figura 69). En relación al acabado superficial de las piezas elaboradas, las producidas con árido reciclado mostraron un color con un tono

ligeramente más oscuro a medida que aumentó el contenido en árido reciclado; por otro lado no se observaron apreciables imperfecciones superficiales si se compararan con las elaborados con natural, salvo algunas coqueras de escasa importancia que son prácticamente imperceptibles a dos metros de distancia (AEN/CTN 127, 2004a). Por lo tanto, este estudio concluye que el uso de material granular reciclado no influye en las características del producto acabado, así como en el aspecto exterior, homogeneidad y uniformidad de color y textura.



Figura 69. Apariencia de los bancos a dos metros de distancia

4.3.2. Densidad

En la Figura 70 se muestran los valores de densidad que presentan los testigos extraídos de las piezas objeto de estudio correspondientes a los dos años de seguimiento. A los 28 días se observan unos porcentajes de variación con respecto al uso de árido natural ($2,516 \text{ kg/dm}^3$) del 3,8% y del 4,8% para los fabricados con la fracción gruesa reciclada (P-HR-G) y con la totalidad de los áridos reciclados (P-HR-T), respectivamente. Al final del período de seguimiento estos porcentajes fueron inapreciables, para ambos tipos de hormigones. Por tanto, y al igual que en otros estudios (Thomas García, 2012; Guo, Hui et al., 2018), se concluye que la densidad del hormigón reciclado no se ve afectada por la incorporación de material reciclado, ni tampoco evoluciona pasados los primeros meses de curado.



Tabla 32. Dimensiones de los bancos fabricados (valores medios y desviación); valor declarado por el fabricante (Figura 18a)

Banco	Dimensiones (m)	Valor declarado	P-HN-1		P-HN-2		P-HR-G-1		P-HR-G-2		P-HR-T-1		P-HR-T-2	
			Media	Desvia.	Media	Desvia.	Media	Desvia.	Media	Desvia.	Media	Desvia.	Media	Desvia.
Planta	Ancho	0,600	0,603	0,001	0,602	0,005	0,603	0,003	0,603	0,004	0,605	0,000	0,604	0,003
	Largo	1,900	1,899	0,001	1,901	0,001	1,896	0,002	1,900	0,000	1,899	0,001	1,901	0,001
Alzado	Altura Exterior	0,500	0,500	0,005	0,499	0,001	0,503	0,009	0,500	0,002	0,499	0,001	0,501	0,005
	Altura Interior	0,380	0,379	0,005	0,376	0,003	0,381	0,007	0,377	0,002	0,378	0,003	0,379	0,004
	Espesor Pata Izq. Tras.	0,120	0,116	0,004	0,118	0,005	0,118	0,005	0,117	0,004	0,117	0,005	0,117	0,004
	Espesor Pata Izq. Del.	0,120	0,116	0,006	0,118	0,005	0,117	0,005	0,117	0,005	0,117	0,005	0,117	0,005
	Espesor Pata Dcha. Tras.	0,120	0,116	0,005	0,117	0,004	0,116	0,005	0,118	0,005	0,116	0,004	0,115	0,005
	Espesor Pata Dcha. Del.	0,120	0,117	0,005	0,116	0,005	0,116	0,005	0,115	0,005	0,117	0,005	0,115	0,005
	Largo Interior Tras.	1,660	1,667	0,010	1,666	0,008	1,662	0,009	1,665	0,010	1,666	0,008	1,669	0,008
	Largo Interior Del.	1,660	1,666	0,010	1,668	0,010	1,663	0,010	1,668	0,010	1,664	0,010	1,668	0,009
	Espesor Asiento Tras.	0,120	0,122	0,003	0,124	0,003	0,123	0,002	0,124	0,001	0,121	0,002	0,123	0,001
	Espesor Asiento Del.	0,120	0,121	0,001	0,121	0,001	0,121	0,001	0,121	0,000	0,121	0,001	0,121	0,002

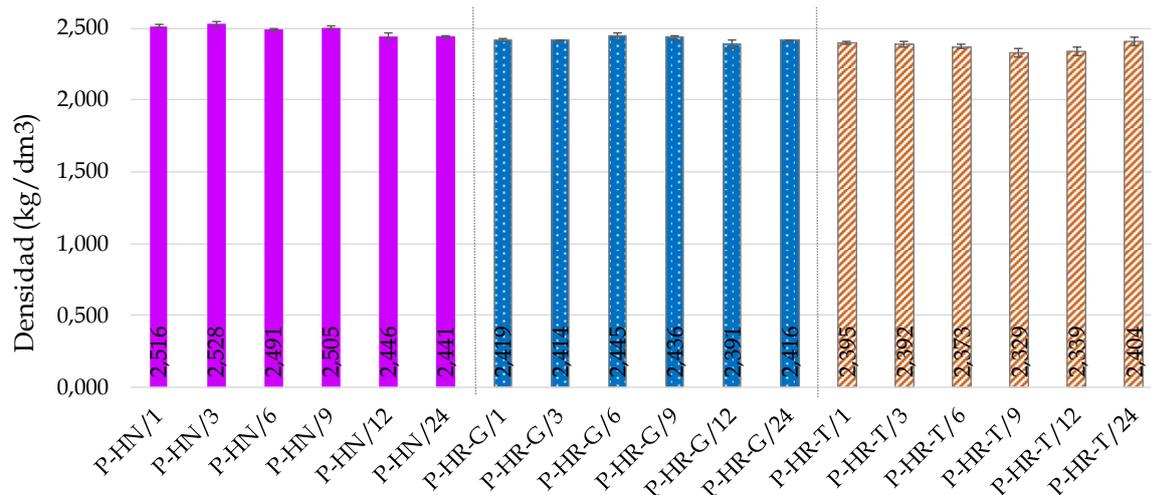


Figura 70. Densidad de los testigos ensayado

4.3.3. Absorción de agua

En la Figura 71 se muestran los coeficientes de absorción de agua de los testigos extraídos de los prefabricados estudiados. En todos los casos se observan valores inferiores al 6% establecido en la norma UNE-EN 13198 (AEN/CTN 127, 2004a) para la condición de uso más desfavorable (uso externo, sometidos a condiciones de hielo-deshielo y en contacto con sales descongelantes). También se observa que la absorción de agua de los hormigones reciclados se incrementa con la mayor presencia de árido reciclado, salvo al final del período de estudio en el que se muestra un gran descenso de la misma.

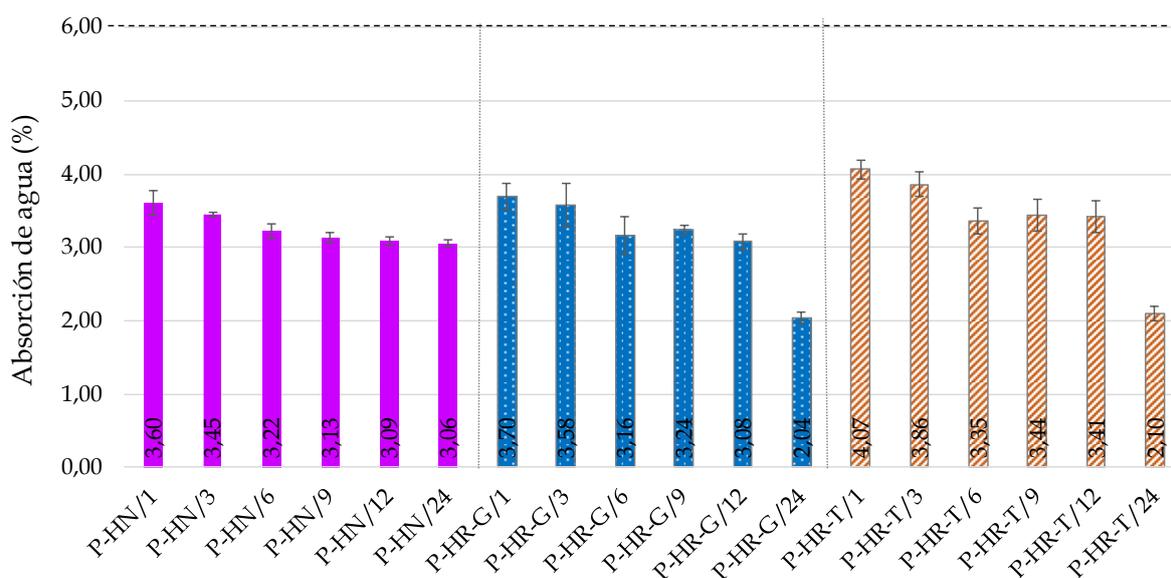


Figura 71. Absorción de agua de los hormigones ensayados en los testigos extraídos. Límite máximo del 6% para uso menos favorable (AEN/CTN 127, 2004a)

Los valores de la absorción de agua obtenidos de cada uno de los hormigones estudiados ponen de manifiesto, al igual que en otros estudios consultados, que la absorción del hormigón aumenta de forma proporcional a medida que se utiliza un mayor contenido de árido reciclado (Hadjieva-Zaharieva et al., 2003; Bravo et al., 2015b; Rodríguez et al., 2016; Thomas García, Setién, et al., 2018). Así, a los 28 días, el valor de este parámetro físico fue un 2,6 y 12,9% mayor al utilizar la fracción gruesa y ambas fracciones, respectivamente, frente al uso de árido natural (3,6%). Sin embargo, a los 24 meses el valor alcanzado por la absorción en las piezas fabricadas con árido reciclado fue un 30% menor para ambos hormigones reciclados, en comparación con el natural (3,06%).

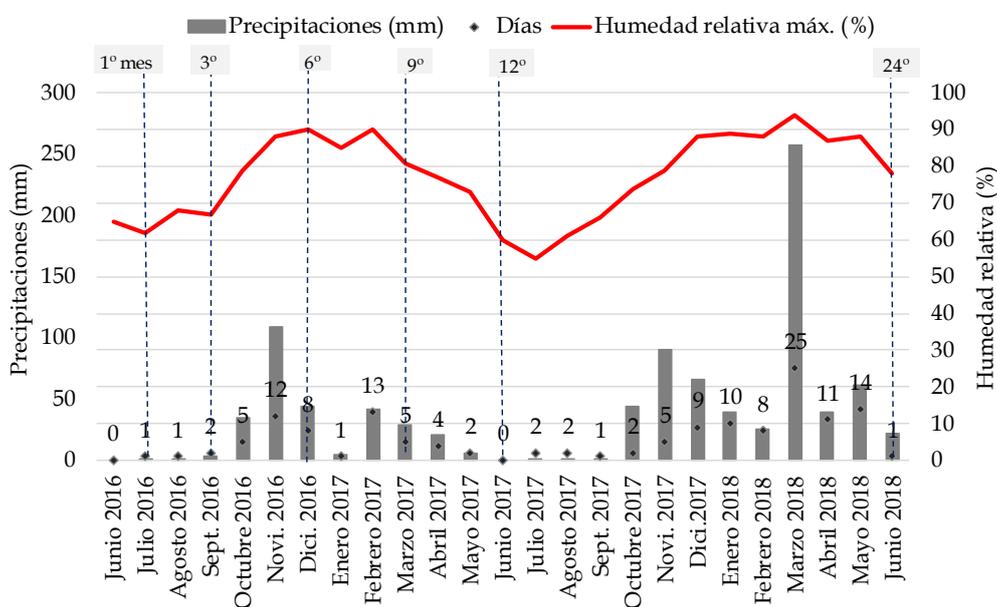


Figura 72. Condiciones climáticas en la ciudad de Granada, precipitaciones (mm y días) y humedad relativa máxima en el periodo junio-2016 a junio-2018 (<http://www.ugr.es/~velilla/meteo-albayzin/resumen.htm>)

El resultado obtenido se explica por la necesidad de uso de un mayor porcentaje de aditivo superplastificante (2,5% en el P-HR-G y 4% en el P-HR-T), con respecto al contenido utilizado en la fase de laboratorio (Figura 44) para obtener prefabricados de hormigón reciclado de adecuada trabajabilidad, que ha contribuido favorablemente a mejorar el coeficiente de absorción de agua con la incorporación de material reciclado. Esto hecho se debe al efecto dispersante de los aditivos a base de policarboxilato modificado, que logran una actividad más duradera en el tiempo, creciendo nuevos productos de hidratación del cemento más allá de los ya formados, lo que equivale a

un curado extendido, tal y como han confirmado otros autores (Santana Rodríguez, 2006; Matías et al., 2014; Silva et al., 2015; Bravo et al., 2018).

Si se relacionan los valores de la absorción con las condiciones climáticas (Figura 72) de la zona en la que las piezas se pusieron en servicio (Figura 71) se ha podido observar que la evolución de los mismos se ha visto condicionada por el curado, tanto en fábrica como en condiciones de uso. Durante los 3 primeros meses la evolución estuvo marcada por el curado realizado en fábrica, sin verse afectado por las condiciones climáticas; en este caso el curado consistió en un riego periódico con agua, bajo condiciones de humedad y temperatura estables (condiciones análogas a las de laboratorio).

Tras su puesta en servicio, sin embargo, los valores de la absorción se vieron afectados por las condiciones ambientales; así las precipitaciones del 5º y 6º mes dieron lugar a un punto de inflexión en su desarrollo, con un descenso en los valores obtenidos, principalmente en los hormigones reciclados. En el periodo comprendido entre el 6º y 12º mes, la absorción de los testigos ensayados muestra en todos los casos cambios poco significativos, debido a que su microestructura porosa se ha mantenido prácticamente invariable (Neville, 2011). Finalmente, en el periodo que va del 12º al 24º mes, se observa que la absorción de agua en el hormigón natural apenas varía, mientras que en los reciclados se produce una disminución brusca. Por tanto, el porcentaje de variación obtenido desde los 28 días (3,6% para P-HN, 3,7% para P-HR-G y 4,07% para P-HR-T) hasta los dos años de seguimiento fue de una disminución del 45 y 48% en los prefabricados con reemplazo parcial y total de los áridos, respectivamente, frente al 15% del producido con árido natural.

En este sentido, diversos autores han publicado variaciones similares en el coeficiente de absorción de agua de hormigones reciclados con el paso del tiempo, aunque atribuidas a unas condiciones de curado óptimas, que dieron lugar a una matriz cementosa con una estructura más densa respecto al volumen aparente de la muestra considerada (Hadjieva-Zaharieva et al., 2003; Bravo et al., 2015b; Rodríguez et al., 2016; Thomas García, Setién, et al., 2018; Guo, Hui et al., 2018). El resultado obtenido también se justifica, además del posible efecto que las condiciones climáticas hayan podido tener en el proceso de curado y del efecto del aditivo, porque con el paso del tiempo dio comienzo la carbonación natural del material, disminuyendo con ello la

capacidad de absorción de agua los hormigones fabricados con árido reciclado, con los descensos antes indicados, debido a la acumulación de carbonato cálcico en el interior de su sistema poroso (Neville y Brooks, 2010; Silva et al., 2015). Dichos resultados vienen a confirmar lo observado anteriormente en la absorción por capilaridad de hormigones carbonatados mediante el proceso acelerado.

4.3.4. Comportamiento mecánico

El análisis del comportamiento mecánico del material contenido en las piezas fabricadas se ha evaluado mediante el ensayo de resistencia a compresión, tanto sobre probetas (Figura 73) como sobre testigos (Figura 74). También se ha analizado el módulo de elasticidad a partir del método de frecuencia de resonancia sobre los propios testigos extraídos (Figura 75); este ensayo se usa principalmente para evaluar la solidez del hormigón en ensayos de durabilidad (Salman y Al-Amawee, 2006).

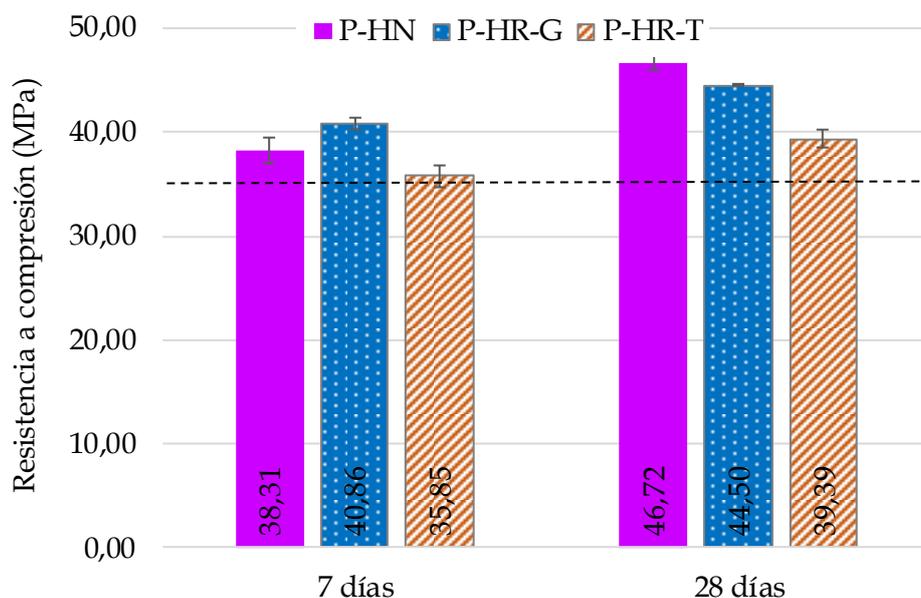


Figura 73. Resistencia de probetas normalizadas para los hormigones fabricados para rotura a 7 y 28 días. Límite mínimo de resistencia de 35 MPa para la condición de uso más desfavorable (AEN/CTN 127, 2004a)

En la Figura 73 se muestran los resultados obtenidos de la **resistencia a compresión** en las probetas normalizadas de cada uno de los hormigones estudiados, referida a la rotura de las elaboradas antes del llenado de los prefabricados y curadas en cámara húmeda, a 7 y 28 días. Se observa un rápido crecimiento de las resistencias iniciales en

los tres hormigones estudiados, que a los 7 días superaban el 91% de las obtenidas a los 28 días (Figura 73). Este resultado se explica, al igual que en la fase de laboratorio, por el mayor contenido de aditivo superplastificante añadido a las mezclas, que mejora sustancialmente el poder de unión entre la pasta de cemento y los áridos, además de garantizar una adecuada resistencia mecánica para el desmolde de las piezas en los primeros días (Alonso López, 2011), que a su vez también se debe al uso de un cemento de alta resistencia inicial. Si se comparan los valores obtenidos para las probetas a los 28 días se observa una reducción de las resistencias con el uso del árido reciclado con respecto a la del hormigón natural (46,72 MPa); esta reducción fue mayor con el reemplazo total, concretamente del 15,7% (P-HR-T) frente al 4,8% al utilizar sólo la fracción gruesa reciclada (P-HR-G). No obstante, en todos los casos las probetas fabricadas con árido reciclado superaron los valores de resistencia mínima exigida (35 MPa).

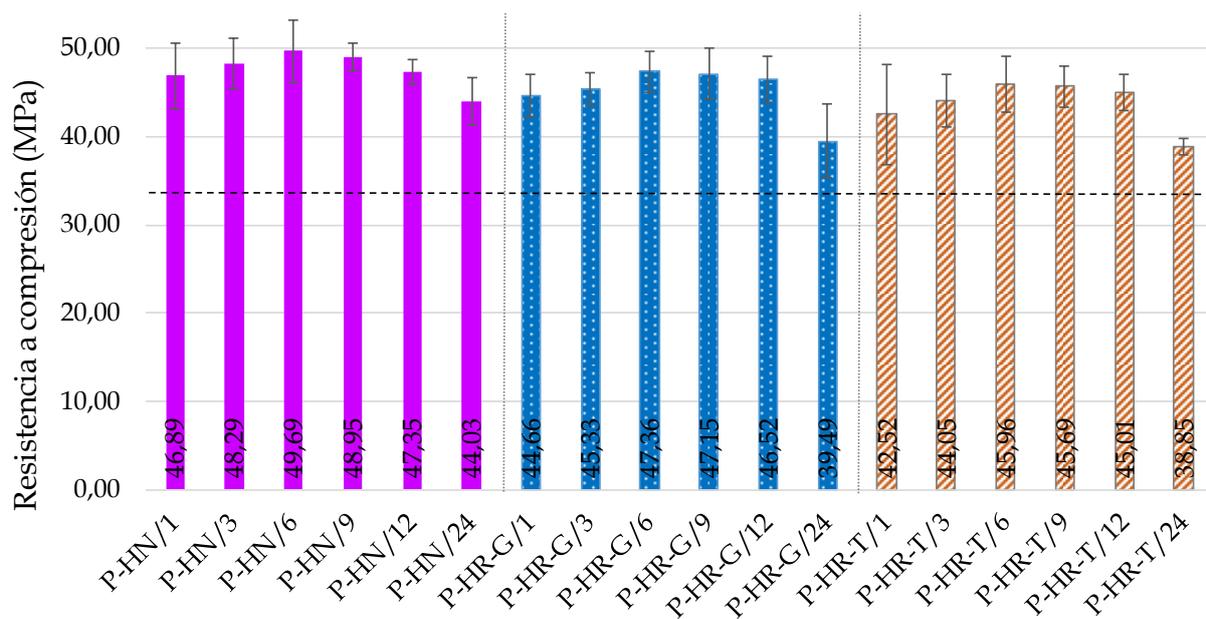


Figura 74. Resistencia de los testigos extraídos de cada hormigón analizado. Límite mínimo de resistencia de 35 MPa para la condición más desfavorable (AEN/CTN 127, 2004a)

En la Figura 74 se recogen los valores de la resistencia a compresión de los testigos extraídos de las piezas ensayadas, mostrando la influencia del uso del árido reciclado, así como la evolución de las mismas durante los dos años de seguimiento. Se puede observar una disminución en las resistencias de las piezas fabricadas con árido reciclado con respecto al hormigón de referencia (46,89 MPa a 28 días y 44,03 MPa a



dos años), siendo mayor al utilizar la totalidad de los áridos reciclados que al usar tan sólo la fracción gruesa. Así, a los 28 días esta reducción fue del 9,3% para P-HR-T y del 4,7% para P-HR-G, mientras que a los 24 meses alcanzó valores del 11,7% y 10,3%, respectivamente. No obstante, también en el caso de las piezas fabricadas con áridos reciclados los valores de resistencias obtenidos superaron los 35 MPa mínimos exigidos.

Diversos algunos autores han constatado aumentos en esta propiedad mecánica al utilizar áridos gruesos reciclados de hormigón de excelente calidad (Thomas García, 2012), aunque la disminución de resistencias observada también ha sido referenciada por otros autores (Kou et al., 2011; Verian et al., 2018; Nepomuceno et al., 2018). Ésta se atribuye normalmente a la presencia de una mayor cantidad de puntos débiles en el hormigón reciclado (uniones interfaciales áridos-pasta), entre otros factores.

Al igual que se hizo en el caso de la absorción, se han relacionado los valores de la resistencia a compresión con las condiciones climáticas (Figura 72) de la zona en la que las piezas se pusieron en servicio (Figura 74). En este caso también la evolución de las resistencias estuvo condicionada por el sistema de curado, primero en fábrica, y a partir de los 3 meses, por su exposición ya en condiciones de uso. Las precipitaciones observadas en el 5º y 6º mes contribuyeron a los valores máximos de resistencia, mientras que desde el 6º al 12º mes éstas disminuyeron, coincidiendo con una bajada en las precipitaciones. En el último periodo (del 12º a 24º mes), el descenso obtenido en las resistencias fue más considerable, siendo mayor en el caso de los hormigones reciclados que en el fabricado con árido natural, como consecuencia del posible deterioro del material reciclado con el paso de tiempo.

Por tanto, el porcentaje de variación total obtenido entre los valores de resistencia a 28 días y los de los 2 años fue del 11,5% en el P-HR-G, del 8,6% en el P-HR-T y del 6,1% en el prefabricado elaborado con árido natural (Figura 74). Diversos autores han concluido que el hormigón in-situ gana poca resistencia después de 28 días (Neville, 2011; Fonseca et al., 2011), aunque su evolución en el tiempo también va a depender de la estabilidad en la condiciones particulares del lugar de ensayo (Kou y Poon, 2013).

El análisis de los valores obtenidos para el **módulo de elasticidad dinámico** (Figura 75) en los testigos extraídos de cada uno de los prefabricados ensayados, confirma los

resultados discutidos en el caso de la resistencia a compresión. Así este parámetro disminuye a medida que aumenta el porcentaje de sustitución de un árido por otro, además de verse afectado de manera similar por las condiciones de curado. Esto se debe a que el uso de material reciclado y, en mayor medida, su fracción fina, supone una importante pérdida de rigidez en el hormigón fabricado con éste, por el aumento de puntos débiles en su interior. Igualmente, la degradación del mortero adherido a los áridos reciclados ha dado lugar al desarrollo de discontinuidades entre la matriz de cemento y los propios áridos lo que genera un mayor número puntos frágiles y, en consecuencia, favorece el proceso de deterioro del material a medida que avanza el tiempo y, con ello, el empeoramiento de su comportamiento mecánico.

Estudios consultados (Sidorova et al., 2014; Seara-Paz, 2015; González-Fonteboa et al., 2018) concluyen que a pesar de que el módulo de elasticidad tiende a estabilizarse pasados los primeros meses, la calidad y naturaleza del material reciclado, así como unas condiciones de ensayo más óptimas pueden dar lugar a la mejora de su microestructura y, con ello, al aumento de su módulo de elasticidad (Gómez-Soberón, 2002; Corinaldesi y Moriconi, 2009; Kou y Poon, 2013).

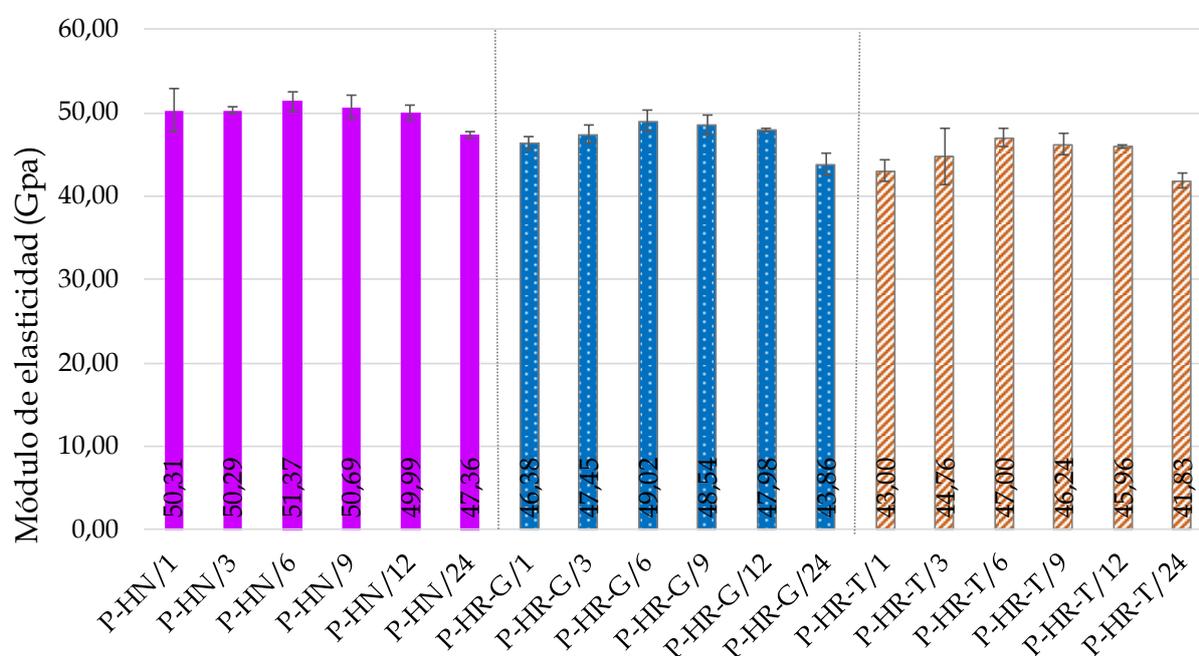


Figura 75. Módulo de elasticidad de los hormigones evaluados calculado sobre las probetas testigo

4.3.5. Carbonatación por exposición a la intemperie

Desde el punto de vista de la durabilidad de los prefabricados expuestos al aire libre

sin ningún tipo de protección, la carbonatación natural de la superficie hormigón se puede considerar un fenómeno fisicoquímico lento pero progresivo que, en presencia de humedad y del CO_2 atmosférico, forma ácido carbónico que reacciona con el hidróxido de calcio del cemento ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) para producir carbonato de calcio (CaCO_3). Esta reacción tiene como consecuencia principal la pérdida de reserva alcalina ($\text{pH} < 9$) del hormigón, así como la retracción del material, entre otras, que pueden contribuir a los procesos de corrosión de las armaduras. No obstante, en elementos sin armado estructural, la carbonatación mejora la dureza superficial, la resistencia y la impermeabilidad de los mismos, mediante el refinamiento de los poros de la matriz de cemento (Neville, 2011; Thomas García et al., 2013; Kou et al., 2014; Bravo et al., 2015a; Silva et al., 2015).

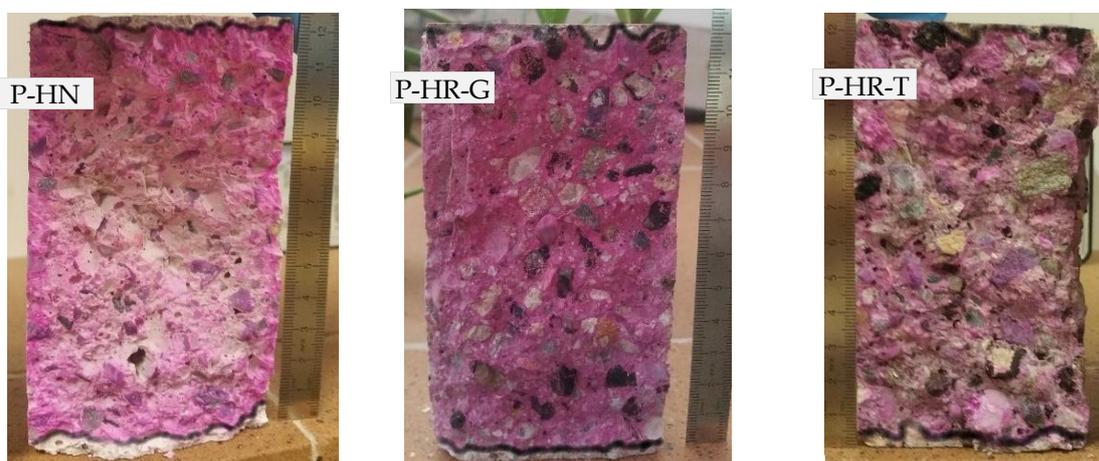


Figura 76. Profundidad de carbonatación natural de los testigos extraídos del asiento de los bancos fabricados

Con la finalidad de analizar la durabilidad de las piezas fabricadas y expuestas a condiciones de uso, se analizó la carbonatación natural de las mismas. La Figura 76 muestra la apariencia de algunos de los testigos extraídos de las piezas ensayadas, tras su rotura y aplicación de fenolftaleína al 1%. Se aprecia que el frente de carbonatación muestra un aspecto irregular, de hecho la presencia de áridos gruesos impide que el mismo avance como una línea perfectamente recta (Neville, 2011), siendo mayor en el caso en el que los áridos son reciclados (Faella et al., 2016). Igualmente, se observa que la parte inferior de los testigos experimenta una mayor carbonatación que la parte superior de los mismos, correspondiendo ésta con la zona del banco más protegida y no expuesta de forma directa a la lluvia (Figura 76).

La Figura 77 recoge la profundidad de carbonatación medida, así como la velocidad

de avance del frente a los 12 y 24 meses de seguimiento, ya que a edades inferiores este fenómeno fue inexistente. Se observa que los hormigones reciclados han sido más resistentes a la carbonatación que el prefabricado natural (5,94mm al año y 8,05mm a los 2 años) con porcentajes de mejora en torno al 35% para la pieza fabricada con árido grueso reciclado (P-HR-G) y de más del 20% para la producida con el reemplazo total (P-HR-T), tanto a los 12 como a los 24 meses. Sin embargo, en relación al desarrollo del frente de carbonatación en el tiempo, la mayor velocidad se ha observado en la pieza con la totalidad de los áridos reciclados, con un incremento a los dos años del 20%, frente al 14% de la fabricada con árido natural y del 10% para la reciclada con reemplazo parcial (P-HR-G), con respecto a los valores obtenidos a los 12 meses (4,39mm/ $\sqrt{\text{año}}$, 5,94mm/ $\sqrt{\text{año}}$ y 3,87mm/ $\sqrt{\text{año}}$, respectivamente).

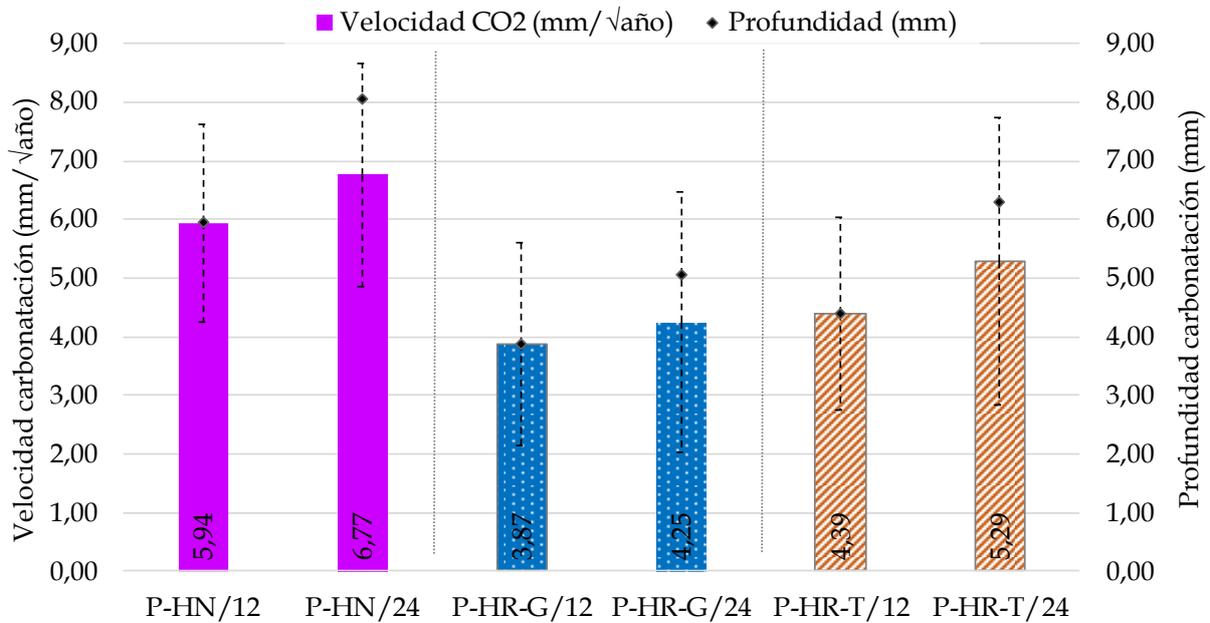


Figura 77. Velocidad y profundidad de carbonatación de los testigos ensayados a 12 y 24 meses

Por tanto, la mejora observada en los hormigones reciclados se justifica por varios motivos: el uso de superplastificante, en cierta medida los áridos reciclados más cercanos a la superficie ya estaban carbonatados, impidiendo con ello la entrada del CO₂ (Figura 76); y la prolongación en el tiempo de curado de las piezas en fábrica, según se recomendó en la discusión de resultados de la fase de laboratorio.

La bibliografía ha confirmado que la profundidad de carbonatación aumenta a medida que avanza la edad de exposición (Thomas García et al., 2013; Matías et al., 2014; de

Brito et al., 2016; Faella et al., 2016; Guo, Hui et al., 2018; Bravo et al., 2018). No obstante, el incremento de esta propiedad en condiciones de exposición real depende de diversos factores (Khunthongkeaw et al., 2006; Neville, 2011; Neves, Rui et al., 2013; Silva et al., 2015), entre los que se destacan: la concentración de CO₂ del ambiente considerado (en ciudad es mayor que en zonas rurales o costeras); la protección de las muestras a la lluvia; el uso de cenizas volantes; la mayor relación a/c utilizada en la mezcla; la interconexión de los poros capilares dentro de la matriz de cemento endurecida; además del uso de árido reciclado (porcentaje y fracción reemplazada y calidad del material) y si éstos estaban o no carbonatados.

4.3.6. Ensayos no destructivos

El estudio de la dureza superficial, medida a través del índice de rebote, y la velocidad de los impulsos ultrasónicos son técnicas no destructivas que han permitido analizar la madurez del hormigón en el tiempo tras mediciones in-situ (de Brito y Saikia, 2013; Bharathi Murugan y Natarajan, 2016; López-Uceda, Ayuso, Jiménez, et al., 2016). La Figura 78 y Figura 79 muestran la evolución de los resultados obtenidos para los parámetros indicados en los prefabricados de hormigón estudiados.

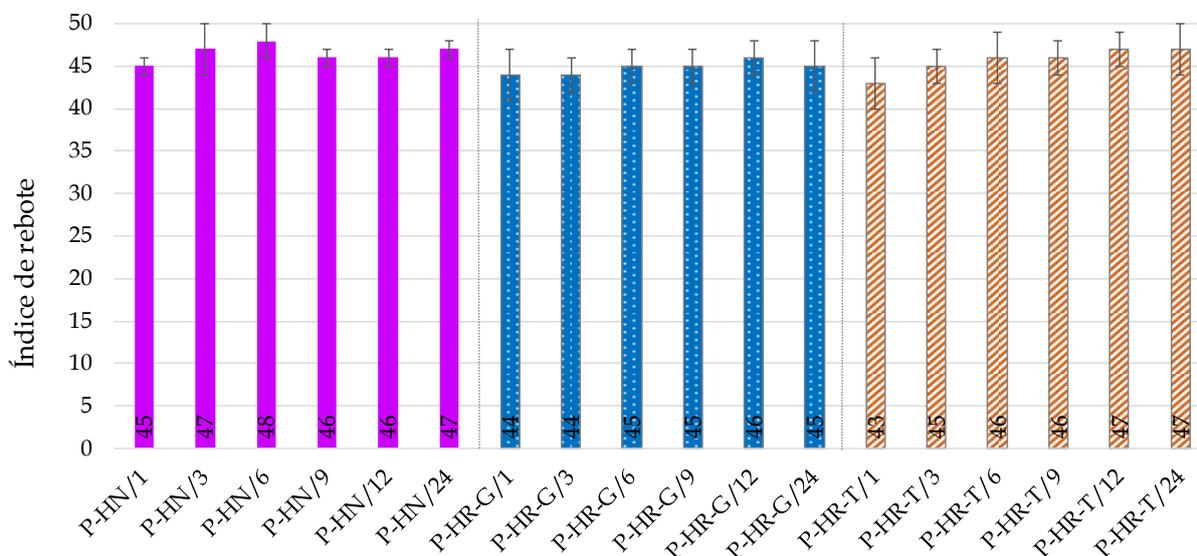


Figura 78. Índice de rebote de los hormigones ensayados obtenido in-situ

La Figura 78 muestra como la influencia del uso de árido reciclado en el **índice de rebote** ha sido poco significativa, tanto a los 28 días como a los dos años. En relación a la evolución en el tiempo, el comportamiento del hormigón natural ha sido distinto al

de los reciclados, con una tendencia en los resultados similar a la que se ha venido reflejando durante todo el estudio, en tanto que hay un efecto creciente hasta los 6 meses y una disminución paulatinamente hasta finalizar el periodo de seguimiento. En cambio, los hormigones reciclados han presentado un ligero aumento de este parámetro desde los 28 días hasta los 24 meses, y en mayor medida en el fabricado con la totalidad de los áridos reciclados, con un valor máximo del 9% respecto del obtenido a los 28 días (43).

Por tanto, teniendo en cuenta que este ensayo solo mide las propiedades relacionadas con la zona superficial del material (2-3 cm), y al igual que lo concluido en otros trabajos (SriRavindrarah et al., 1988; López-Uceda, Ayuso, Jiménez, et al., 2016), estos resultados se atribuyen a la carbonatación observada en las piezas ensayadas, que ha dado lugar a la mayor dureza de su superficie.

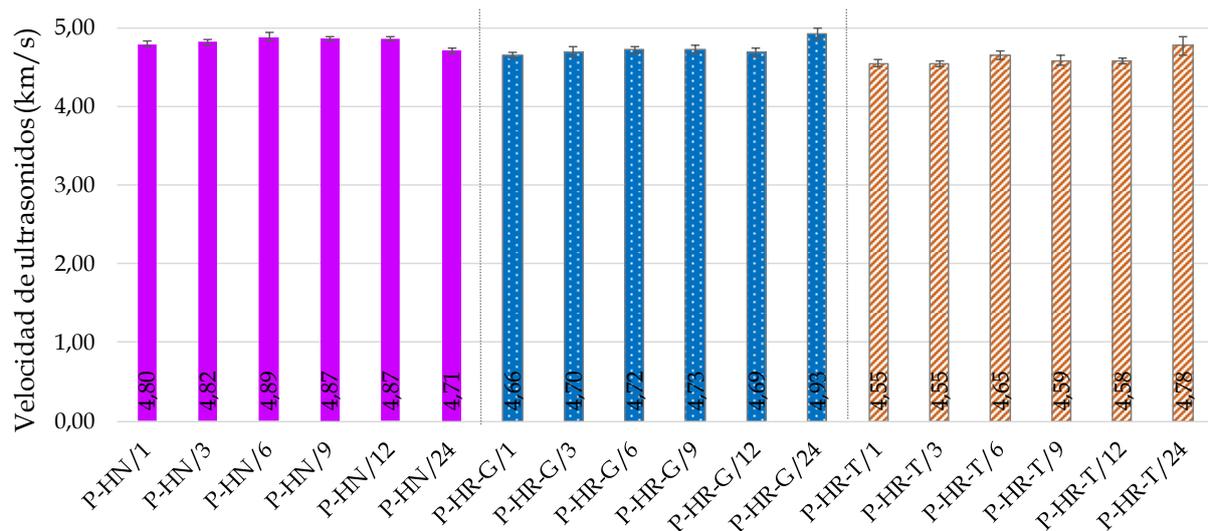


Figura 79. Velocidad de propagación del sonido determinada in-situ sobre los bancos ensayados

La **velocidad de ultrasonidos** de las piezas ensayadas se ha visto ligeramente afectada por la incorporación de árido reciclado, la cual decrece debido al reemplazo de un árido por otro (Figura 79). No obstante, los porcentajes de variación observados han sido poco significativos para ambos tipos de hormigones reciclados, en comparación con el de referencia (4,80 y 4,71 km/s a los 28 días y a los 24 meses). Dicha diferencia aumenta de forma leve al finalizar los dos años de seguimiento, con un porcentaje máximo del 5% observable en la pieza fabricada con árido grueso reciclado. Respecto a la evolución en el tiempo, la velocidad de ultrasonidos ha mostrado cambios poco significativos; no obstante, en el caso de la pieza fabricada con árido natural, la



velocidad tendió a disminuir, con un valor final un 2% menor que el obtenido a los 28 días (4,80 km/s). Por el contrario, en los hormigones reciclados se ha observado un ligero incremento paulatino de la misma hasta llegar al 5% para ambos prefabricados, P-HR-G y P-HR-T, al finalizar los dos años de seguimiento, en relación a lo obtenido a 28 días (4,66 km/s y 4,55 km/s, respectivamente).

La mejora observada está relacionada directamente con la anomalía presentada en el coeficiente de absorción de agua de los hormigones reciclados a los 24 meses, que ha dado lugar a un material más compacto, permitiendo que las ondas pasen a través de él de forma más rápida. Diferentes estudios han confirmado estos resultados indicando que la velocidad de ultrasonidos disminuye en el hormigón reciclado debido a su mayor porosidad, aunque este parámetro aumenta poco a poco con la edad (Silva et al., 2016b; López-Uceda, Ayuso, Jiménez, et al., 2016).

4.3.7. Consideraciones de la fabricación y puesta en uso de piezas

La aplicación realizada sobre prefabricados con áridos reciclados procedentes de los residuos de construcción y demolición a escala real revela la influencia de las características de estos áridos sobre las propiedades analizadas a largo plazo, aunque por lo general el uso de la fracción gruesa reciclada muestra mejor comportamiento en comparación con los obtenidos al utilizar la totalidad de los áridos reciclados.

Las piezas fabricadas con áridos reciclados cumplen con lo exigido por la normativa específica, tanto para la forma y aspecto exterior como para la resistencia a la intemperie del producto acabado tras dos años de seguimiento (resistencia > 35 MPa y absorción de agua < 6%). No obstante, en este caso particular, la menor absorción de agua obtenida en ambos hormigones reciclados al finalizar el periodo de estudio, refleja la carbonatación superficial del material, mientras que el descenso de su comportamiento mecánico muestra el deterioro producido en el árido reciclado con el paso del tiempo. La tendencia observada en el resto de propiedades analizadas (densidad, carbonatación, índice de rebote y velocidad de ultrasonidos) ha sido menos significativa, con valores que han resultado claramente satisfactorios, equiparándose a los obtenidos en los prefabricados convencionales.





5. CONCLUSIONES

A la luz del trabajo realizado en la presente Tesis Doctoral, a continuación se recogen las aportaciones más importantes que se han obtenido, clasificadas en cuatro apartados de acuerdo a los objetivos secundarios planteados:

- i. *Del establecimiento del estado del conocimiento en el uso de los áridos reciclados en la construcción en general y en la fabricación de piezas de mobiliario urbano en particular* se han obtenido las siguientes conclusiones:
 - En términos generales, los áridos reciclados muestran menores prestaciones técnicas que los naturales debido, principalmente, a su mayor absorción de agua como consecuencia del mortero adherido, el contenido de material cerámico y la presencia de impurezas. A pesar de ello, solos o combinados con áridos naturales, con un ajuste adecuado, permiten su uso en diferentes aplicaciones, tanto estructural como no estructural.
 - Teniendo en cuenta que el nivel de exigencia normativo que deben cumplir los áridos reciclados es bastante alto, especialmente en el caso de su uso para el hormigón estructural, es necesario explorar otras alternativas constructivas con un menor grado de requerimiento que permitan incrementar las tasas de reciclaje.
 - Los prefabricados para mobiliario urbano, con una función decorativa y menores exigencias normativas, se presentan como una oportunidad para el uso de los áridos reciclados como materias primas secundarias; además, hasta la fecha ha sido un campo de aplicación poco explorado.



- ii. En relación con la *caracterización de los áridos que se utilizarán en el estudio*, se han extraído las siguientes conclusiones:
 - Los áridos reciclados caracterizados se han considerado aptos para su uso en la fabricación de hormigón no estructural; a pesar de tener un contenido del 6,65% de partículas inferiores a 4 mm y un porcentaje de material bituminoso del 1,8%, los valores fueron ligeramente superiores a los admitidos por la Instrucción de Hormigón estructural EHE-08.
- iii. Los *estudios de dosificación del hormigón para la obtención de piezas prefabricadas para mobiliario urbano*, han permitido obtener las siguientes conclusiones:
 - En una primera fase experimental, la aplicación de la dosificación proporcionada por el fabricante de piezas de mobiliario urbano mostró que el uso de la arena reciclada da lugar a hormigones poco trabajables y, en consecuencia, con menores prestaciones mecánicas que el fabricado con árido grueso reciclado. A pesar de ello, las resistencias mecánicas obtenidas fueron excesivamente altas para dicho uso, debido al elevado contenido de cemento.
 - Primando la consistencia del hormigón sobre la resistencia mecánica, se realizó un estudio comparativo de varios métodos de premojado que permitió concluir que la variable tiempo de premojado es la que mayor incidencia mostró en las propiedades analizadas, frente a la cantidad de agua de premojado y la cantidad de agua total, siendo el tiempo óptimo de premojado 10 minutos.
 - El análisis de las propiedades de los hormigones fabricados aplicando diferentes métodos de premojado, así como del estudio de caracterización del sistema poroso, permite concluir que esta técnica de pretratamiento del árido reciclado únicamente mejora la trabajabilidad y la resistencia mecánica a 7 días, pero no las resistencias finales. Además, da lugar a la formación de una unión interfacial AGR-pasta más débil, si se compara con la de los áridos sin premojar.
 - La optimización de la dosificación mediante un ajuste en los contenidos de aditivo y de cemento y la utilización de los áridos reciclados sin premojar, pone de manifiesto la viabilidad técnica de los hormigones reciclados para la fabricación de piezas para mobiliario urbano sometidas a las condiciones de uso

externo más desfavorables (resistencia a compresión $> 35\text{MPa}$ y absorción de agua $< 6\%$). Los resultados obtenidos muestran el mejor comportamiento del hormigón fabricado con árido grueso reciclado frente al que usa de forma conjunta árido grueso y fino reciclado.

- iv. La *fabricación y viabilidad técnica de piezas de mobiliario urbano* ha permitido obtener las conclusiones que se enumeran a continuación:
- Desde el punto de vista técnico, se puede concluir que es posible producir bancos de hormigón para mobiliario urbano con árido reciclado que cumplan los requisitos exigidos por la normativa, tanto para la forma y aspecto exterior, como en lo referente a la resistencia a la intemperie del producto acabado, en términos de resistencia (clase resistente C35/45) y absorción de agua ($< 6\%$).
 - Los resultados obtenidos confirman la influencia de la fracción del árido utilizada sobre las propiedades analizadas. No obstante, la exposición de los bancos de hormigón durante 24 meses en condiciones reales de uso pone de manifiesto que los fabricados con árido reciclado pueden ser tan duraderos como los producidos con árido natural.



6. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

En vista de los resultados obtenidos, los aspectos no abordados en esta investigación y que se muestran muy interesantes para futuros estudios, son los siguientes:

- *Ampliar el tiempo de estudio.* La extracción programada de nuevos testigos y el análisis de sus resultados permitirá comprobar la evolución del comportamiento de las piezas fabricadas a largo plazo.
- *Análizar la evolución microestructural del material obtenido de las piezas fabricadas.* Debido al papel fundamental que ejerce la microestructura de los materiales cementicios sobre la durabilidad del hormigón a largo plazo, permitirá conocer más ampliamente este campo tan poco estudiado en la bibliografía especializada.
- *Estudiar la viabilidad coste/beneficio en la producción industrial de las piezas, así como su análisis de mercado.* El análisis del balance final coste/beneficio del proceso es fundamental para garantizar la viabilidad de su aplicación. Para ello se analizarán los costes y beneficios del mismo, desde la obtención de materia prima, hasta su transformación y uso, incluyendo los propios residuos generados en el proceso. El análisis de mercado permitirá conocer qué posibilidades tienen las piezas fabricadas en el mercado, tanto a nivel privado como en entidades locales (ayuntamientos).
- *Estudiar el análisis del ciclo de vida de las piezas de mobiliario urbano.* Mediante la aplicación del análisis del ciclo de vida se cuantificarán los impactos



ambientales asociados al uso de árido reciclado en la fabricación de los bancos de hormigón.

- *Fabricar hormigones reciclados de segunda generación.* En el marco de la estrategia de cero residuos, y a partir de las probetas de hormigón producidas para llevar a cabo este trabajo, se propone confeccionar nuevos hormigones que puedan dar lugar a futuros estudios de investigación sobre la viabilidad técnica, económica y medioambiental de los productos que con ellos se elaboren. Esto permitirá cerrar el flujo de los materiales, considerando la pérdida de calidad que pueden llegar a tener este tipo de recursos tras sucesivos procesos de reciclaje y su posterior fabricación.

ANEXO: DIFUSIÓN DE RESULTADOS

En cumplimiento de lo establecido en los Programas de doctorado regulados por el R.D. 1393/2007 y por el R.D. 99/2011, se aporta la siguiente publicación aceptada en un medio de impacto en su ámbito de conocimiento e incluida en el Journal Citation Reports, que contiene una parte de los resultados de la Tesis Doctoral.

- Z. Sánchez-Roldán, M. Martín-Morales, I. Valverde-Palacios, I. Valverde-Espinosa, M. Zamorano. *“Study of potential advantages of pre-soaking on the properties of pre-cast concrete made with recycled coarse aggregate”*. *Materiales de Construcción*, Vol. 66, Nº 321 (2016). Citado 4 veces (Scopus y WOS). **SJR (2017)**: factor de impacto 0,903; H-index: 21; categoría SJR Building and Construction, cuartil Q1, posición 34/161. **JCR (2017)**: factor de impacto 1,803; categoría JCR, Construction and Building technology, cuartil Q2, posición 24/62.

Adicionalmente se contribuye con las siguientes comunicaciones a congresos, también incluidas como parte de los resultados de esta investigación:

- Z. Sánchez-Roldán, M. Martín-Morales, G.M. Cuenca-Moyano. *“Aplicación de árido reciclado en piezas modulares de hormigón prefabricado”*. III Congreso Nacional de Áridos. Cáceres 2012. Nuevos tiempos, nuevas estrategias. Cáceres (España). 04/10/2012 - 06/10/2012.
- Z. Sánchez-Roldán, M. Martín-Morales, I. Valverde-Palacios, M. Zamorano. *“Influence of pre-soaked of recycled coarse aggregates on properties of non-structural*



concrete". 14th International Waste Management and Landfill symposium. S. Margherita di Pula, Cagliari, Sardinia (Italy). 30/09/2013 - 04/10/2013.

- Z. Sánchez-Roldán, M. Martín-Morales, I. Valverde-Palacios, I. Valverde-Espinosa, M. Zamorano. *"Study of porosity of concrete made with recycled coarse aggregate using optical microscope"*. WASCON 2015. 9th International Conference on the Environmental and Technical Implications of Construction with Alternative Materials. Resource Efficiency in Construction. Santander (España). 10/06/2015 – 12/06/2015.
- Z. Sánchez-Roldán, M. Martín-Morales, I. Valverde-Palacios, I. Valverde-Espinosa, M. Zamorano. *"Potential use of recycled aggregate in structural concrete"*. COINVEDI. III International Congress on Construction and Building Research. Madrid (España). 14/12/2015 - 16/12/2015.

PREMIOS

PREMIO AL MEJOR TRABAJO INVESTIGACIÓN APLICADO EN EL CAMPUS, I **Concurso de Iniciativas Ambientales de la Universidad de Granada**, a: Zoraida Sánchez Roldán ⁽¹⁾, María Martín Morales ⁽¹⁾, Ignacio Valverde Palacios ⁽¹⁾, Ignacio Valverde Espinosa ⁽¹⁾ y Montserrat Zamorano Toro ⁽²⁾. De los departamentos de ⁽¹⁾ Construcciones Arquitectónicas (ETS Ingeniería de la Edificación) y ⁽²⁾ de Ingeniería Civil (ETS de Caminos, Canales y Puertos) de la Universidad de Granada. Por la actuación presentada con el título **"PIEZAS DE MOBILIARIO URBANO SOSTENIBLES"** y otorgado por el Vicerrectorado de Responsabilidad Social, Igualdad e Inclusión de la Universidad de Granada.

BIBLIOGRAFÍA

- ABDULLA, N.A., 2015. «Effect of Recycled Coarse Aggregate Type on Concrete». *Journal of Materials in Civil Engineering (ASCE)*, 27, 10, pp. 1-9. ISSN 08991561. DOI 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001247.
- ABELL, A., WILLIS, K. y LANGE, D.A., 1999. «Mercury Intrusion Porosimetry and Image Analysis of Cement-Based Materials.» *Journal of colloid and interface science*, 211, 1, pp. 39-44. ISSN 1095-7103. DOI 10.1006/jcis.1998.5986.
- ABREU, L.P.F., OLIVEIRA, J.R.M., SILVA, H.M.R.D. y FONSECA, P. V, 2015. «Recycled asphalt mixtures produced with high percentage of different waste materials». *Construction and Building Materials*, 84, pp. 230-238. ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2015.03.063.
- ABREU, V., EVANGELISTA, L. y DE BRITO, J., 2018. «The effect of multi-recycling on the mechanical performance of coarse recycled aggregates concrete». *Construction and Building Materials*, 188, pp. 480-489. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2018.07.178.
- ABUKERSH, S.A., 2009. «High quality recycled aggregate concrete». *Edinburgh Napier University, UK. School of Engineering and the Built Environment*, pp. 342.
- AEN/CTN 127, 2004a. «UNE-EN 13198. Productos prefabricados de hormigón. Mobiliario urbano y productos de jardín». AENOR, mayo, pp. 22.
- AEN/CTN 127, 2004b. «UNE-EN 1338. Adoquines de hormigón. Especificaciones y métodos de ensayo». AENOR, abril, pp. 72.
- AEN/CTN 127, 2004c. «UNE-EN 1339. Baldosas de hormigón. Especificaciones y métodos de ensayo». AENOR, febrero, pp. 74.
- AEN/CTN 127, 2005a. «UNE-EN 1340. Bordillos prefabricados de hormigón. Especificaciones y métodos de ensayo». AENOR, febrero, pp. 72.
- AEN/CTN 127, 2005b. «UNE-EN 13748-1. Baldosas de terrazo. Parte 1: Baldosas de terrazo para uso interior». AENOR, junio, pp. 36.
- AEN/CTN 127, 2005c. «UNE-EN 13748-2. Baldosas de terrazo. Parte 2: Baldosas de terrazo para uso exterior». AENOR, marzo, pp. 46.
- AEN/CTN 127, 2006a. «UNE-EN 1338:2004/ AC. Adoquines de hormigón. Especificaciones y métodos de ensayo». AENOR, septiembre, pp. 6.
- AEN/CTN 127, 2006b. «UNE-EN 1339:2004/ AC. Baldosas de hormigón. Especificaciones y métodos de ensayo». AENOR, septiembre, pp. 6.
- AEN/CTN 127, 2007. «UNE-EN 1340:2004 Erratum. Bordillos prefabricados de hormigón. Especificaciones y métodos de ensayo». AENOR, marzo, pp. 10.



- AEN/CTN 127, 2011. «UNE-EN 15037-2:2009+A1. Productos prefabricados de hormigón Sistemas de forjado de vigueta y bovedilla Parte 2: Bovedillas de hormigón». AENOR, abril, pp. 38.
- AEN/CTN 127, 2013. «UNE-EN 13369. Reglas comunes para productos de hormigón prefabricado». AENOR, octubre, pp. 74.
- AEN/CTN 127, 2016. «UNE-EN 771-3:2011+A1. Especificaciones de piezas para fábrica de albañilería Parte 3: Bloques de hormigón (áridos densos y ligeros)». AENOR, marzo, pp. 46.
- AEN/CTN 146, 1996. «UNE-EN 933-2. Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos Parte 2: Determinación de la granulometría de las partículas Tamices de ensayo, tamaño nominal de las aberturas». AENOR, mayo, pp. 8.
- AEN/CTN 146, 1997. «UNE-EN 932-1. Ensayos para determinar las propiedades generales de los áridos. Parte 1: Métodos de muestreo». AENOR, febrero, pp. 30.
- AEN/CTN 146, 1999a. «UNE-EN 932-2. Ensayos para determinar las propiedades generales de los áridos. Parte 2: Métodos para la reducción de muestras de laboratorio». AENOR, noviembre, pp. 18.
- AEN/CTN 146, 1999b. «UNE-EN 933-2/1M. Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 1: Determinación de la granulometría de las partículas. Tamices de ensayo, tamaño nominal de las aberturas». AENOR, febrero, pp. 2.
- AEN/CTN 146, 2003a. «UNE-EN 13043:2003. Áridos para mezclas bituminosas y tratamientos superficiales de carreteras, aeropuertos y otras zonas pavimentadas». AENOR, noviembre, pp. 46.
- AEN/CTN 146, 2003b. «UNE-EN 13139. Áridos para morteros». AENOR, marzo, pp. 38.
- AEN/CTN 146, 2004. «UNE-EN 13139/AC. Áridos para morteros». AENOR, octubre, pp. 2.
- AEN/CTN 146, 2007a. «UNE-EN 1744-5. Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos. Parte 5: Determinación del contenido de cloruro soluble en ácido». AENOR, octubre, pp. 12.
- AEN/CTN 146, 2007b. «UNE-EN 1744-6. Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos. Parte 6: Determinación de la influencia del extracto de áridos reciclados en el tiempo de principio de fraguado del cemento.» AENOR, octubre, pp. 10.
- AEN/CTN 146, 2008a. «UNE-EN 13242:2003 + A1. Áridos para capas granulares y capas tratadas con conglomerados hidráulicos para uso en capas estructurales de firmes». AENOR, abril, pp. 46.
- AEN/CTN 146, 2008b. «UNE 146901. Áridos. Designación». AENOR, enero, pp. 8.
- AEN/CTN 146, 2009a. «UNE-EN 12620:2003+A1. Áridos para hormigón». AENOR, mayo, pp. 60.
- AEN/CTN 146, 2009b. «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». AENOR, noviembre, pp. 16.
- AEN/CTN 146, 2010a. «Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 11: Ensayo de clasificación de los componentes de los áridos gruesos reciclados». AENOR, enero, pp. 2.
- AEN/CTN 146, 2010b. «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». AENOR, septiembre, pp. 38.
- AEN/CTN 146, 2012. «UNE-EN 933-1. Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 1: Determinación de la granulometría de las partículas. Método del tamizado». AENOR, julio, pp. 20.
- AEN/CTN 146, 2013. «UNE-EN 1744-1:2010+A1. Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos. Parte 1: Análisis químico». AENOR, abril, pp. 64.

- AEN/CTN 146, 2014. «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». AENOR, mayo, pp. 54.
- AEN/CTN 146, 2015. «Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 8: Evaluación de los finos. Ensayo del equivalente de arena». AENOR, noviembre, pp. 24.
- AEN/CTN 146, 2016. «UNE-EN 933-8:2012+A1:2015/1M. Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 8: Evaluación de los finos. Ensayo del equivalente de arena». AENOR, marzo, pp. 2.
- AEN/CTN 22, 2004a. «UNE-EN 14146. Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación del módulo de elasticidad dinámico (con la medida de la frecuencia de resonancia fundamental)». AENOR, diciembre, pp. 18.
- AEN/CTN 22, 2004b. «UNE-EN 14147. Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la resistencia al envejecimiento por niebla salina». AENOR, julio, pp. 12.
- AEN/CTN 80, 2009. «UNE-EN 197-1. Cemento. Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes». AENOR, diciembre, pp. 40.
- AEN/CTN 80, 2012. «UNE 80305. Cementos blancos». AENOR, febrero, pp. 8.
- AEN/CTN 83, 2006. «UNE-EN 12504-4. Ensayos de hormigón en estructuras. Parte 4: Determinación de la velocidad de los impulsos ultrasónicos». AENOR, enero, pp. 18.
- AEN/CTN 83, 2008. «UNE 83982. Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo. Determinación de la absorción de agua por capilaridad del hormigón endurecido. Método Fagerlund». AENOR, julio, pp. 8.
- AEN/CTN 83, 2009a. «UNE-EN 12350-2. Ensayos de hormigón fresco. Parte 2: Ensayo de asentamiento». AENOR, noviembre, pp. 12.
- AEN/CTN 83, 2009b. «UNE-EN 12350-6. Ensayos de hormigón fresco. Parte 6: Determinación de la densidad». AENOR, noviembre, pp. 14.
- AEN/CTN 83, 2009c. «UNE-EN 12390-2. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 2: Fabricación y curado de probetas para ensayos de resistencia». AENOR, noviembre, pp. 12.
- AEN/CTN 83, 2009d. «UNE-EN 12390-3. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas». AENOR, septiembre, pp. 22.
- AEN/CTN 83, 2009e. «UNE-EN 12390-5. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 5: Resistencia a flexión de probetas». AENOR, septiembre, pp. 12.
- AEN/CTN 83, 2009f. «UNE-EN 12390-7. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 7: Densidad del hormigón endurecido». AENOR, octubre, pp. 14.
- AEN/CTN 83, 2009g. «UNE-EN 12390-8. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 8: Profundidad de penetración de agua bajo presión». AENOR, octubre, pp. 10.
- AEN/CTN 83, 2009h. «UNE-EN 12504-1. Ensayos de hormigón en estructuras. Parte 1: Testigos. Extracción, examen y ensayo a compresión». AENOR, junio, pp. 14.
- AEN/CTN 83, 2009i. «UNE-EN 13791 Evaluación de la resistencia a compresión in-situ en estructuras y elementos prefabricados de hormigón». AENOR, mayo, pp. 30.
- AEN/CTN 83, 2009j. «UNE-EN 934-1. Aditivos para hormigones, morteros y pastas. Parte 1: Requisitos comunes». AENOR, abril, pp. 12.
- AEN/CTN 83, 2010. «UNE-EN 12350-7. Ensayos de hormigón fresco. Parte 7: Determinación del contenido en aire. Métodos de presión». AENOR, enero, pp. 24.
- AEN/CTN 83, 2011a. «UNE-EN 12390-3:2009/AC. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación». AENOR, diciembre, pp. 2.



- AEN/CTN 83, 2011b. «UNE-EN 12390-8:2009/1M. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 8: Profundidad de penetración de agua bajo presión». AENOR, noviembre, pp. 6.
- AEN/CTN 83, 2012a. «UNE-EN 934-2:2010+A1. Aditivos para hormigones, morteros y pastas. Parte 2: Aditivos para hormigones. Definiciones, requisitos, conformidad, marcado y etiquetado». AENOR, diciembre, pp. 28.
- AEN/CTN 83, 2012b. «UNE-EN 998-1. Especificaciones de los morteros para albañilería. Parte 1: Morteros para revoco y enlucido». AENOR, diciembre, pp. 26.
- AEN/CTN 83, 2012c. «UNE-EN 998-2. Especificaciones de los morteros para albañilería. Parte 2: Morteros para albañilería». AENOR, mayo, pp. 30.
- AEN/CTN 83, 2013a. «UNE-EN 12504-2. Ensayos de hormigón en estructuras. Parte 2: Ensayos no destructivos. Determinación del índice de rebote». AENOR, septiembre, pp. 12.
- AEN/CTN 83, 2013b. «UNE 83993-2. Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo. Determinación de la velocidad de penetración de la carbonatación en el hormigón endurecido. Parte 2: Método acelerado». AENOR, mayo, pp. 10.
- AEN/CTN 83, 2014a. «UNE-EN 12390-1. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 1: Forma, dimensiones y otras características de las probetas y moldes». AENOR, pp. 16.
- AEN/CTN 83, 2014b. «UNE-EN 12390-13. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 13: Determinación del módulo secante de elasticidad en compresión». AENOR, julio, pp. 18.
- AEN/CTN 83, 2014c. «UNE 83980. Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo. Determinación de la absorción de agua, la densidad y la porosidad accesible al agua del hormigón». AENOR, diciembre, pp. 8.
- AGRELA, F., ALAEJOS GUTIÉRREZ, P. y SÁNCHEZ DE JUAN, M., 2013. «Properties of concrete with recycled aggregates». Handbook of Recycled Concrete and Demolition Waste. Woodhead Publishing Limited, pp. 304-329. ISBN 9780857096906.
- AGRELA, F., BARBUDO, M.A., RAMÍREZ, A., AYUSO, J., CARVAJAL, M.D. y JIMÉNEZ, J.R., 2012. «Construction of road sections using mixed recycled aggregates treated with cement in Malaga, Spain». Resources, Conservation and Recycling, 58, pp. 98-106. ISSN 0921-3449. DOI 10.1016/j.resconrec.2011.11.003.
- AGRELA, F., SÁNCHEZ DE JUAN, M., AYUSO, J., GERALDES, V.L. y JIMÉNEZ, J.R., 2011. «Limiting properties in the characterisation of mixed recycled aggregates for use in the manufacture of concrete». Construction and Building Materials, 25, 10, pp. 3950-3955. ISSN 09500618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2011.04.027.
- AGUILÓ ALONSO, M. y FERNÁNDEZ ORDOÑEZ, J.A., 1974. «Prefabricación: Teoría y práctica, volumen 1». Editores Técnicos Asociados. Barcelona. ISBN 8471461315, 9788471461315.
- AIT MOHAMED AMER, A., EZZIANE, K., BOUGARA, A. y ADJOUJ, M.H., 2016. «Rheological and mechanical behavior of concrete mixtures with recycled concrete aggregates». Construction and Building Materials, 123, pp. 300-308. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2016.06.107.
- AJDUKIEWICZ, A. y KLISZCZEWICZ, A., 2002. «Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS / HPC». Composites, 24, pp. 269-279.
- AKBULUT, H. y GÜRER, C., 2007. «Use of aggregates produced from marble quarry waste in asphalt pavements». Building and Environment, 42, 5, pp. 1921-1930. ISSN 0360-1323. DOI 10.1016/j.buildenv.2006.03.012.
- AKHTAR, A. y SARMAH, A.K., 2018. «Construction and demolition waste generation and properties of recycled aggregate concrete: A global perspective». Journal of Cleaner Production, 186, pp. 262-281. ISSN 0959-6526. DOI 10.1016/j.jclepro.2018.03.085.
- AL-BAYATI, H.K.A., TIGHE, S.L. y BAAJ, H., 2016. «Effect of Different Treatment Methods on the

- Interfacial Transition Zone Microstructure to Coarse Recycled Concrete Aggregate». The Green Technology in geotechnical and materials engineering. Toronto, Canada: pp. 1-29. ISBN 1519888430.
- AL-KINDI, N., AL-MOQBALI, A., QURESHI, M., AL-SHIDI, A. y ALA-ALDHEN, I., 2016. «Mechanical characteristics of recycled concrete aggregates as backfill material». *International Journal of Applied Engineering Research*, 11, 2, pp. 1342-1346.
- ALAM, M., SINGH, G., BAHAA, B. y SAHAR, M.N., 2013. «Acceptability of Demolished Concrete Waste Aggregate in Making high strength self compacting concrete». *International Journal of Civil Engineering (IJCE)*, 2, 3, pp. 1-12.
- ALIGIZAKI, K.K., 2006. «Pore structure of cement-based materials: testing, interpretation and requirements». Taylor & Francis. ISBN 0-419-22800-4.
- ALJASSAR, A.H., AL-FADALA, K.B. y ALI, M.A., 2005. «Recycling building demolition waste in hot-mix asphalt concrete: A case study in Kuwait». *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 7, 2, pp. 112-115. ISSN 14384957. DOI 10.1007/s10163-005-0135-4.
- ALONSO LÓPEZ, M. del M., 2011. «Comportamiento y compatibilidad de cementos y aditivos superplastificantes basados en policarboxilatos. Efecto de la naturaleza de los cementos y estructura de los aditivos». Universidad Autónoma de Madrid. Facultad de Ciencias, pp. 361.
- ALONSO, M.M., RODRÍGUEZ, A. y PUERTAS, F., 2018. «Viability of the use of construction and demolition waste aggregates in alkali-activated mortars». *Materiales de Construcción*, 68, 331. DOI 10.3989/mc.2018.07417.
- ANDERSON, D.J., SMITH, S.T. y AU, F.T.K., 2016. «Mechanical properties of concrete utilising waste ceramic as coarse aggregate». *Construction and Building Materials*, 117, pp. 20-28. ISSN 09500618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2016.04.153.
- ANEFA, 2017. «Revista anual 2016/2017». Asociación Nacional de Empresarios Fabricantes de Áridos, pp. 60.
- ANGULO, S.C., CARRIJO, P.M., FIGUEIREDO, A.D., CHAVES, A.P. y JOHN, V.M., 2010. «On the classification of mixed construction and demolition waste aggregate by porosity and its impact on the mechanical performance of concrete». *Materials and Structures*, 43, pp. 519-528. ISSN 1359-5997. DOI 10.1617/s11527-009-9508-9.
- ANON, 1975. «Old pavement recycled into new subbase». *Concrete Construction - World of Concrete*, 20, 10, pp. 441-442.
- AQIL, U., TATSUOKA, F., UCHIMURA, T., LOHANI, T.N., TOMITA, Y. y MATSUSHIMA, K., 2005. «Strength and deformation characteristics of recycled concrete aggregate as a backfill material». *Soils and Foundations. Japanese Geotechnical Society*, 45, 5, pp. 53-72. DOI 10.3208/sandf.45.5_53.
- ARIZZI, A. y CULTRONE, G., 2012. «La Influencia de la Interfase Árido-Matriz (ITZ) en las Propiedades de Morteros de Cal». *Revista de la sociedad española de minerología*, 16, junio, pp. 60-61.
- ARULRAJAH, A., PIRATHEEPAN, J., AATHEESAN, T. y BO, M.W., 2011. «Geotechnical Properties of Recycled Crushed Brick in Pavement Applications». *Journal of Materials in Civil Engineering (ASCE)*, 23, 10, pp. 1444-1542. DOI 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000319.
- ARULRAJAH, A., PIRATHEEPAN, J., ALI, M.M.Y. y BO, M.W., 2012. «Geotechnical Properties of Recycled Concrete Aggregate in Pavement Sub-Base Applications». *Journal of Materials in Civil Engineering (ASCE)*, 24, 7, pp. 924-932. ISSN 01496115. DOI 10.1520/GTJ103402.
- ARULRAJAH, A., PIRATHEEPAN, J., DISFANI, M.M. y BO, M.W., 2013. «Geotechnical Properties of Recycled Concrete Aggregate in Pavement Sub-Base Applications». *Journal of Materials in Civil Engineering (ASCE)*, 25, 5, pp. 1077-1088. DOI 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000652.
- ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE RECICLAJE DE RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN, 2017. «Informe de Producción y Gestión de Residuos de Construcción y Demolición (RCD) en España. Periodo 2011-2015». , 1 de mayo, pp. 52.



- ASTM, 2010. «D4404. Standard Test Method for Determination of Pore Volume and Pore Volume Distribution of Soil and Rock by Mercury Intrusion Porosimetry». ASTM INTERNATIONAL, pp. 7. DOI 10.1520/D4404-10.
- AYAN, V., LIMBACHIYA, M.C., OMER, K.R. y AZADANI, S.M.N., 2014. «Compaction assessment of recycled aggregates for use in unbound subbase application». *Journal of Civil Engineering and Management*, 20, 2, pp. 169-174. DOI 10.3846/13923730.2013.801882.
- AZAM, A.M. y CAMERON, D.A., 2013. «Laboratory Evaluation of Recycled Concrete Aggregate and Recycled Clay Masonry Blends in Pavement Applications». *Advances in Civil Engineering Materials*, 2, 1, pp. 328-346. ISSN 08950563. DOI 10.1520/ACEM20120016.
- BAIRAGI, N.K., VIDYADHARA, H.S. y RAVANDE, K., 1990. «Mix design procedure for recycled aggregate concrete». *Construction and Building Materials*, 4, 4, pp. 188-193. ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/0950-0618(90)90039-4.
- BARBUDO, M.A., 2012. «Aplicaciones de los áridos reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición en la construcción de infraestructuras viarias». Universidad de Córdoba. Departamento de Ingeniería Rural. Área de Ingeniería de la Construcción, pp. 119.
- BARBUDO, M.A., AGRELA, F., AYUSO, J., JIMÉNEZ, J.R. y POON, C.-S., 2012. «Statistical analysis of recycled aggregates derived from different sources for sub-base applications». *Construction and Building Materials*, 28, 1, pp. 129-138. ISSN 09500618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2011.07.035.
- BARBUDO, M.A., DE BRITO, J., EVANGELISTA, L., BRAVO, M. y AGRELA, F., 2013. «Influence of water-reducing admixtures on the mechanical performance of recycled concrete». *Journal of Cleaner Production*, 59, pp. 93-98. ISSN 09596526. DOI 10.1016/j.jclepro.2013.06.022.
- BARBUDO, M.A., GALVÍN, A.P., AGRELA, F., AYUSO, J. y JIMÉNEZ, J.R., 2012. «Correlation analysis between sulphate content and leaching of sulphates in recycled aggregates from construction and demolition wastes». *Waste Management*, 32, 6, pp. 1229-1235. ISSN 0956053X. DOI 10.1016/j.wasman.2012.02.005.
- BARRA DE OLIVEIRA, M., 1997. «Estudio de la durabilidad del hormigón de árido reciclado en su aplicación como hormigón armado». E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona,
- BARRA DE OLIVEIRA, M. y VÁZQUEZ-RAMONICH, E., 1996. «The influence of retained moisture in aggregates from recycling on the properties of new hardened concrete». *Waste Management*, 16, 1-3, pp. 113-117. ISSN 0956053X. DOI 10.1016/S0956-053X(96)00033-5.
- BARRIOS PADURA, Á., SEVILLA BARRIOS, J. y VALVERDE-ESPINOSA, I., 2009. «La construcción con hormigón armado». ISBN 978-84-92699-85-8.
- BASSANI, M. y TEFA, L., 2018. «Compaction and freeze-thaw degradation assessment of recycled aggregates from unseparated construction and demolition waste». *Construction and Building Materials*, 160, pp. 180-195. ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2017.11.052.
- BEAR, J. y BACHMAT, Y., 1990. «Introduction to modeling of transport phenomena in porous media». *Theory and applications of transport in porous media*. Kluwer Academic Publishers, pp. 575. ISBN 9780792311065.
- BEHERA, M., BHATTACHARYYA, S.K., MINOCHA, A.K., DEOLIYA, R. y MAITI, S., 2014. «Recycled aggregate from C&D waste & its use in concrete - A breakthrough towards sustainability in construction sector: A review». *Construction and Building Materials*, 68, pp. 501-516. ISSN 09500618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2014.07.003.
- BEKTAŞ, F., WANG, K. y CEYLAN, H., 2009. «Effects of crushed clay brick aggregate on mortar durability». *Construction and Building Materials*, 23, 5, pp. 1909-1914. ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2008.09.006.
- BELIN, P., HABERT, G., THIERY, M. y ROUSSEL, N., 2013. «Cement paste content and water

- absorption of recycled concrete coarse aggregates». *Materials and Structures*, 47, 9, pp. 1451-1465. ISSN 1359-5997. DOI 10.1617/s11527-013-0128-z.
- BELTRÁN, M.G., AGRELA, F., BARBUDO, M.A., AYUSO, J. y RAMÍREZ, A., 2014. «Mechanical and durability properties of concretes manufactured with biomass bottom ash and recycled coarse aggregates». *Construction and Building Materials*, 72, pp. 231-238. ISSN 09500618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2014.09.019.
- BENAVENTE GARCÍA, D., 2002. «Modelización y estimación de la durabilidad de materiales pétreos porosos frente a la cristalización de sales». Universidad de Alicante. Departamento de Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente, Facultad de Ciencias, pp. 291.
- BENNERT, T., PAPP, W.J., MAHER, A. y GUCUNSKI, N., 2000. «Utilization of construction and demolition debris under traffic-type loading in base and subbase applications». *Journal of the Transportation Research Board: Transportation Research Record*, 1714, 00-1350, pp. 33-39. ISSN 0361-1981. DOI 10.3141/1714-05.
- BERMEJO NUÑEZ, E.B., MORAGUES TERRADES, A., GÁLVEZ, J. y FERNÁNDEZ CÁNOVAS, M., 2010. «Permeabilidad y estructura porosa de hormigones autocompactantes de resistencia moderada». *Materiales de Construcción*, 60, 299, pp. 37-51. ISSN 0465-2746. DOI 10.3989/mc.2010.50709.
- BHARATHI MURUGAN, R. y NATARAJAN, C., 2016. «Investigation on precast concrete paver block with waste tyre crumb rubber». *Road Materials and Pavement Design*, 17, 3, pp. 719-736. ISSN 21647402. DOI 10.1080/14680629.2015.1119056.
- BIRGINIE, J.M., RIVAS, T., PRIETO, B. y AUGER, F., 2000. «Comparación de la resistencia a la alteración por niebla salina de dos calizas utilizadas en la construcción mediante métodos ponderales, métodos acústicos y tratamiento de imágenes». *Materiales de Construcción*, 2000, 259, pp. 27-43. DOI 10.3989/mc.2000.v50.i259.397.
- BONIFAZI, G., CAPOBIANCO, G., SERRANTI, S., EGGIMANN, M., WAGNER, E., DI MAIO, F. y LOTFI, S., 2015. «The ITZ in concrete with natural and recycled aggregates: Study of microstructures based on image and SEM analysis». *Proceedings of the 15th Euroseminar on Microscopy Applied to Building Materials*, June, pp. 299-308.
- BRAVO, M., DE BRITO, J., EVANGELISTA, L. y PACHECO, J., 2018. «Durability and shrinkage of concrete with CDW as recycled aggregates: Benefits from superplasticizer's incorporation and influence of CDW composition». *Construction and Building Materials*, 168, pp. 818-830. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2018.02.176.
- BRAVO, M., DE BRITO, J., PONTES, J. y EVANGELISTA, L., 2015a. «Durability performance of concrete with recycled aggregates from construction and demolition waste plants». *Construction and Building Materials*, 77, pp. 357-369. ISSN 09500618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2014.12.103.
- BRAVO, M., DE BRITO, J., PONTES, J. y EVANGELISTA, L., 2015b. «Mechanical performance of concrete made with aggregates from construction and demolition waste recycling plants». *Journal of Cleaner Production*, 99, pp. 59-74. ISSN 09596526. DOI 10.1016/j.jclepro.2015.03.012.
- BRAVO, M., SANTOS SILVA, A., DE BRITO, J. y EVANGELISTA, L., 2016. «Microstructure of Concrete with Aggregates from Construction and Demolition Waste Recycling Plants». *Microscopy and Microanalysis*, 22, 1, pp. 149-167. ISSN 1431-9276. DOI 10.1017/S1431927615015512.
- BUCK, A.D., 1973. «Recycle concrete». *Highw Res Rec*, 430, pp. 1-8.
- BUCK, A.D., 1977. «Recycled concrete as a source of aggregate». *J Am Concr Inst*, 74, 5, pp. 212-219.
- BUJ, O., LÓPEZ, P.L. y GISBERT, J., 2010. «Caracterización del sistema poroso y de su influencia en el deterioro por cristalización de sales en calizas y dolomías explotadas en Abanto (Zaragoza, España)». *Characterization of pore system and their influence on decay rates caused by salt weathering on limestones and dolostones quarried in Abanto (Zaragoza, Spain)*, 60, 299, pp. 99-114. ISSN 0465-2746. DOI 10.3989/mc.2010.50108.



- BUSTILLO REVUELTA, M., 2010. «Manual de RCD y áridos reciclados». Madrid. España: Fuego editores. ISBN 9788493527976.
- BUYLE-BODIN, F. y HADJIEVA-ZAHARIEVA, R., 2002. «Influence of industrially produced recycled aggregates on flow properties of concrete». *Materials and Structures*, 35, October, pp. 504-509. ISSN 1359-5997. DOI 10.1007/BF02483138.
- CABRAL, A.E.B., SCHALCH, V., MOLIN, D.C.C.D. y RIBEIRO, J.L.D., 2010. «Mechanical properties modeling of recycled aggregate concrete». *Construction and Building Materials*, 24, 4, pp. 421-430. ISSN 09500618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2009.10.011.
- CACHIM, P.B., 2009. «Mechanical properties of brick aggregate concrete». *Construction and Building Materials*, 23, 3, pp. 1292-1297. ISSN 09500618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2008.07.023.
- CALKINS, M., 2009. «Materials for Sustainable Sites. A Complete Guide to the Evaluation, Selection, and Use of Sustainable Construction Materials». Wiley. ISBN 9780470418925.
- CAMERON, D.A., AZAM, A. y RAHMAN, M., 2012. «Recycled clay masonry and recycled concrete aggregate blends in pavement». *GeoCongress 2012*. ASCE, march, pp. 1532-1541. ISSN 08950563. DOI 10.1061/9780784412121.158.
- CANTERO, B., DEL BOSQUE, I.F., MATÍAS, A. y MEDINA, C., 2018. «Statistically significant effects of mixed recycled aggregate on the physical-mechanical properties of structural concretes». *Construction and Building Materials*, 185, pp. 93-101. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2018.07.060.
- CARASEK, H., GIRARDI, A.C.C., ARAÚJO, R.C., ANGELIM, R. y CASCUDO, O., 2018. «Study and evaluation of construction and demolition waste recycled aggregates for masonry and rendering mortars [Estudo e avaliação de agregados reciclados de resíduo de construção e demolição para argamassas de assentamento e de revestimento]». *Ceramica*, 64, 370, pp. 288-300. DOI 10.1590/0366-69132018643702244.
- CARDOSO, R., SILVA, R.V., BRITO, J. de y DHIR, R.K., 2016. «Use of recycled aggregates from construction and demolition waste in geotechnical applications: A literature review». *Waste Management*, 49, pp. 131-145. ISSN 0956-053X. DOI 10.1016/j.wasman.2015.12.021.
- CARPIO, M., ROLDÁN-FONTANA, J., PACHECO-TORRES, R. y ORDÓÑEZ, J., 2016. «Construction waste estimation depending on urban planning options in the design stage of residential buildings». *Construction and Building Materials*, 113, pp. 561-570. ISSN 09500618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2016.03.061.
- CARRO-LÓPEZ, D., GONZÁLEZ-FONTEBOA, B., MARTÍNEZ-ABELLA, F., GONZÁLEZ-TABOADA, I., DE BRITO, J. y VARELA-PUGA, F., 2017. «Proportioning, Microstructure and Fresh Properties of Self-compacting Concrete with Recycled Sand». *Procedia Engineering*, 171, pp. 645-657. ISSN 1877-7058. DOI 10.1016/j.proeng.2017.01.401.
- CARTUXO, F., DE BRITO, J., EVANGELISTA, L., JIMÉNEZ, J.R. y LEDESMA, E.F., 2015. «Rheological behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates - Influence of the superplasticizer». *Construction and Building Materials*, 89, pp. 36-47. ISSN 09500618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2015.03.119.
- CEDEX, MINISTERIO DE FOMENTO y MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE, 2011. «Catálogo de residuos utilizables en construcción. Aditivos minerales». <http://www.cedexmateriales.es/2/catalogo-de-residuos/>.
- CEDEX, MINISTERIO DE FOMENTO y MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE, 2014. «Catálogo de Residuos Utilizables en Construcción. Ficha técnica residuos de construcción y demolición». CEDEX, pp. 1-54.
- CELAURO, C., BERNARDO, C. y GABRIELE, B., 2010. «Production of innovative, recycled and high-performance asphalt for road pavements». *Resources, Conservation and Recycling*, 54, 6, pp. 337-347. ISSN 0921-3449. DOI 10.1016/j.resconrec.2009.08.009.

- CEN/TC 154, 2010. «Pre edit draft of prEN 12620 2010. Aggregates for concrete». European Standard, enero, pp. 54.
- CHABOKI, H.R., GHALEHNOVI, M., KARIMIPOUR, A. y DE BRITO, J., 2018. «Experimental study on the flexural behaviour and ductility ratio of steel fibres coarse recycled aggregate concrete beams». *Construction and Building Materials*, 186, pp. 400-422. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2018.07.132.
- CHAKRADHARA RAO, M., BHATTACHARYYA, S.K. y BARAI, S. V., 2011. «Influence of field recycled coarse aggregate on properties of concrete». *Materials and Structures*, 44, 1, pp. 205-220. ISSN 1359-5997. DOI 10.1617/s11527-010-9620-x.
- CHINI, A.R., SHIOU-SAN, K., ARMAGHANI, J.M., ASCE y DUXBURY, J.P., 2001. «Test of recycled concrete aggregate in accelerated test tack». *Journal of Transportation Engineering*, 127, 6, pp. 468-492. DOI 10.1061/(ASCE)0733-947X(2001)127:6(486).
- CHOI, W.-C. y YUN, H.-D., 2013. «Long-term deflection and flexural behavior of reinforced concrete beams with recycled aggregate». *Materials & Design*, 51, pp. 742-750. ISSN 02613069. DOI 10.1016/j.matdes.2013.04.044.
- COLLINS, R.J., HARRIS, D.J. y SPARKES, W., 1998. «Blocks with Recycled Aggregate: Beam-and-Block Floors». Building Research Establishment, BRE Report.
- COMISIÓN EUROPEA, 2010a. «COM 2020. Comunicación de la Comisión Europea 2020. Una estrategia para un crecimiento inteligente, sostenibles e integrado». Bruselas, 3 de marzo, pp. 40.
- COMISIÓN EUROPEA, 2010b. «Reglamento (UE) n° 849/2010 de la Comisión, de 27 de septiembre de 2010, por el que se modifica el Reglamento (CE) n° 2150/2002 del Parlamento Europeo y del Consejo, relativo a las estadísticas sobre residuos». DOUE, 28 septiembre, pp. 40.
- COMISIÓN EUROPEA, 2011a. «COM 21. Comunicación de la comisión al parlamento europeo, el consejo, el comité económico y social europeo y el comité de las regiones. Una Europa que utilice eficazmente los recursos - Iniciativa emblemática con arreglo a la Estrategia Europa 2020». Bruselas, 26 de enero, pp. 1-22.
- COMISIÓN EUROPEA, 2011b. «COM 571. Comunicación de la comisión al parlamento europeo, el consejo, el comité económico y social europeo y el comité de las regiones. Hoja de ruta hacia una Europa eficiente en el uso de los recursos». Bruselas, 20 de septiembre, pp. 32.
- COMISIÓN EUROPEA, 2012. «COM 433. Comunicación de la comisión al parlamento europeo y al consejo. Estrategia para una competitividad sostenible del sector de la construcción y de sus empresas». Bruselas, 31 de julio, pp. 1-16.
- COMISIÓN EUROPEA, 2013. «Decisión N° 1386/2013/UE del Parlamento europeo y del consejo de 20 de noviembre de 2013 relativa al Programa general de acción de la Unión en materia de medio ambiente hasta 2020 "Vivir bien, respetando los límites de nuestro planeta" (VII PMA)». DOUE, 28 diciembre, pp. 30.
- COMISIÓN EUROPEA, 2014a. «COM 398/2. Comunicación de la comisión al parlamento europeo, el consejo, el comité económico y social europeo y el comité de las regiones. Hacia una economía circular: un programa de cero residuos para Europa». Bruselas, 25 de septiembre, pp. 1-17.
- COMISIÓN EUROPEA, 2014b. «COM 445. Comunicación de la comisión al parlamento europeo, el consejo, el comité económico y social europeo y el comité de las regiones. Oportunidades para un uso más eficiente de los recursos en el sector de la construcción». Bruselas, 1 de julio, pp. 1-29.
- COMISIÓN EUROPEA, 2014c. «Decisión de la Comisión de 18 de diciembre de 2014 por la que se modifica la Decisión 2000/532/CE, sobre la lista de residuos, de conformidad con la Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo (2014/955/UE)». DOUE, L 370, 30 de diciembre, pp. 44-86.
- COMISIÓN EUROPEA, 2014d. «Reglamento (UE) N° 1357/2014 de la Comisión de de 18 de diciembre de 2014 por el que se sustituye el anexo III de la Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y



- del Consejo, sobre los residuos y por la que se derogan determinadas Directivas». DOUE, L 365, 19 de diciembre, pp. 89-96.
- COMISIÓN EUROPEA, 2015. «COM 614. Comunicación de la comisión al parlamento europeo, el consejo, el comité económico y social europeo y el comité de las regiones. Cerrar el círculo: Un plan de acción de la UE para la economía circular (COM 614)». Bruselas, 2 de diciembre, pp. 24.
- COMISIÓN EUROPEA, 2016a. «COM 739. Comunicación de la comisión al parlamento europeo, el consejo, el comité económico y social europeo y el comité de las regiones. Próximas etapas para un futuro europeo sostenible. Acción europea para la sostenibilidad». Bruselas, 22 de noviembre, pp. 22.
- COMISIÓN EUROPEA, 2016b. «COM 773. Comunicación de la comisión. Plan de trabajo sobre diseño ecológico 2016-2019». Bruselas, 8 de julio, pp. 11.
- COMISIÓN EUROPEA, 2016c. «Protocolo de gestión de residuos de construcción y demolición en la UE». Comisión Europea y ECORYS. Ref. Ares(2016)6914779 - 12/12/2016, septiembre, pp. 61.
- COMISIÓN EUROPEA, 2017. «COM 33. Informe de la comisión al parlamento europeo, al consejo, al comité económico y social europeo y al comité de las regiones sobre la aplicación del plan de acción para la economía circular». Bruselas, 26 de enero, pp. 1-15.
- COMISIÓN EUROPEA, 2018. «COM 29. Comunicación de la comisión al parlamento europeo, al consejo, al comité económico y social europeo y al comité de las regiones. Marco de seguimiento para la economía circular». Bruselas, 16 de enero, pp. 13.
- CONSEJERÍA DE MEDIO AMBIENTE, 2010. «Decreto 397/2010, de 2 de noviembre, por el que se aprueba el Plan Director Territorial de Residuos No Peligrosos de Andalucía 2010-2019.» BOJA, 231, 25 de noviembre, pp. 54.
- CONSEJERÍA DE MEDIO AMBIENTE, 2012. «Decreto 73/2012, de 20 de marzo, por el que se aprueba el Reglamento de Residuos de Andalucía.» BOJA, 81, 26 de abril, pp. 152.
- CONSEJO DE LA UNIÓN EUROPEA, 2002. «Directiva 1999/31/CE del Consejo de 26 de abril de 1999 relativa al vertido de residuos». DOUE, L 1982, 16 de julio, pp. 19.
- CONSEJO EUROPEO, 2010. «EUCO 13/10, Consejo Europeo de 17 de junio de 2012. Conclusiones». Bruselas, 17 de junio, pp. 15.
- CORINALDESI, V., 2012. «Environmentally-friendly bedding mortars for repair of historical buildings». *Construction and Building Materials*, 35, pp. 778-784. ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2012.04.131.
- CORINALDESI, V., GIUGGIOLINI, M. y MORICONI, G., 2002. «Use of rubble from building demolition in mortars». *Waste Management*, 22, 8, pp. 893-899. ISSN 0956-053X. DOI 10.1016/S0956-053X(02)00087-9.
- CORINALDESI, V. y MORICONI, G., 2009. «Influence of mineral additions on the performance of 100% recycled aggregate concrete». *Construction and Building Materials*, 23, 8, pp. 2869-2876. ISSN 09500618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2009.02.004.
- CORINALDESI, V. y MORICONI, G., 2011. «The role of industrial by-products in self-compacting concrete». *Construction and Building Materials*, 25, 8, pp. 3181-3186. ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2011.03.001.
- CORINALDESI, V., MORICONI, G. y NAIK, T.R., 2010. «Characterization of marble powder for its use in mortar and concrete». *Construction and Building Materials*, 24, 1, pp. 113-117. ISSN 09500618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2009.08.013.
- CSIRO, 2002. «Guide to the use of recycled concrete and masonry materials (HB 155-2002)». Standars Australia and Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO), pp. 80.
- CUENCA-MOYANO, G.M., MARTÍN-MORALES, M., BONOLI, A. y VALVERDE-PALACIOS, I., 2018.

- «Environmental assessment of masonry mortars made with natural and recycled aggregates». The International Journal of Life Cycle Assessment. JLCA-D-17-00240R2, 1º Online. DOI 10.1007/s11367-018-1518-9.
- CUENCA-MOYANO, G.M., MARTÍN-MORALES, M., VALVERDE-PALACIOS, I., VALVERDE-ESPINOSA, I. y ZAMORANO, M., 2014. «Influence of pre-soaked recycled fine aggregate on the properties of masonry mortar». *Construction and Building Materials*, 70, pp. 71-79. ISSN 09500618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2014.07.098.
- CULLEN, G., 1961. «El Paisaje Urbano. Tratado de estética urbanística». Elsevier Science & Technology, London: Ed. Blume. ISBN 84-7031-203-0.
- DAPENA, E., ALAEJOS GUTIÉRREZ, P., LOBET, A. y PÉREZ, D., 2011. «Effect of Recycled Sand Content on Characteristics of Mortars and Concretes». *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23, 4, pp. 414-422. ISSN 0899-1561. DOI 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000183.
- DE BRITO, J., FERREIRA, J., PACHECO, J., SOARES, D. y GUERREIRO, M., 2016. «Structural, material, mechanical and durability properties and behaviour of recycled aggregates concrete». *Journal of Building Engineering*, 6, pp. 1-16. ISSN 23527102. DOI 10.1016/j.job.2016.02.003.
- DE BRITO, J., KURDA, R. y RAPOSEIRO DA SILVA, P., 2018. «Can We Truly Predict the Compressive Strength of Concrete without Knowing the Properties of Aggregates?». *Applied Sciences*, 8, 7, pp. 1095. ISSN 2076-3417. DOI 10.3390/app8071095.
- DE BRITO, J., PEREIRA, A.S. y CORREIA, J.R., 2005. «Mechanical behaviour of non-structural concrete made with recycled ceramic aggregates». *Cement and Concrete Composites*, 27, 4, pp. 429-433. ISSN 09589465. DOI 10.1016/j.cemconcomp.2004.07.005.
- DE BRITO, J. y SAIKIA, N., 2013. «Recycled Aggregate in Concrete Use of Industrial, Construction and Demolition Waste». Springer. ISBN 9780857297037.
- DE LA HOZ-TORRES, M.L., MARTÍNEZ-AIRES, M.D., MARTÍN-MORALES, M. y PADILLO, D.P.R., 2018. «Whole body vibration and acoustic exposure in construction and demolition waste management». En: *Occupational Safety and Hygiene VI - Selected contributions from the International Symposium Occupational Safety and Hygiene, SHO 2018*. pp. 273-277. DOI 10.1201/9781351008884-48.
- DE OLIVEIRA ANDRADE, J.J., POSSAN, E., SQUIAVON, J.Z. y ORTOLAN, T.L.P., 2018. «Evaluation of mechanical properties and carbonation of mortars produced with construction and demolition waste». *Construction and Building Materials*, 161, pp. 70-83. ISSN 09500618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2017.11.089.
- DEBIEB, F., COURARD, L., KENAI, S. y DEGEIMBRE, R., 2010. «Mechanical and durability properties of concrete using contaminated recycled aggregates». *Cement and Concrete Composites*, 32, 6, pp. 421-426. ISSN 09589465. DOI 10.1016/j.cemconcomp.2010.03.004.
- DEBIEB, F. y KENAI, S., 2008. «The use of coarse and fine crushed bricks as aggregate in concrete». *Construction and Building Materials*, 22, 5, pp. 886-893. ISSN 09500618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2006.12.013.
- DHIR, R.K. y PAINE, K.A., 2003. «Demonstration project utilising coarse recycled aggregates». CTU/2403 Technical Report. Final Report to Department of Trade and Industry, University of Dundee, pp. 109.
- DIAMOND, S., 2000. «Mercury porosimetry an inappropriate method for the measurement of pore size distributions in cement-based materials». *Cement and Concrete Research*, 30, pp. 1517-1525. DOI 10.1016/S0008-8846(00)00370-7.
- DILBAS, H., ÇAKIR, Ö. y ŞİMŞEK, M., 2017. «Recycled Aggregate Concretes (RACs) for Structural Use: An Evaluation on Elasticity Modulus and Energy Capacities». *International Journal of Civil Engineering*, 15, pp. 247-261. ISSN 2383-3874. DOI 10.1007/s40999-016-0077-3.



- DIMITRIOU, G., SAVVA, P. y PETROU, M.F., 2018. «Enhancing mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete». *Construction and Building Materials*, 158, pp. 228-235. ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2017.09.137.
- DISFANI, M.M., ARULRAJAH, A., HAGHIGHI, H., MOHAMMADINIA, A. y HORPIBULSUK, S., 2014. «Flexural beam fatigue strength evaluation of crushed brick as a supplementary material in cement stabilized recycled concrete aggregates». *Construction and Building Materials*, 68, pp. 667-676. ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2014.07.007.
- DOMINGO CABO, A., LÁZARO, C., LÓPEZ GAYARRE, F., SERRANO-LÓPEZ, M.A. y LÓPEZ-COLINA PÉREZ, C., 2010. «Long term deformations by creep and shrinkage in recycled aggregate concrete». *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 43, 8, pp. 1147-1160. DOI 10.1617/s11527-009-9573-0.
- DOMINGO CABO, A., LÁZARO, C., LÓPEZ GAYARRE, F., SERRANO-LÓPEZ, M.A., SERNA, P. y CASTAÑO TABARES, J.O., 2009. «Creep and shrinkage of recycled aggregate concrete». *Construction and Building Materials*, 23, 7, pp. 2545-2553. ISSN 09500618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2009.02.018.
- DUAN, P., SHUI, Z. y WANG, G., 2012. «Evolution of pore structure and interfacial transition zone of concrete in seawater environment». *Second international conference on microstructural-related durability of cementitious composites*, April, pp. 11-13.
- ECKERT, M. y OLIVEIRA, M., 2017. «Mitigation of the negative effects of recycled aggregate water absorption in concrete technology». *Construction and Building Materials*, 133, pp. 416-424. ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2016.12.132.
- EL EUCH BEN SAID, S., EL EUCH KHAY, S. y LOULIZI, A., 2018. «Experimental Investigation of PCC Incorporating RAP». *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 12, 1. DOI 10.1186/s40069-018-0227-x.
- ESPINAR ALBERTÍ, X., 2009. «Aportación a la construcción sostenible: Prefabricados de hormigón con árido reciclado Vibrocomprimidos». *Demolición y Reciclaje*, 46, pp. 68-75.
- ESQUINAS, A.R., ÁLVAREZ, J.I., JIMÉNEZ, J.R., FERNÁNDEZ, J.M. y DE BRITO, J., 2018. «Durability of self-compacting concrete made with recovery filler from hot-mix asphalt plants». *Construction and Building Materials*, 161, pp. 407-419. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2017.11.142.
- ESTOLANO, V., FUCALE, S., VIEIRA FILHO, J.O., GABRIEL, D. y ALENCAR, Y., 2018. «Assessment of static and dynamic modulus of elasticity in concrete made with recycled aggregate from concrete precast rejects [Avaliação dos módulos de elasticidade estático e dinâmico de concretos produzidos com agregados reciclados oriundos de resíduos]». *Revista Materia*, 23, 1, pp. 13. DOI 10.1590/s1517-707620170001.0310.
- ETXEBERRIA, M., 2004. «Experimental study on microstructure and structural behaviour of recycled aggregate concrete». *Universitat Politecnica de Catalunya*, pp. 242.
- ETXEBERRIA, M., MARÍ, A.R. y VÁZQUEZ-RAMONICH, E., 2007. «Recycled aggregate concrete as structural material». *Materials and Structures*, 40, 1, pp. 529-541. ISSN 1877-2641. DOI 10.1617/s11527-006-9161-5.
- ETXEBERRIA, M., VÁZQUEZ-RAMONICH, E. y MARÍ, A.R., 2006. «Microstructure analysis of hardened recycled aggregate concrete». *Magazine of Concrete Research*, 58, 10, pp. 683-690. DOI 10.1680/mac.2006.58.10.683.
- ETXEBERRIA, M., VÁZQUEZ-RAMONICH, E., MARÍ, A.R. y BARRA DE OLIVEIRA, M., 2007. «Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete». *Cement and Concrete Research*, 37, 5, pp. 735-742. ISSN 00088846. DOI 10.1016/j.cemconres.2007.02.002.
- EUROPEAN COMMISSION, 2018a. «Guidelines for the waste audits before demolition and renovation works of buildings. UE Construction and Demolition Waste Management». Ref.

- Ares(2018)2360227 - 03/05/2018, April, pp. 37.
- EUROPEAN COMMISSION, 2018b. «Measuring progress towards circular economy in the European Union – Key indicators for a monitoring framework (SWD 17). Accompanying the document on a monitoring framework for the circular economy (COM 29)». Strasbourg, 16 January, pp. 60.
- EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY, 2017. «Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2016. An indicator-based report (EEA Report N° 1/2017)». Luxembourg, 1, pp. 424.
- EUROSTAT, 2017. «Waste Statistics/es. Statistics Explained». Comisión Europea, 12 de diciembre, pp. 13.
- EUROSTAT, 2018a. «Waste Statistics, gestión de residuos (env_wasgen)». Eurostat.
- EUROSTAT, 2018b. «Waste Statistics, tratamiento de residuos (env_wastrt)». Eurostat.
- EVANGELISTA, L. y DE BRITO, J., 2007. «Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates». *Cement and Concrete Composites*, 29, 5, pp. 397-401. ISSN 09589465. DOI 10.1016/j.cemconcomp.2006.12.004.
- EVANGELISTA, L. y DE BRITO, J., 2010. «Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates». *Cement and Concrete Composites*, 32, 1, pp. 9-14. ISSN 09589465. DOI 10.1016/j.cemconcomp.2009.09.005.
- EVANGELISTA, L. y DE BRITO, J., 2017. «Flexural Behaviour of Reinforced Concrete Beams Made with Fine Recycled Concrete Aggregates». *KSCE Journal of Civil Engineering*, 21, 1, pp. 353-363. DOI 10.1007/s12205-016-0653-8.
- EVANGELISTA, L., GUEDES, M., DE BRITO, J., FERRO, A.C. y PEREIRA, M.F., 2015. «Physical, chemical and mineralogical properties of fine recycled aggregates made from concrete waste». *Construction and Building Materials*, 86, pp. 178-188. ISSN 09500618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2015.03.112.
- EVERETT, D.H., 1972. «Manual of symbols and terminology for physicochemical quantities and units. Appendix II: Definitions, Terminology and Symbols in Colloid and Surface Chemistry». *Pure and Applied Chemistry*, 31, 4, pp. 577-638. DOI 10.1351/pac197231040577.
- FAELLA, C., LIMA, C., MARTINELLI, E., PEPE, M. y REALFONZO, R., 2016. «Mechanical and durability performance of sustainable structural concretes: An experimental study». *Cement and Concrete Composites*, 71, pp. 85-96. ISSN 09589465. DOI 10.1016/j.cemconcomp.2016.05.009.
- FAN, C.C., HUANG, R., HWANG, H. y CHAO, S.J., 2015. «The effects of different fine recycled concrete aggregates on the properties of Mortar». *Materials*, 8, 5, pp. 2658-2672. ISSN 19961944. DOI 10.3390/ma8052658.
- FEDERACIÓN ESPAÑOLA DE GESTORES DE RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN, 2015. «Informe de Producción y Gestión de Residuos de Construcción y Demolición (RCD) en España. Periodo 2009-2013». , 15 de febrero, pp. 1-50. ISSN 14397641 14394235. DOI 10.1002/cphc.201500273.
- FERNÁNDEZ-LEDESMA, E., JIMÉNEZ, J.R., AYUSO, J., FERNÁNDEZ, J.M. y 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, pp. 692-706. ISSN 0959-6526. DOI 10.1016/j.jclepro.2014.10.084.
- FERNÁNDEZ-LEDESMA, E., JIMÉNEZ, J.R., FERNÁNDEZ, J.M., GALVÍN, A.P., AGRELA, F. y BARBUDO, M.A., 2014. «Properties of masonry mortars manufactured with fine recycled concrete aggregates». *Construction and Building Materials*, 71, pp. 289-298. ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2014.08.080.
- FERNÁNDEZ CÁNOVAS, M., 2013. «Hormigón: adaptado a la Instrucción de Repección de Cementos y a la Instrucción de Hormigón Estructural EHE.» Ibergarceta Publicaciones, S.L. (10ª Edición). ISBN 97838003640.



- FERREIRA, L.M.M., BARRA DE OLIVEIRA, M. y DE BRITO, J., 2011. «Influence of the pre-saturation of recycled coarse concrete aggregates on concrete properties». Magazine of Concrete Research, 63, 8, pp. 617-627. ISSN 0024-9831. DOI 10.1680/mac.2011.63.8.617.
- FHWA, 2008. «User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction. Publication nº FHWA-RD-97-148». Federal Highway Administration Research and Technology. U.S. Department of Transportation, pp. 10.
- FIOL, F., THOMAS GARCÍA, C., MUÑOZ, C., ORTEGA-LÓPEZ, V. y MANSO, J.M., 2018. «The influence of recycled aggregates from precast elements on the mechanical properties of structural self-compacting concrete». Construction and Building Materials, 182, pp. 309-323. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2018.06.132.
- FISCHER, C. y WERGE, M., 2009. «EU as a Recycling Society. Present recycling levels of Municipal Waste and Construction & Demolition Waste in the EU. ETC/SCP working paper 2/2009». European Topic Centre on Resource and Waste Management. European Environment Agency, April, pp. 1-73.
- FONSECA, N., DE BRITO, J. y EVANGELISTA, L., 2011. «The influence of curing conditions on the mechanical performance of concrete made with recycled concrete waste». Cement and Concrete Composites, 33, 6, pp. 637-643. ISSN 0958-9465. DOI 10.1016/j.cemconcomp.2011.04.002.
- FORT, R., 1996. «Análisis del sistema poroso de las rocas». En: F. MARTÍN MINGARRO (ed.), Degradación y conservación del Patrimonio Arquitectónico. Madrid. España: Editorial Complutense, 1996, pp. 505. ISBN 8489365849, 9788489365841.
- FRONDISTOU-YANNAS, S., 1977. «Waste concrete as aggregate for new concrete». Journal Proceedings, 74, 8, pp. 373-376.
- GABR, A.R. y CAMERON, D.A., 2012. «Properties of Recycled Concrete Aggregate for Unbound Pavement Construction». Journal of Materials in Civil Engineering (ASCE), 24, 6, pp. 754-764. DOI 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000447.
- GAGNÉ, R., HOUEHANOU, E., JOLIN, M. y ESCAFFIT, P., 2011. «Study of the relationship between scaling resistance and sorptivity of concrete». Canadian Journal of Civil Engineering, 38, 11, pp. 1238-1248. ISSN 0315-1468. DOI 10.1139/I11-084.
- GALÁN GARCÍA, I., 2011. «Carbonatación del hormigón: combinación de CO₂ con las fases hidratadas del cemento y frente de cambio de pH». Universidad Complutense de Madrid. Facultad de ciencias químicas, pp. 202.
- GANJIAN, E., JALULL, G. y SADEGHI-POUYA, H., 2015. «Using waste materials and by-products to produce concrete paving blocks». Construction and Building Materials, 77, pp. 270-275. ISSN 09500618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2014.12.048.
- GARACH, L., LÓPEZ, M., AGRELA, F., ORDÓÑEZ, J., ALEGRE, F.J. y MOYA, J.A., 2015. «Improvement of bearing capacity in recycled aggregates suitable for use as unbound road sub-base». Materials, 8, 12, pp. 8804-8816. ISSN 19961944. DOI 10.3390/ma8125493.
- GENCEL, O., OZEL, C., KOKSAL, F., ERDOGMUS, E., MARTÍNEZ-BARRERA, G. y BROSTOW, W., 2012. «Properties of concrete paving blocks made with waste marble». Journal of Cleaner Production journal, 21, pp. 62-70. ISSN 14544164. DOI 10.1016/j.jclepro.2011.08.023.
- GERALDES, V.L., 2013. «Estudio de hormigones reciclados no estructurales fabricados con árido reciclado mixto: propiedades mecánicas y expansión debida al contenido de sulfatos». Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, pp. 641.
- GERD, 2012. «Guía Española de áridos reciclados procedentes de Residuos de Construcción y Demolición (RCD). Proyecto GEAR». Asociación Española de Gestores de RCD (GERD), pp. 142.
- GESOĞLU, M., GÜNEYISI, E., ÖZ, H.Ö., TAHA, I. y YASEMIN, M.T., 2015. «Failure characteristics of

- self-compacting concretes made with recycled aggregates». *Construction and Building Materials*, 98, pp. 334-344. ISSN 09500618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2015.08.036.
- GESOĞLU, M., GÜNEYİSİ, E., ÖZ, H.Ö., YASEMIN, M.T. y TAHA, I., 2015. «Durability and Shrinkage Characteristics of Self-Compacting Concretes Containing Recycled Coarse and/or Fine Aggregates.» *Advances in Materials Science & Engineering*, 2015, pp. 1-18. ISSN 16878434. DOI 10.1155/2015/278296.
- GHATAORA, G.S., ALOBAIDI, I. y MISAICE, S.G., 2006. «Use of recycled aggregates for cementitious backfill». *Proceedings Of The Institution Of Civil Engineers*, February, pp. 23-28. ISSN 1747-6526. DOI 10.1680/warm.2006.159.1.23.
- GÓMEZ-MEIJIDE, B. y PÉREZ, I., 2014. «Effects of the use of construction and demolition waste aggregates in cold asphalt mixtures». *Construction and Building Materials*, 51, pp. 267-277. ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2013.10.096.
- GÓMEZ-SOBERÓN, J.M., 2002. «Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate». *Cement and Concrete Research*, 32, 8, pp. 1301-1311. ISSN 00088846. DOI 10.1016/S0008-8846(02)00795-0.
- GÓMEZ, J.M., AGULLÓ, L. y VÁZQUEZ-RAMONICH, E., 2001. «Cualidades Físicas y Mecánicas de los Agregados Reciclados de Concreto. Aplicación en Concretos». *Construcción y Tecnología*, 13, 157, pp. 10-20.
- GONÇALVES, A., ESTEVES, A. y VIEIRA, M., 2004. «Influence of recycled concrete aggregates on concrete durability». *International RILEM conference on the use of recycled materials in buildings and structures*, Barcelona. España, pp. 554-562.
- GONZÁLEZ-COROMINAS, A. y ETXEBERRIA, M., 2014a. «Experimental analysis of properties of high performance recycled aggregate concrete». *Construction and Building Materials*, 52, pp. 227-235. ISSN 09500618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2013.11.054.
- GONZÁLEZ-COROMINAS, A. y ETXEBERRIA, M., 2014b. «Properties of high performance concrete made with recycled fine ceramic and coarse mixed aggregates». *Construction and Building Materials*, 68, pp. 618-626. ISSN 09500618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2014.07.016.
- GONZÁLEZ-COROMINAS, A., ETXEBERRIA, M. y POON, C.-S., 2017. «Influence of the Quality of Recycled Aggregates on the Mechanical and Durability Properties of High Performance Concrete». *Waste and Biomass Valorization*, 8, 5, pp. 1421-1432. DOI 10.1007/s12649-016-9637-7.
- GONZÁLEZ-FONTEBOA, B., 2002. «Hormigones con áridos reciclados procedentes de demoliciones : dosificaciones, propiedades mecánicas y comportamiento estructural a cortante». *Univerddade da Coruña. E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos. Departamento de Tecnología de la Construcción*, pp. 449.
- GONZÁLEZ-FONTEBOA, B. y MARTÍNEZ-ABELLA, F., 2005. «Recycled aggregates concrete: Aggregate and mix properties [Hormigones con áridos reciclados: Estudio de propiedades de los áridos y de las mezclas]». *Materiales de Construcción*, 55, 279, pp. 53-66. DOI 10.3989/mc.2005.v55.i279.198.
- GONZÁLEZ-FONTEBOA, B. y MARTÍNEZ-ABELLA, F., 2008. «Concretes with aggregates from demolition waste and silica fume. Materials and mechanical properties». *Building and Environment*, 43, 4, pp. 429-437. ISSN 03601323. DOI 10.1016/j.buildenv.2007.01.008.
- GONZÁLEZ-FONTEBOA, B., SEARA-PAZ, S., DE BRITO, J., GONZÁLEZ-TABOADA, I., MARTÍNEZ-ABELLA, F. y VASCO SILVA, R., 2018. «Recycled concrete with coarse recycled aggregate. An overview and analysis». *Materiales de Construcción*, 68, 330, pp. 151. ISSN 1988-3226. DOI 10.3989/mc.2018.13317.
- GONZÁLEZ-ISABEL, G., 1993. «Hormigón de Alta Resistencia». *INTEMAC (Instituto Técnico de Materiales y Construcciones)*. Madrid, pp. 316.



- GONZÁLEZ-TABOADA, I., GONZÁLEZ-FONTEBOA, B., MARTÍNEZ-ABELLA, F. y CARRO-LÓPEZ, D., 2016. «Study of recycled concrete aggregate quality and its relationship with recycled concrete compressive strength using database analysis». *Materiales de Construcción*, 66, 323. ISSN 19883226. DOI 10.3989/mc.2016.06415.
- GONZÁLEZ-TABOADA, I., GONZÁLEZ-FONTEBOA, B., MARTÍNEZ-ABELLA, F. y PÉREZ-ORDÓÑEZ, J.L., 2016. «Prediction of the mechanical properties of structural recycled concrete using multivariable regression and genetic programming». *Construction and Building Materials*, 106, pp. 480-499. ISSN 09500618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2015.12.136.
- GONZÁLEZ, J.G., RODRÍGUEZ ROBLES, D., VALDÉS, A.J., MORÁN-DEL POZO, J.M. y ROMERO, M.I.G., 2013. «Influence of Moisture States of Recycled Coarse Aggregates on the Slump Test». *Advanced Materials Research*, 742, pp. 379-383. ISSN 1662-8985. DOI 10.4028/www.scientific.net/AMR.742.379.
- GORISSE, F., 1981. «Ensayos y control de los hormigones». Editores Técnicos Asociados. Barcelona. ISBN 8471462141.
- GÜNEYISI, E., GESOĞLU, M., ALGIN, Z. y YAZICI, H., 2016. «Rheological and fresh properties of self-compacting concretes containing coarse and fine recycled concrete aggregates». *Construction and Building Materials*, 113, pp. 622-630. ISSN 09500618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2016.03.073.
- GÜNEYISI, E., GESOĞLU, M., KAREEM, Q. y İPEK, S., 2016. «Effect of Different Substitution of Natural Aggregate by Recycled Aggregate on Performance Characteristics of Pervious Concrete». *Materials and Structures*, 49, 1-2, pp. 521-536. ISSN 1359-5997. DOI 10.1617/s11527-014-0517-y.
- GUO, H., SHI, C., GUAN, X., ZHU, J., DING, Y., LING, T.-C., ZHANG, H. y WANG, Y., 2018. «Durability of recycled aggregate concrete – A review». *Cement and Concrete Composites*, 89, pp. 251-259. ISSN 0958-9465. DOI 10.1016/j.cemconcomp.2018.03.008.
- GUO, Z., TU, A., CHEN, C. y LEHMAN, D.E., 2018. «Mechanical properties, durability, and life-cycle assessment of concrete building blocks incorporating recycled concrete aggregates». *Journal of Cleaner Production*, 199, pp. 136-149. DOI 10.1016/j.jclepro.2018.07.069.
- HADJIEVA-ZAHARIEVA, R., BUYLE-BODIN, F., SKOCZYLAS, F. y WIRQUIN, E., 2003. «Assessment of the surface permeation properties of recycled aggregate concrete». *Cement and Concrete Composites*, 25, pp. 223-232. DOI 10.1016/S0958-9465(02)00010-0.
- HAIDER, I., CETIN, B., KAYA, Z., HATIPOGLU, M., CETIN, A. y AHMET, H.A., 2014. «Evaluation of the mechanical performance of recycled concrete aggregates used in highway base layers». *Geotechnical Special Publication*. pp. 3686-3694. DOI 10.1061/9780784413272.357.
- HANOUNS ROBAS, A., 2008. «Influencia de la variación de las propiedades del árido reciclado en el hormigón endurecido». *Universitat Politècnica de Catalunya*, pp. 95.
- HANSEN, T.C., 1986. «Recycled aggregates and recycled aggregate concrete second state-of-the-art report developments 1945-198». *Materials and Structures*, 19, 111, pp. 201-246.
- HANSEN, T.C., 1992. «Recycling of Demolished Concrete and Masonry». RILEM Report No. 6, London E and FN Spoon, pp. 336.
- HANSEN, T.C. y NARUD, H., 1983. «Strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate». *Concrete International*, 5, 01, pp. 79-83. ISSN 01624075.
- HARO MANCERA, V., 2009. «Estudio de la durabilidad de hormigones con árido reciclado». *Universitat Politècnica de Catalunya*, Tesina, pp. 111.
- HENDRIKS, C.F. y PIETERSEN, H.S., 1998. «Concrete: durable but also sustainable». En THOMAS TELFORD PUBLISHING (ed.), *Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate*. Delft University of Technology, Netherlands, pp. 1-18. DOI 10.1680/scuorca.27268.0001.
- HERRADOR, R., PÉREZ, P., GARACH, L. y ORDÓÑEZ, J., 2012. «Use of Recycled Construction and Demolition Waste Aggregate for Road Course Surfacing». *Journal of Transportation Engineering*,

- 138, 2, pp. 182-190. ISSN 0733-947X. DOI 10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000320.
- HOFFMANN, C., SCHUBERT, S., LEEMANN, A. y MOTAVALLI, M., 2012. «Recycled concrete and mixed rubble as aggregates: Influence of variations in composition on the concrete properties and their use as structural material». *Construction and Building Materials*, 35, pp. 701-709. ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2011.10.007.
- HOWLAND ALBEAR, J.J. y MARTÍN ACOSTA, A.R., 2013. «Estudio de la absorción capilar y la sorptividad de hormigones con áridos calizos cubanos». *Materiales de Construcción*, 63, 312, pp. 515-527. ISSN 0465-2746. DOI 10.3989/mc.2013.04812.
- HUANG, B., SHU, X. y LI, G., 2005. «Laboratory investigation of portland cement concrete containing recycled asphalt pavements». *Cement and Concrete Research*, 35, 10, pp. 2008-2013. ISSN 00088846. DOI 10.1016/j.cemconres.2005.05.002.
- HUDA, S.B. y ALAM, M.S., 2014. «Mechanical behavior of three generations of 100% repeated recycled coarse aggregate concrete». *Construction and Building Materials*, 65, pp. 574-582. ISSN 09500618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2014.05.010.
- HUDA, S.B. y ALAM, M.S., 2015. «Mechanical and Freeze-Thaw Durability Properties of Recycled Aggregate Concrete Made with Recycled Coarse Aggregate». *J. Mater. Civ. Eng.*, January 2015, pp. 1-9. ISSN 0899-1561. DOI 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001237.
- IHOBE, 2009. «Manual de Directrices para el uso de Áridos Reciclados en Obras Públicas de la Comunidad Autónoma del País Vasco». Sociedad Pública del Departamento de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio del Gobierno Vasco, pp. 44.
- ISMAIL, S. y RAMLI, M., 2014. «Effect of Different Moisture States of Surface-Treated Recycled Concrete Aggregate on Properties of Fresh and Hardened Concrete». *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Civil, Architectural Science and Engineering*, 8, 1, pp. 65-71.
- ISMAIL, S. y RAMLI, M., 2018. «Effect of hybrid fiber on the mechanical properties of recycled aggregate concrete». *Jurnal Teknologi*, 80, 5, pp. 1-12. DOI 10.11113/jt.v80.9736.
- JANKOVIC, K., NIKOLIC, D. y BOJOVIC, D., 2012. «Concrete paving blocks and flags made with crushed brick as aggregate». *Construction and Building Materials*, 28, 1, pp. 659-663. ISSN 09500618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2011.10.036.
- JEFATURA DEL ESTADO, 2011. «Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados». *BOE*, 181, 29 de julio, pp. 56.
- JERGA, J., 2004. «Physico-mechanical properties of carbonated concrete». *Construction and Building Materials*, 18, 9, pp. 645-652. ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2004.04.029.
- JIA, X., YE, F. y HUANG, B., 2015. «Utilization of Construction and Demolition Wastes in Low-Volume Roads for Rural Areas in China». *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2474, pp. 39-47. ISSN 0361-1981. DOI 10.3141/2474-05.
- JIMÉNEZ, C., APONTE, D., VÁZQUEZ-RAMONICH, E., BARRA DE OLIVEIRA, M. y VALLS, S., 2014. «Durability of recycled aggregate concrete designed with the Equivalent Mortar Volume (EMV) method: Validation under the Spanish context and its adaptation to Bolomey methodology». *Materiales de Construcción*, 63, 313, pp. 341-360. ISSN 0465-2746. DOI <http://dx.doi.org/10.3989/mc.2014.00913>.
- JIMÉNEZ, C., APONTE, D., VÁZQUEZ, E., BARRA DE OLIVEIRA, M. y VALLS, S., 2013. «Diseño de mezclas de hormigón reciclado mediante el método Volumen de Mortero Equivalente (EMV): Validación bajo el contexto español y su adaptación al método de diseño de Bolomey». *Materiales de Construcción*, 63, 311, pp. 341-360. ISSN 1988-3226. DOI 10.3989/mc.2012.01112.
- JIMÉNEZ, J.R., AGRELA, F., AYUSO, J., LÓPEZ AGUILAR, M. y LÓPEZ, M., 2011. «Estudio comparativo de los áridos reciclados de hormigón y mixtos como material para sub-bases de



- carreteras. A comparative study of recycled aggregates from concrete and mixed debris as material for unbound road sub-base». *Materiales de Construcción*, 61, 302, pp. 289-302. ISSN 0465-2746. DOI 10.3989/mc.2010.54009.
- JIMÉNEZ, J.R., AYUSO, J., GALVÍN, A.P., LÓPEZ, M. y 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, pp. 34-43. ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2012.02.042.
- JIMÉNEZ, J.R., AYUSO, J., LÓPEZ, M., FERNÁNDEZ, J.M. y DE BRITO, J., 2013. «Use of fine recycled aggregates from ceramic waste in masonry mortar manufacturing». *Construction and Building Materials*, 40, pp. 679-690. ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2012.11.036.
- JIMÉNEZ, L.F. y MORENO, E.I., 2015. «Durability Indicators in High Absorption Recycled Aggregate Concrete». *Advances in Materials Science and Engineering*, ISSN 16878442. DOI 10.1155/2015/505423.
- JIS, 2016a. «JIS A 5021: Recycled aggregate for concrete-class H». Japanese Standards Association, Tokyo, pp. 36.
- JIS, 2016b. «JIS A 5022: Recycled concrete using recycled aggregate class M». Japanese Standards Association, Tokyo, pp. 36.
- JIS, 2016c. «JIS A 5023: Recycled concrete using recycled aggregate Class L». Japanese Standards Association, Tokyo, pp. 36.
- JUAN-VALDÉS, A., RODRÍGUEZ ROBLES, D., GARCÍA-GONZÁLEZ, J., GUERRA-ROMERO, M.I. y MORÁN-DEL POZO, J.M., 2018. «Mechanical and microstructural characterization of non-structural precast concrete made with recycled mixed ceramic aggregates from construction and demolition wastes». *Journal of Cleaner Production*, 180, pp. 482-493. DOI 10.1016/j.jclepro.2018.01.191.
- JUNTA DE ANDALUCÍA, UCOPRESS y FEDER, 2015. «Gestión y tratamiento de residuos de construcción y demolición (RCD). Guía de buenas prácticas». Agencia de Obra Pública de la Junta de Andalucía. Consejería de Fomento y Vivienda. UCOPress. Editorial Universidad de Córdoba, pp. 36.
- KANDHAL, P.S., RAO, S.S., WATSON, D.E. y YOUNG, B., 1995. «Performance of Recycled Hot Mix Asphalt Mixtures. NCAT Report N° 95-1». National Center for Asphalt Technology. Auburn University, May, pp. 31.
- KAPOOR, K., SINGH, S.P. y SINGH, B., 2016. «Durability of self-compacting concrete made with Recycled Concrete Aggregates and mineral admixtures». *Construction and Building Materials*, 128, pp. 67-76. ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2016.10.026.
- KAREEM, A.I., NIKRAZ, H. y ASADI, H., 2018. «Evaluation of the double coated recycled concrete aggregates for hot mix asphalt». *Construction and Building Materials*, 172, pp. 544-552. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.158.
- KARIM, Y., KHAN, Z., ALSOUFI, M.S. y YUNUS, M., 2016. «A Review on Recycled Aggregates for the Construction Industry». *American Journal of Civil Engineering and Architecture*, 4, 1, pp. 32-38. ISSN 2328-398X. DOI 10.12691/ajcea-4-1-5.
- KATZ, A., 2003. «Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete». *Cement and Concrete Research*, 33, 5, pp. 703-711. ISSN 00088846. DOI 10.1016/S0008-8846(02)01033-5.
- KAZMEE, H. y TUTUMLUER, E., 2015. «Evaluation of aggregate subgrade materials used as pavement subgrade/granular subbase. Research Report FHWA-ICT-15-013. A report of the findings of ICT-R27-124.» Illinois Center for Transportation/Illinois Department of Transportation, Rantoul, IL., july, pp. 95.

- KAZMEE, H., TUTUMLUER, E. y BESHEARS, S., 2017. «Using accelerated pavement testing to evaluate reclaimed asphalt pavement materials for pavement unbound granular layers». *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29, 2, pp. 1-13. ISSN 08991561. DOI 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001729.
- KAZMI, S.M.S., MUNIR, M.J., WU, Y.-F. y PATNAIKUNI, I., 2018. «Effect of macro-synthetic fibers on the fracture energy and mechanical behavior of recycled aggregate concrete». *Construction and Building Materials*, 189, pp. 857-868. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2018.08.161.
- KENAI, S., DEBIEB, F. y AZZOUZ, L., 2002. «Mechanical Properties and Durability of Concrete Made With Coarse and Fine Recycled Concrete Aggregates». *Challenges of Concrete Construction: Volume 5, Sustainable Concrete Construction*, January, pp. 383-392. DOI 10.1680/scc.31777.0039.
- KHATIB, J.M., 2005. «Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate». *Cement and Concrete Research*, 35, 4, pp. 763-769. ISSN 00088846. DOI 10.1016/j.cemconres.2004.06.017.
- KHOURY, E., AMBRÓS, W., CAZACLIU, B.G., SAMPAIO, C.H. y REMOND, S., 2018. «Heterogeneity of recycled concrete aggregates, an intrinsic variability». *Construction and Building Materials*, 175, pp. 705-713. ISSN 09500618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2018.04.163.
- KHUNTHONGKEAW, J., TANGTERMSIRIKUL, S. y LEELAWAT, T., 2006. «A study on carbonation depth prediction for fly ash concrete». *Construction and Building Materials*, 20, 9, pp. 744-753. ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2005.01.052.
- KISKU, N., JOSHI, H., ANSARI, M., PANDA, S.K., NAYAK, S. y DUTTA, S.C., 2017. «A critical review and assessment for usage of recycled aggregate as sustainable construction material». *Construction and Building Materials*, 131, pp. 721-740. ISSN 09500618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2016.11.029.
- KJELSEN, K.O., MONSØY, A., ISACHSEN, K. y DETWILER, R.J., 2003. «Preparation of flat-polished specimens for SEM-backscattered electron imaging and X-ray microanalysis - Importance of epoxy impregnation». *Cement and Concrete Research*, 33, 4, pp. 611-616. ISSN 00088846. DOI 10.1016/S0008-8846(02)01029-3.
- KOLAHDOOZAN, M., FILEV, P., PETRITAJ, F., LACHEMI, M. y SHEHATA, M., 2011. «Development of sustainable unshrinkable fill using alternative aggregate sources». *Proceedings, Annual Conference - Canadian Society for Civil Engineering*, 2, pp. 1625-1634.
- KONG, D., LEI, T., ZHENG, J., MA, C., JIANG, J. y JIANG, J., 2010. «Effect and mechanism of surface-coating pozzalanic materials around aggregate on properties and ITZ microstructure of recycled aggregate concrete». *Construction and Building Materials*, 24, 5, pp. 701-708. ISSN 09500618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2009.10.038.
- KOU, S.-C. y POON, C.-S., 2009. «Properties of self-compacting concrete prepared with coarse and fine recycled concrete aggregates». *Cement and Concrete Composites*, 31, 9, pp. 622-627. ISSN 09589465. DOI 10.1016/j.cemconcomp.2009.06.005.
- KOU, S.-C. y POON, C.-S., 2012. «Enhancing the durability properties of concrete prepared with coarse recycled aggregate». *Construction and Building Materials*, 35, pp. 69-76. ISSN 09500618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2012.02.032.
- KOU, S.-C. y 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, pp. 12-19. ISSN 0958-9465. DOI 10.1016/j.cemconcomp.2012.12.011.
- KOU, S.-C. y POON, C.-S., 2015. «Effect of the quality of parent concrete on the properties of high performance recycled aggregate concrete». *Construction and Building Materials*, 77, pp. 501-508. ISSN 09500618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2014.12.035.
- KOU, S.-C., POON, C.-S. y CHAN, D., 2004. «Properties of Steam Cured recycled aggregate fly ash concrete». *International RILEM conference on the use of recycled materials in buildings and structures, Barcelona*, 1, pp. 590-599.



- KOU, S.-C., POON, C.-S. y ETXEBERRIA, M., 2011. «Influence of recycled aggregates on long term mechanical properties and pore size distribution of concrete». *Cement and Concrete Composites*, 33, 2, pp. 286-291. ISSN 09589465. DOI 10.1016/j.cemconcomp.2010.10.003.
- KOU, S.-C., POON, C.-S. y WAN, H.W., 2012. «Properties of concrete prepared with low-grade recycled aggregates». *Construction and Building Materials*, 36, pp. 881-889. ISSN 09500618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2012.06.060.
- KOU, S.-C., ZHAN, B. y POON, C.-S., 2014. «Use of a CO₂ curing step to improve the properties of concrete prepared with recycled aggregates». *Cement and Concrete Composites*, 45, Supplement C, pp. 22-28. ISSN 0958-9465. DOI 10.1016/j.cemconcomp.2013.09.008.
- KUBISSA, W., SIMON, T., JASKULSKI, R., REITERMAN, P. y SUPERA, M., 2017. «Ecological High Performance Concrete». *Procedia Engineering*. pp. 595-603. DOI 10.1016/j.proeng.2017.02.186.
- KUMAR, R. y BHATTACHARJEE, B., 2003. «Study on some factors affecting the results in the use of MIP method in concrete research». *Cement and Concrete Research*, 33, 3, pp. 417-424. ISSN 00088846. DOI 10.1016/S0008-8846(02)00974-2.
- KURDA, R., DE BRITO, J. y SILVESTRE, J.D., 2017. «Influence of recycled aggregates and high contents of fly ash on concrete fresh properties». *Cement and Concrete Composites*, 84, pp. 198-213. ISSN 0958-9465. DOI 10.1016/j.cemconcomp.2017.09.009.
- KURDA, R., DE BRITO, J. y SILVESTRE, J.D., 2018. «Indirect evaluation of the compressive strength of recycled aggregate concrete with high fly ash ratios». *Magazine of Concrete Research*, 70, 4, pp. 204-216. DOI 10.1680/jmacr.17.00216.
- LARBI, B., ABDELAZIZ, M. y MILOUD, B., 2015. «Study of the physico-mechanical properties of a recycled concrete incorporating admixtures by the means of NDT methods». *Procedia Engineering*, 108, pp. 80-92. ISSN 18777058. DOI 10.1016/j.proeng.2015.06.122.
- LATIF AL-MUFTI, R. y FRIED, A.N., 2012. «The early age non-destructive testing of concrete made with recycled concrete aggregate». *Construction and Building Materials*, 37, pp. 379-386. ISSN 09500618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2012.07.058.
- LEE, G.C. y CHOI, H.B., 2013. «Study on interfacial transition zone properties of recycled aggregate by micro-hardness test». *Construction and Building Materials*, 40, pp. 455-460. ISSN 09500618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2012.09.114.
- LEITE, F. da C., MOTTA, R. dos S., VASCONCELOS, K.L. y BERNUCCI, L., 2011. «Laboratory evaluation of recycled construction and demolition waste for pavements». *Construction and Building Materials*, 25, 6, pp. 2972-2979. ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2010.11.105.
- LEITE, M.B. y MONTEIRO, P.J.M., 2016. «Microstructural analysis of recycled concrete using X-ray microtomography». *Cement and Concrete Research*, 81, pp. 38-48. ISSN 00088846. DOI 10.1016/j.cemconres.2015.11.010.
- LI, L., XIAO, J., XUAN, D. y POON, C.-S., 2018. «Effect of carbonation of modeled recycled coarse aggregate on the mechanical properties of modeled recycled aggregate concrete». *Cement and Concrete Composites*, 89, pp. 169-180. DOI 10.1016/j.cemconcomp.2018.02.018.
- LI, Q. y LIA, G., 2013. «Study on production of concrete small hollow block with recycled aggregate». *Advanced Materials Research*, 662, pp. 352-355. DOI 10.4028/www.scientific.net/AMR.662.352.
- LI, W., XIAO, J., SUN, Z., KAWASHIMA, S. y SHAH, S.P., 2012. «Interfacial transition zones in recycled aggregate concrete with different mixing approaches». *Construction and Building Materials*, 35, pp. 1045-1055. ISSN 09500618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2012.06.022.
- LI, X., MARASTEANU, M., WILLIAMS, R. y CLYNE, T., 2008. «Effect of Reclaimed Asphalt Pavement (Proportion and Type) and Binder Grade on Asphalt Mixtures». *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2051, pp. 90-97. ISSN 0361-1981. DOI 10.3141/2051-11.

- LIMA, P.R.L. y LEITE, M.B., 2012. «Influence of CDW recycled aggregate on drying shrinkage of mortar». *Open Journal of Civil Engineering*, 2, 2, pp. 53-57. ISSN 2164-3164. DOI 10.4236/ojce.2012.22009.
- LIMBACHIYA, M.C., LEELAWAT, T. y DHIR, R.K., 2000. «Use of recycled concrete aggregate in high-strength concrete». *Materials and Structures*, 33, November, pp. 574-580. DOI 10.1007/BF02480538.
- LIMBACHIYA, M.C., MARROCCHINO, E. y KOULOURIS, A., 2007. «Chemical-mineralogical characterisation of coarse recycled concrete aggregate». *Waste Management*, 27, 2, pp. 201-208. ISSN 0956-053X. DOI 10.1016/j.wasman.2006.01.005.
- LIN, Y.H., TYAN, Y.Y., CHANG, T.P. y CHANG, C.Y., 2004. «An assessment of optimal mixture for concrete made with recycled concrete aggregates». *Cement and Concrete Research*, 34, 8, pp. 1373-1380. ISSN 00088846. DOI 10.1016/j.cemconres.2003.12.032.
- LÓPEZ-ALONSO, M., MARTINEZ-ECHEVARRIA, M.J., GARACH, L., GALÁN, A., ORDOÑEZ, J. y AGRELA, F., 2019. «Feasible use of recycled alumina combined with recycled aggregates in road construction». *Construction and Building Materials*, 195, pp. 249-257. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2018.11.084.
- LÓPEZ-UCEDA, A., AYUSO, J., JIMÉNEZ, J.R., AGRELA, F., BARBUDO, A. y DE BRITO, J., 2016. «Upscaling the use of mixed recycled aggregates in non-structural low cement concrete». *Materials*, 9, 2. ISSN 19961944. DOI 10.3390/ma9020091.
- LÓPEZ-UCEDA, A., AYUSO, J., LÓPEZ, M., JIMÉNEZ, J.R., AGRELA, F. y SIERRA, M.J., 2016. «Properties of non-structural concrete made with mixed recycled aggregates and low cement content». *Materials*, 9, 2, pp. 1-19. ISSN 19961944. DOI 10.3390/ma9020074.
- LÓPEZ GAYARRE, F., 2008. «Influencia de la variación de los parámetros de dosificación y fabricación de hormigón reciclado estructural sobre sus propiedades físicas y mecánicas». Universidad de Oviedo. Departamento de construcción e Ingeniería de Fabricación, pp. 328.
- LÓPEZ GAYARRE, F., GONZÁLEZ PÉREZ, J., LÓPEZ-COLINA PÉREZ, C., SERRANO-LÓPEZ, M.A. y LÓPEZ MARTÍNEZ, A., 2016. «Life cycle assessment for concrete kerbs manufactured with recycled aggregates». *Journal of Cleaner Production*, 113, pp. 41-53. ISSN 09596526. DOI 10.1016/j.jclepro.2015.11.093.
- LÓPEZ GAYARRE, F., LÓPEZ-COLINA PÉREZ, C., SERRANO-LÓPEZ, M.A. y LÓPEZ MARTÍNEZ, A., 2013. «Manufacture of concrete kerbs and floor blocks with recycled aggregate from C&DW». *Construction and Building Materials*, 40, pp. 1193-1199. ISSN 09500618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2011.11.040.
- LÓPEZ GAYARRE, F., SERNA, P., DOMINGO CABO, A., SERRANO-LÓPEZ, M.A. y LÓPEZ-COLINA PÉREZ, C., 2009. «Influence of recycled aggregate quality and proportioning criteria on recycled concrete properties». *Waste Management*, 29, 12, pp. 3022-3028. ISSN 0956053X. DOI 10.1016/j.wasman.2009.07.010.
- LÓPEZ GAYARRE, F., SUÁREZ GONZÁLEZ, J., BLANCO VIÑUELA, R., LÓPEZ-COLINA PÉREZ, C. y SERRANO-LÓPEZ, M.A., 2017. «Use of recycled mixed aggregates in floor blocks manufacturing». *Journal of Cleaner Production*, 167, pp. 713-722. ISSN 09596526. DOI 10.1016/j.jclepro.2017.08.193.
- LÓPEZ OROZCO, J.O., 2004. «Porosidad del concreto». Universidad de San Carlos de Guatemala, Trabajo fin de grado, pp. 84.
- LÓPEZ VIDAL, A. y FERNÁNDEZ-ORDÓÑEZ, D., 2015. «La construcción con prefabricados de concreto: una historia por escribir». *Historia. Noticreto*, 133, noviembre/diciembre, pp. 42-48.
- LOTIFY, A. y AL-FAYEZ, M., 2015. «Performance evaluation of structural concrete using controlled quality coarse and fine recycled concrete aggregate». *Cement and Concrete Composites*, 61, pp. 36-43. ISSN 09589465. DOI 10.1016/j.cemconcomp.2015.02.009.



- LYDON, F.D. y BALENDRAN, R.V., 1986. «Some observations on elastic properties of plain concrete». *Cement and Concrete Research*, 16, 3, pp. 314-324. DOI 10.1016/0008-8846(86)90106-7.
- MALEŠEV, M., RADONJANIN, V. y MARINKOVIĆ, S.B., 2010. «Recycled concrete as aggregate for structural concrete production». *Sustainability*, 2, 5, pp. 1204-1225. ISSN 20711050. DOI 10.3390/su2051204.
- MALHOTRA, V.M. y SIVASUNDARAM, V., 2004. «Resonant Frequency Methods». *Handbook on nondestructive testing of concrete*. Chapter 7. CRC Press LLC, ASTM International, pp. 21. ISBN 9781420040050.
- MANZI, S., MAZZOTTI, C. y BIGNOZZI, M.C., 2013. «Short and long-term behavior of structural concrete with recycled concrete aggregate». *Cement and Concrete Composites*, 37, pp. 312-318. ISSN 09589465. DOI 10.1016/j.cemconcomp.2013.01.003.
- MANZI, S., MAZZOTTI, C. y CHIARA BIGNOZZI, M., 2017. «Self-compacting concrete with recycled concrete aggregate: Study of the long-term properties». *Construction and Building Materials*, 157, pp. 582-590. ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2017.09.129.
- MARTÍN-MORALES, M., 2013. «El residuo de construcción y demolición (RCD) como árido en la elaboración de prefabricados no estructurales». *Universidad de Granada. Departamento de Construcciones Arquitectónicas*, pp. 468.
- MARTÍN-MORALES, M., CUENCA-MOYANO, G.M., VALVERDE-ESPINOSA, I. y VALVERDE-PALACIOS, I., 2017. «Effect of recycled aggregate on physical-mechanical properties and durability of vibro-compacted dry-mixed concrete hollow blocks». *Construction and Building Materials*, 145, pp. 303-310. ISSN 09500618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2017.04.013.
- MARTÍN-MORALES, M., SÁNCHEZ-ROLDÁN, Z., ZAMORANO, M. y VALVERDE-PALACIOS, I., 2013. «Métodos granulométricos en la caracterización del árido reciclado para su uso en hormigón estructural». *Materiales de construcción*, 310, pp. 235-249. ISSN 0465-2746. DOI 10.3989/mc.2013.mc.06511.
- MARTÍN-MORALES, M., ZAMORANO, M., RUIZ-MOYANO, A. y VALVERDE-ESPINOSA, I., 2011. «Characterization of recycled aggregates construction and demolition waste for concrete production following the Spanish Structural Concrete Code EHE-08». *Construction and Building Materials*, 25, 2, pp. 742-748. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2010.07.012.
- MARTÍN-MORALES, M., ZAMORANO, M., VALVERDE-PALACIOS, I., CUENCA-MOYANO, G.M. y SÁNCHEZ-ROLDÁN, Z., 2013. «Quality control of recycled aggregates (RAs) from construction and demolition waste (CDW)». *Handbook of Recycled Concrete and Demolition Waste*. Woodhead Publishing Limited. pp. 270-303. ISBN 9780857096821.
- MARTÍNEZ-LAGE, I., PARRA Y ALFARO, J., POLANCO MADRAZO, J.A., SANABRIA ZAPATA, M. y VÁZQUEZ-RAMONICH, E., 2006. «Utilización de árido reciclado para la fabricación de hormigón estructural / Comisión 2, Grupo de Trabajo 2/5 "Hormigón reciclado"». *ACHE. M-11, Monografía (Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural)*. ISBN 8489670552.
- MARTÍNEZ, I., ETXEBERRIA, M., PAVÓN, E. y DÍAZ, N., 2013. «A comparative analysis of the properties of recycled and natural aggregate in masonry mortars». *Construction and Building Materials*, 49, pp. 384-392. ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2013.08.049.
- MARTÍNEZ, I., ETXEBERRIA, M., PAVÓN, E. y DÍAZ, N., 2018. «Influence of Demolition Waste Fine Particles on the Properties of Recycled Aggregate Masonry Mortar». *International Journal of Civil Engineering*, 16, 9, pp. 1213-1226. DOI 10.1007/s40999-017-0280-x.
- MARTINHO, F.C.G., PICADO-SANTOS, L.G. y CAPITÃO, S.D., 2018. «Influence of recycled concrete and steel slag aggregates on warm-mix asphalt properties». *Construction and Building Materials*, 185, pp. 684-696. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2018.07.041.
- MAS, B., CLADERA, A., BESTARD, J., MUNTANER, D., LÓPEZ, C.E., PIÑA, S. y PRADES, J., 2012. «Concrete with mixed recycled aggregates: Influence of the type of cement». *Construction and Building Materials*, 36, pp. 103-110. ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2012.02.041.

- Building Materials, 34, pp. 430-441. ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2012.02.092.
- MAS, B., CLADERA, A., OLMO, T. Del y PITARCH, F., 2012. «Influence of the amount of mixed recycled aggregates on the properties of concrete for non-structural use». Construction and Building Materials, 27, 1, pp. 612-622. ISSN 09500618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2011.06.073.
- MASO, J.C., 1996. «Interfacial Transition Zone in Concrete: state-of-the-art report». RILEM Technical Committee 108-ICC, Interfaces in Cementitious Composites, pp. 179.
- MATAR, P. y EL DALATI, R., 2012. «Using recycled concrete aggregates in precast concrete hollow blocks». Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, 43, 5, pp. 388-391. ISSN 09335137 15214052. DOI 10.1002/mawe.201200970.
- MATÍAS, D., DE BRITO, J., ROSA, A. y PEDRO, D., 2014. «Durability of Concrete with Recycled Coarse Aggregates: Influence of Superplasticizers». Journal of Materials in Civil Engineering, 5, pp. 1-5. ISSN 08991561. DOI 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000961.
- MCNEIL, K. y KANG, T.H.-K.K., 2013. «Recycled Concrete Aggregates: A Review». International Journal of Concrete Structures and Materials, 7, 1, pp. 61-69. ISSN 2234-1315. DOI 10.1007/s40069-013-0032-5.
- MEDINA, C., ZHU, W., HOWIND, T., FRÍAS, M. y SÁNCHEZ DE ROJAS, M.I., 2015. «Effect of the constituents (asphalt , clay materials , floating particles and fines) of construction and demolition waste on the properties of recycled concretes». Construction and Building Materials, 79, pp. 22-33. ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2014.12.070.
- MEFTEH, H., KEBAILI, O., OUCIEF, H., BERREDJEM, L. y ARABI, N., 2013. «Influence of moisture conditioning of recycled aggregates on the properties of fresh and hardened concrete». Journal of Cleaner Production, 54, pp. 282-288. ISSN 09596526. DOI 10.1016/j.jclepro.2013.05.009.
- MEHDIPOUR, I. y KHAYAT, K.H., 2018. «Understanding the role of particle packing characteristics in rheo-physical properties of cementitious suspensions: A literature review». Construction and Building Materials, 161, pp. 340-353. ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2017.11.147.
- MEHTA, P.K. y MONTEIRO, P.J.M., 2014. «Concrete: Microstructure, properties and materials. Fourth Edition». McGraw-Hill, pp. 239.
- MENA SEBASTIÁ, F., 2015. «Características estructurales del hormigón con árido reciclado mixto reforzado con fibras». Universitat Poliècnica de Catalunya. Departament d'Enginyeria de la Construcció, pp. 306.
- MESBAH, H.A. y BUYLE-BODIN, F., 1999. «Efficiency of polypropylene and metallic fibres on control of shrinkage and cracking of recycled aggregate mortars». Construction and Building Materials, 13, 8, pp. 439-447. ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/S0950-0618(99)00047-1.
- MILIČEVIĆ, I., BJEGOVIĆ, D. y SIDDIQUE, R., 2015. «Experimental research of concrete floor blocks with crushed bricks and tiles aggregate». Construction and Building Materials, 94, pp. 775-783. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2015.07.163.
- MILLS-BEALE, J. y YOU, Z., 2010. «The mechanical properties of asphalt mixtures with Recycled Concrete Aggregates». Construction and Building Materials, 24, 3, pp. 230-235. ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2009.08.046.
- MINISTERIO DE AGRICULTURA, A. y M.A., 2013. «Resolución de 20 de diciembre de 2013, de la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental y Medio Natural, por la que se publica el Acuerdo del Consejo de Ministros de 13 de diciembre de 2013, por el que se aprueba el Programa Estatal de Prevención». BOE, 20, 23 de enero, pp. 3.
- MINISTERIO DE AGRICULTURA, A. y M.A., 2015. «Resolución de 16 de noviembre de 2015, de la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental y Medio Natural, por la que se publica el Acuerdo del Consejo de Ministros de 6 de noviembre de 2015, por el que se aprueba el Plan Estatal Marco de Gestión d». BOE, 297, 12 de diciembre, pp. 5.



- MINISTERIO DE ECONOMÍA Y HACIENDA, 2007. «Real Decreto 475/2007, de 13 de abril, por el que se aprueba la Clasificación Nacional de Actividades Económicas 2009 (CNAE-2009)». BOE, 102, 28 de abril, pp. 18572-18593.
- MINISTERIO DE FOMENTO, 2001. «Orden Circular 8/2001 sobre reciclado de firmes. Anejo: Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Conservación de Carreteras. PG-4». BOE, 27 diciembre, pp. 31.
- MINISTERIO DE FOMENTO, 2003. «Orden FOM/3459/2003, de 28 de noviembre, por la que se aprueba la norma 6.3-IC: "Rehabilitación de firmes", de la Instrucción de carreteras.» BOE, 297, 12 de diciembre, pp. 35898-35967.
- MINISTERIO DE FOMENTO, 2004. «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 (PG-3)». BOE, 83, 6 de abril, pp. 14446-14509.
- MINISTERIO DE FOMENTO, 2008. «EHE-08. Instrucción de Hormigón Estructural». BOE, 203, 22 de agosto, pp. 35176-35178.
- MINISTERIO DE FOMENTO, 2015. «Orden FOM/2523/2014, de 12 de diciembre, por la que se actualizan determinados artículos del pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes, relativos a materiales básicos, a firmes y pavimentos, y a señalización, balizamiento». BOE, 3, 3 de enero, pp. 584-1096.
- MINISTERIO DE LA PRESIDENCIA, 2008. «Real Decreto 105/2008, de 1 de febrero, por el que se regula la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición». BOE, 38, 13 de febrero, pp. 11.
- MINISTERIO DE LA PRESIDENCIA, 2016. «Real Decreto 256/2016, de 10 de junio, por el que se aprueba la Instrucción para la recepción de cementos (RC-16)». BOE, 153, 25 de junio, pp. 70. DOI BOE-A-2012-5403.
- MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE, 2001. «Resolución de 14 de junio de 2001, de la Secretaría General de Medio Ambiente, por la que se dispone la publicación del Acuerdo de Consejo de Ministros, de 1 de junio de 2001, por el que se aprueba el Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición». BOE, 166, 12 de julio, pp. 25305-25313.
- MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE, 2002. «Orden MAM/304/2002, de 8 de febrero, por la que se publican las operaciones de valorización y eliminación de residuos y la lista europea de residuos». BOE, 43, 19 de febrero, pp. 6494-6515.
- MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y MEDIO RURAL Y MARINO, 2009. «Resolución de 20 de enero de 2009, de la Secretaría de Estado de Cambio Climático, por la que se publica el Acuerdo del Consejo de Ministros por el que se aprueba el Plan Nacional Integrado de Residuos para el período 2008- 2015 (PNIR)». BOE, 49, 26 de febrero, pp. 19893-20016.
- MIRANDA, L.F.R. y SELMO, S.M.S., 2006. «CDW recycled aggregate renderings: Part I - Analysis of the effect of materials finer than 75µm on mortar properties». *Construction and Building Materials*, 20, 9, pp. 615-624. ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2005.02.025.
- MOHAMMADINIA, A., ARULRAJAH, A., HAGHIGHI, H. y HORPIBULSUK, S., 2017. «Effect of lime stabilization on the mechanical and micro-scale properties of recycled demolition materials». *Sustainable Cities and Society*, 30, pp. 58-65. ISSN 2210-6707. DOI 10.1016/j.scs.2017.01.004.
- MOHAMMADINIA, A., ARULRAJAH, A., HORPIBULSUK, S. y CHINKULKIJNIWAT, A., 2017. «Effect of fly ash on properties of crushed brick and reclaimed asphalt in pavement base/subbase applications». *Journal of Hazardous Materials*, 321, pp. 547-556. ISSN 0304-3894. DOI 10.1016/j.jhazmat.2016.09.039.
- MOHAMMADINIA, A., ARULRAJAH, A., SANJAYAN, J., DISFANI, M.M., BO, M.W. y DARMAWAN, S., 2015. «Laboratory Evaluation of the Use of Cement-Treated Construction and Demolition Materials in Pavement Base and Subbase Applications». *Journal of Materials in Civil*

- Engineering, 27, 6, pp. 04014186. ISSN 0899-1561. DOI 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001148.
- MOLENAAR, A. y VAN NIEKERK, A., 2002. «Effects of Gradation, Composition, and Degree of Compaction on the Mechanical Characteristics of Recycled Unbound Materials». *Transportation Research Record*, 1787, 1, pp. 73-82. ISSN 0361-1981. DOI 10.3141/1787-08.
- MOLINA, E., CULTRONE, G., SEBASTIÁN, E. y ALONSO, F.J., 2013. «Evaluation of stone durability using a combination of ultrasound, mechanical and accelerated aging tests». *Journal of Geophysics and Engineering*, 10, 3, pp. 035003. ISSN 1742-2132. DOI 10.1088/1742-2132/10/3/035003.
- MORICONI, G., CORINALDESI, V. y ANTONUCCI, R., 2003. «Environmentally-friendly mortars: a way to improve bond between mortar and brick». *Materials and Structures*, 36, 264, pp. 702-708. ISSN 1359-5997. DOI 10.1617/13872.
- MULHERON, M. y O'MAHONY, M.M., 1990. «Properties and performance of recycled aggregates». *Highways and transportation*, 37, 2, pp. 35-37.
- MÜLLER, A. y WINKLER, A., 1998. «Characteristics of processed concrete rubble». *Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate*, pp. 109-119. DOI 10.1680/scuorca.27268.0009.
- NAGANATHAN, S., SILVADANAN, S., CHUNG, T.Y., NICOLASSELVAM, M.F. y THIRUCHELVAM, S., 2014. «Use of Wastes in Developing Mortar - A Review». *Green Technologies and Sustainable Development in Construction*. Trans Tech Publications, pp. 146-150. DOI 10.4028/www.scientific.net/AMR.935.146.
- NAGATAKI, S., GOKCE, A., SAEKI, T. y HISADA, M., 2004. «Assessment of recycling process induced damage sensitivity of recycled concrete aggregates». *Cement and Concrete Research*, 34, 6, pp. 965-971. ISSN 00088846. DOI 10.1016/j.cemconres.2003.11.008.
- NAIK, T.R., MALHOTRA, V.M. y POPOVICS, J.S., 2004. «The ultrasonic pulse velocity method». *Handbook on nondestructive testing of concrete*. Chapter 8. CRC Press LLC, ASTM International, pp. 19. ISBN 9780849314858.
- NATAATMADJA, A. y TAN, Y.L., 2000. «Characterisation of recycled crushed concrete aggregates for road base». *ISRM International Symposium - International Society for Rock Mechanics*, pp. 6.
- NENO, C., BRITO, J. de y VEIGA, R., 2014. «Using fine recycled concrete aggregate for mortar production». *Materials Research*, 17, 1, pp. 168-177. ISSN 1516-1439. DOI 10.1590/S1516-14392013005000164.
- NEPOMUCENO, M.C.S., ISIDORO, R.A.S. y CATARINO, J.P.G., 2018. «Mechanical performance evaluation of concrete made with recycled ceramic coarse aggregates from industrial brick waste». *Construction and Building Materials*, 165, pp. 284-294. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2018.01.052.
- NEVES, J., FREIRE, A.C., ROQUE, A., MARTINS, I., ANTUNES, M. y FARIA, G., 2013. «Utilization of recycled materials in unbound granular layers validated by experimental test sections». *Ninth International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields (BCRRA 2013)*, june, pp. 8.
- NEVES, R., BRANCO, F. y DE BRITO, J., 2013. «Field assessment of the relationship between natural and accelerated concrete carbonation resistance». *Cement and Concrete Composites*, 41, pp. 9-15. ISSN 09589465. DOI 10.1016/j.cemconcomp.2013.04.006.
- NEVILLE, A.M., 2011. «Properties of Concrete, 5th edition». Pearson Education Limited. ISBN 9780273755807.
- NEVILLE, A.M. y BROOKS, J.J., 2010. «Concrete Technology, 2nd Edition». Longman Group UK limited. ISBN 978-0-273-73219-8.
- NIXON, J.P., 1978. «Recycled concrete as an aggregate for concrete—a review». *Materials and Structures*, 11, pp. 371-378. DOI 10.1007/BF02473878.
- O'MAHONY, M.M., 1990. «Recycling of materials in civil engineering». University of Oxford, New



College, UK., pp. 233.

- OLIVEIRA NETO, R., GASTINEAU, P., CAZACLIU, B.G., LE GUEN, L., PARANHOS, R.S. y PETTER, C.O., 2017. «An economic analysis of the processing technologies in CDW recycling platforms». *Waste Management*, 60, pp. 277-289. ISSN 18792456. DOI 10.1016/j.wasman.2016.08.011.
- OLORUNSOGO, F.T. y PADAYACHEE, N., 2002. «Performance of recycled aggregate concrete monitored by durability indexes». *Cement and Concrete Research*, 32, 2, pp. 179-185. ISSN 00088846. DOI 10.1016/S0008-8846(01)00653-6.
- OMARY, S., GHORBEL, E. y WARDEH, G., 2016. «Relationships between recycled concrete aggregates characteristics and recycled aggregates concretes properties». *Construction and Building Materials*, 108, pp. 163-174. ISSN 09500618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2016.01.042.
- ORDAZ, J. y ESBERT, R.M., 1985. «Porosity and capillarity in some sandstone and dolomite monumental stones». *Vth international congress on deterioration and conservation of stone*. Lausanne: Presses polytechniques romandes, pp. 93-102. ISBN 2-88074-085-1.
- OSSA, A., GARCÍA, J.L. y BOTERO, E., 2016. «Use of recycled construction and demolition waste (CDW) aggregates: A sustainable alternative for the pavement construction industry». *Journal of Cleaner Production*, 135, pp. 379-386. ISSN 0959-6526. DOI 10.1016/j.jclepro.2016.06.088.
- OTSUKI, N., MIYAZATO, S. y YODSUDJAI, W., 2003. «Influence of Recycled Aggregate on Interfacial Transition Zone, Strength, Chloride Penetration and Carbonation of Concrete». *Journal of Materials in Civil Engineering*, 15, 5, pp. 443-451. ISSN 0899-1561. DOI 10.1061/(ASCE)0899-1561(2003)15:5(443).
- ÖZALP, F., YILMAZ, H.D., KARA, M., KAYA, Ö. y ŞAHİN, A., 2016. «Effects of recycled aggregates from construction and demolition wastes on mechanical and permeability properties of paving stone, kerb and concrete pipes». *Construction and Building Materials*, 110, pp. 17-23. ISSN 09500618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2016.01.030.
- PACHECO-TORGAL, F., DING, Y., MIRALDO, S., ABDOLLAHNEJAD, Z. y LABRINCHA, J.A., 2013. «The suitability of concrete using recycled aggregates (RAs) for high-performance concrete (HPC)». *Handbook of Recycled Concrete and Demolition Waste*. Woodhead Publishing Limited, pp. 424-438. ISBN 9780857096906.
- PADMINI, A.K., RAMAMURTHY, K. y MATHEWS, M.S., 2009. «Influence of parent concrete on the properties of recycled aggregate concrete». *Construction and Building Materials*, 23, 2, pp. 829-836. ISSN 09500618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2008.03.006.
- PAINE, K.A. y DHIR, R.K., 2010. «Recycled aggregates in concrete: a performance-related approach». *Magazine of Concrete Research*, 62, 7, pp. 519-530. ISSN 0024-9831. DOI 10.1680/mac.2010.62.7.519.
- PARK, T., 2003. «Application of Construction and Building Debris as Base and Subbase Materials in Rigid Pavement». *Journal of Transportation Engineering*, 129, 5, pp. 558-563. ISSN 0733-947X. DOI 10.1061/(ASCE)0733-947X(2003)129:5(558).
- PARLAMENTO EUROPEO, 2015. «2017/C 265/08. Resolución del Parlamento Europeo, de 9 de julio de 2015, sobre el uso eficiente de los recursos: avanzar hacia una economía circular (2014/2208(INI)).» DOUE, C 295, 9 de julio, pp. 65-75.
- PARLAMENTO EUROPEO y CONSEJO DE LA UNIÓN EUROPEA, 2006. «Reglamento (CE) N° 1893/2006 del Parlamento Europeo y del Consejo de 20 de diciembre de 2006 por el que se establece la nomenclatura estadística de actividades económicas NACE Revisión 2 y por el que se modifica el Reglamento (CEE) n° 3037/90 del Consejo». DOUE, L 393, 30 de diciembre, pp. 39.
- PARLAMENTO EUROPEO y CONSEJO DE LA UNIÓN EUROPEA, 2008. «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». DOUE, L 312, 22 de noviembre, pp. 28.

- PARLAMENTO EUROPEO y CONSEJO DE LA UNIÓN EUROPEA, 2011. «Reglamento (UE) N° 305/2011 del Parlamento Europeo y del Consejo de 9 de marzo de 2011 por el que se establecen condiciones armonizadas para la comercialización de productos de construcción y se deroga la Directiva 89/106/CEE del Consejo». DOUE, L 88, 4 de abril, pp. 5-43.
- PARLAMENTO EUROPEO y CONSEJO DE LA UNIÓN EUROPEA, 2018a. «Directiva (UE) 2018/850 del Parlamento Europeo y del Consejo de 30 de mayo de 2018 por la que se modifica la Directiva 1999/31/CE relativa al vertido de residuos». DOUE, L 150, 14 de junio, pp. 100-108.
- PARLAMENTO EUROPEO y CONSEJO DE LA UNIÓN EUROPEA, 2018b. «Directiva (UE) 2018/851 del Parlamento europeo y del Consejo de 30 de mayo de 2018 por la que se modifica la Directiva 2008/98/CE sobre los residuos». DOUE, L 150, 14 de junio, pp. 109-140.
- PARTHIBAN, K. y MOHAN, K.S.R., 2017. «Influence of recycled concrete aggregates on the engineering and durability properties of alkali activated slag concrete». *Construction and Building Materials*, 133, pp. 65-72. ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2016.12.050.
- PAVLŮ, T. y ŠEFFLOVÁ, M., 2014. «The Static and the Dynamic Modulus of Elasticity of Recycled Aggregate Concrete». *Advanced Materials Research*, 1054, pp. 221-226. DOI 10.4028/www.scientific.net/AMR.1054.221.
- PEDRO, D., DE BRITO, J. y EVANGELISTA, L., 2014a. «Influence of the use of recycled concrete aggregates from different sources on structural concrete». *Construction and Building Materials*, 71, pp. 141-151. ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2014.08.030.
- PEDRO, D., DE BRITO, J. y EVANGELISTA, L., 2014b. «Performance of concrete made with aggregates recycled from precasting industry waste: influence of the crushing process». *Materials and Structures*, pp. 1-14. ISSN 1359-5997. DOI 10.1617/s11527-014-0456-7.
- PEDRO, D., DE BRITO, J. y EVANGELISTA, L., 2017. «Structural concrete with simultaneous incorporation of fine and coarse recycled concrete aggregates: Mechanical, durability and long-term properties». *Construction and Building Materials*, 154, pp. 294-309. ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2017.07.215.
- PEDRO, D., DE BRITO, J. y EVANGELISTA, L., 2018. «Durability performance of high-performance concrete made with recycled aggregates, fly ash and densified silica fume». *Cement and Concrete Composites*, 93, pp. 63-74. ISSN 0958-9465. DOI 10.1016/j.cemconcomp.2018.07.002.
- PELUFO, M.J., DOMINGO CABO, A., ULLOA MAYORGA, V.A. y VERGARA ACUÑA, N.N., 2009. «Analysis of moisture state of recycled coarse aggregate and its influence on compression strength of the concrete.» *Shell and Spatial Structures IASS*, October, pp. 2932-2940.
- PENTEADO, C.S.G., VIVIANI DE CARVALHO, E. y LINTZ, R.C.C., 2016. «Reusing ceramic tile polishing waste in paving block manufacturing». *Journal of Cleaner Production*, 112, pp. 514-520. ISSN 0959-6526. DOI 10.1016/j.jclepro.2015.06.142.
- PEPE, M., KOENDERS, E.A.B., FAELLA, C. y MARTINELLI, E., 2014. «Structural concrete made with recycled aggregates: Hydration process and compressive strength models». *Mechanics Research Communications*, 58, pp. 139-145. ISSN 0093-6413. DOI 10.1016/j.mechrescom.2014.02.001.
- PEPE, M., TOLEDO FILHO, R.D., KOENDERS, E.A.B. y MARTINELLI, E., 2016. «A novel mix design methodology for Recycled Aggregate Concrete». *Construction and Building Materials*, 122, pp. 362-372. ISSN 09500618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2016.06.061.
- PEREIRA-DE OLIVEIRA, L.A., NEPOMUCENO, M.C.S., CASTRO-GOMES, J.P. y VILA, M.F.C., 2014. «Permeability properties of self-compacting concrete with coarse recycled aggregates». *Construction and Building Materials*, 51, pp. 113-120. ISSN 0950-0618. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.061>.
- PEREIRA, P.M., EVANGELISTA, L. y DE BRITO, J., 2012a. «The effect of superplasticisers on the workability and compressive strength of concrete made with fine recycled concrete aggregates». *Construction and Building Materials*, 28, 1, pp. 722-729. ISSN 09500618. DOI



10.1016/j.conbuildmat.2011.10.050.

- PEREIRA, P.M., EVANGELISTA, L. y DE BRITO, J., 2012b. «The effect of superplasticizers on the mechanical performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates». *Cement and Concrete Composites*, 34, 9, pp. 1044-1052. ISSN 09589465. DOI 10.1016/j.cemconcomp.2012.06.009.
- PÉREZ BENEDICTO, J.Á., DEL RÍO MERINO, M., LÓPEZ-JULIÁN, P.L., ORNA-CARMONA, M. y SALESA BORDANABA, A., 2012. «Estudio de los módulos de elasticidad en hormigones autocompactantes fabricados con árido reciclado procedente de la no calidad en prefabricación». 3º Congreso Iberoamericano sobre hormigón autocompactante. Avances y oportunidades, Madrid, 3 y 4 de diciembre, pp. 395-402.
- PIMENTEL, L.L., PISSOLATO JUNIOR, O., JACINTHO, A.E.P.G.A. y MARTINS, H.L.S., 2018. «Mortar with sand from crushing of construction waste - assessment of physical and mechanical characteristics [Argamassa com areia proveniente da britagem de resíduo de construção civil - avaliação de características físicas e mecânicas]». *Revista Materia*, 23, 1. DOI 10.1590/s1517-707620170001.0305.
- POON, C.-S. y CHAN, D., 2006a. «Feasible use of recycled concrete aggregates and crushed clay brick as unbound road sub-base». *Construction and Building Materials*, 20, 8, pp. 578-585. ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2005.01.045.
- POON, C.-S. y CHAN, D., 2006b. «Paving blocks made with recycled concrete aggregate and crushed clay brick». *Construction and Building Materials*, 20, 8, pp. 569-577. ISSN 09500618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2005.01.044.
- POON, C.-S. y CHAN, D., 2007. «Effects of contaminants on the properties of concrete paving blocks prepared with recycled concrete aggregates». *Construction and Building Materials*, 21, 1, pp. 164-175. ISSN 09500618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2005.06.031.
- POON, C.-S., KOU, S.-C. y LAM, L., 2002. «Use of Recycled Aggregates in Molded Concrete Bricks and Blocks». *Construction and Building Materials*, 16, April, pp. 281-289. DOI 10.1016/S0950-0618(02)00019-3.
- POON, C.-S., KOU, S.-C. y LAM, L., 2007. «Influence of recycled aggregate on slump and bleeding of fresh concrete». *Materials and Structures*, 40, 9, pp. 981-988. ISSN 1359-5997. DOI 10.1617/s11527-006-9192-y.
- POON, C.-S., KOU, S.-C., WAN, H. wen y ETXEBERRIA, M., 2009. «Properties of concrete blocks prepared with low grade recycled aggregates». *Waste Management*, 29, 8, pp. 2369-2377. ISSN 0956053X. DOI 10.1016/j.wasman.2009.02.018.
- POON, C.-S. y LAM, C.S., 2008. «The effect of aggregate-to-cement ratio and types of aggregates on the properties of pre-cast concrete blocks». *Cement and Concrete Composites*, 30, 4, pp. 283-289. ISSN 09589465. DOI 10.1016/j.cemconcomp.2007.10.005.
- POON, C.-S., SHUI, Z. y LAM, L., 2004. «Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates». *Construction and Building Materials*, 18, 6, pp. 461-468. ISSN 09500618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2004.03.005.
- POON, C.-S., SHUI, Z., LAM, L., FOK, H. y KOU, S.-C., 2004. «Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete». *Cement and Concrete Research*, 34, 1, pp. 31-36. ISSN 00088846. DOI 10.1016/S0008-8846(03)00186-8.
- PRADYUMNA, T.A., MITTAL, A. y JAIN, P.K., 2013. «Characterization of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) for Use in Bituminous Road Construction». *Procedia - Social and Behavioral Sciences*. 2nd Conference of Transportation Research Group of India, 104, pp. 1149-1157. ISSN 1877-0428. DOI 10.1016/j.sbspro.2013.11.211.
- PUERTAS MAROTO, F., BLANCO VARELA, M.T. y PALOMO SÁNCHEZ, Á., 1989. «Microestructura del hormigón: influencia sobre sus propiedades. Monografía nº 398». Consejo Superior de

Investigaciones Científicas. ISBN 8472923444, 9788472923447.

- PUERTAS MAROTO, F., PALOMO SÁNCHEZ, Á. y BLANCO VARELA, M.T., 1991. «Microestructuras interfaciales en el hormigón. Interface Microstructures in Concrete». *Materiales de Construcción*, 41, 221, pp. 91-106. ISSN 0465-2746.
- PURUSHOTHAMAN, R., AMIRTHAVALLI, R.R. y KARAN, L., 2015. «Influence of Treatment Methods on the Strength and Performance Characteristics of Recycled Aggregate Concrete». *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27, 5. ISSN 08991561. DOI 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001128.
- RAHMAN, M.A., IMTEAZ, M.A., ARULRAJAH, A. y DISFANI, M.M., 2014. «Suitability of recycled construction and demolition aggregates as alternative pipe backfilling materials». *Journal of Cleaner Production*, 66, pp. 75-84. ISSN 0959-6526. DOI 10.1016/j.jclepro.2013.11.005.
- RATTANACHU, P., KARNTONG, I., TANGCHIRAPAT, W., JATURAPITAKKUL, C. y CHINDAPRASIRT, P., 2018. «Influence of bagasse ash and recycled concrete aggregate on hardened properties of high-strength concrete». *Materiales de Construcción*, 68, pp. 158. DOI 10.3989/mc.2018.04717.
- RICHARDSON, B.J.E. y JORDAN, D.O., 1994. «Use of recycled concrete as a road pavement material within Australia». *Proceedings - Conference of the Australian Road Research Board*, 17, 3, pp. 213-228.
- RODRÍGUEZ, C., MIÑANO, I., AGUILAR, M.Á., ORTEGA, J.M., PARRA, C. y SÁNCHEZ, I., 2017. «Properties of concrete paving blocks and hollow tiles with recycled aggregate from construction and demolition wastes». *Materials*, 10, 12. DOI 10.3390/ma10121374.
- RODRÍGUEZ, C., PARRA, C., CASADO, G., MIÑANO, I., ALBALADEJO, F., BENITO, F. y SÁNCHEZ, I., 2016. «The incorporation of construction and demolition wastes as recycled mixed aggregates in non-structural concrete precast pieces». *Journal of Cleaner Production*, 127, pp. 152-161. ISSN 09596526. DOI 10.1016/j.jclepro.2016.03.137.
- RODRÍGUEZ LÓPEZ, C.L., 2013. «Estudio de la Viabilidad de la Incorporación de Áridos Mixtos Reciclados en Prefabricados de Hormigón Vibrocomprimido no estructurales». Universidad de Alicante, Trabajo final de máster, pp. 87.
- RODRÍGUEZ ROBLES, D., 2016. «Ceramic and mixed construction and demolition wastes (CDW): A technically viable and environmentally friendly source of coarse aggregates for the concrete manufacture». Universidad de León y Ghent University, pp. 553.
- ROJAS HENAO, L.M., 2012. «Ensayos de información y extracción de probetas testigo en hormigones autocampantes». Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Departamento de Ingeniería Civil-Construcción, pp. 324.
- ROSAS CHAVES, J.A., 2014. «Mobiliario urbano prefabricado en concreto con agregado grueso reciclado». Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Artes, Escuela de Arquitectura y Urbanismo, pp. 160.
- RUBIO, M.C., MENÉNDEZ, A., MORENO, F., BELMONTE SÁNCHEZ, A.F. y RAMÍREZ, A., 2011. «Propiedades mecánicas de mezclas bituminosas en caliente fabricadas con áridos reciclados de residuos Silestone®». *Materiales de Construcción*, 61, 301, pp. 49-60. ISSN 1988-3226. DOI 10.3989/mc.2011.52709.
- RUBIO, M.C., MORENO, F., BELMONTE SÁNCHEZ, A.F. y MENÉNDEZ, A., 2010. «Reuse of waste material from decorative quartz solid surfacing in the manufacture of hot bituminous mixes». *Construction and Building Materials*, 24, 4, pp. 610-618. ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2009.09.004.
- RUSSELL, S.A., 1927. «Stone protection from committee report (Appendix I)». HM Stationary Office, London,
- SAFIUDDIN, M., ALENGARAM, U.J., RAHMAN, M., SALAM, A. y JUMAAT, M.Z., 2013. «Use of



- recycled concrete aggregate in concrete: a review». *Journal of Civil Engineering and Management*, 19, May 2015, pp. 796-810. ISSN 1392-3730. DOI 10.3846/13923730.2013.799093.
- SAGOE-CRENTSIL, K.K., BROWN, T. y TAYLOR, A., 2001. «Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate». *Cement and Concrete Research*, 31, 5, pp. 707-712. DOI 10.1016/S0008-8846(00)00476-2.
- SAHU, A., DEY, T. y CHAKRABORTY, S., 2016. «Study on the Interfacial Transition Zones of Recycled Aggregate Concrete». *Indian Journal of Science and Technology*, 9, December, pp. 1-6. DOI 10.17485/ijst/2016/v9i47/106263.
- SAINI, P. y ASHISH, K.D., 2015. «A Review on Recycled Concrete Aggregates». *SSRG International Journal of Civil Engineering (SSRG-IJCE) – EFES*, pp. 71-75. DOI 10.1007/s40069-013-0032-5.
- SAIZ-MARTÍNEZ, P., GONZÁLEZ CORTINA, M. y FERNÁNDEZ-MARTÍNEZ, F., 2015. «Characterization and influence of fine recycled aggregates on masonry mortars properties». *Materiales de Construcción*, 65, 319, pp. 1-10. ISSN 19883226. DOI 10.3989/mc.2015.06014.
- SAIZ-MARTÍNEZ, P., GONZÁLEZ CORTINA, M., FERNÁNDEZ-MARTÍNEZ, F. y RODRÍGUEZ SÁNCHEZ, A., 2016. «Comparative study of three types of fine recycled aggregates from construction and demolition waste (CDW), and their use in masonry mortar fabrication». *Journal of Cleaner Production*, 118, pp. 162-169. ISSN 0959-6526. DOI 10.1016/j.jclepro.2016.01.059.
- SALESA BORDANABA, A., PÉREZ BENEDICTO, J.Á., COLORADO-ARANGUREN, D., LÓPEZ-JULIÁN, P.L., ESTEBAN, L.M., SANZ-BALDÚZ, L.J., SÁEZ-HOSTALED, J.L., RAMIS, J. y OLIVARES, D., 2017. «Physico - mechanical properties of multi - recycled concrete from precast concrete industry». *Journal of Cleaner Production*, 141, pp. 248-255. ISSN 09596526. DOI 10.1016/j.jclepro.2016.09.058.
- SALESA BORDANABA, A., PÉREZ BENEDICTO, J.Á., ESTEBAN, L.M., VICENTE-VAS, R. y ORNACARMONA, M., 2017. «Physico-mechanical properties of multi-recycled self-compacting concrete prepared with precast concrete rejects». *Construction and Building Materials*, 153, pp. 364-373. ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2017.07.087.
- SALMAN, M.M. y AL-AMAWEE, A., 2006. «The Ratio between Static and Dynamic Modulus of Elasticity in Normal and High Strength Concrete». *Journal of Engineering and Development*, 10, 2, pp. 163-174. ISSN 1813-7822. DOI ISSN 1813-7822.
- SÁNCHEZ DE JUAN, M., 2004. «Estudio sobre la utilización de árido reciclado para la fabricación de Hormigón Estructural». Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, pp. 514.
- SÁNCHEZ DE JUAN, M. y ALAEJOS GUTIÉRREZ, P., 2005. «Aspectos químicos del árido reciclado relacionados con la durabilidad del hormigón». V Congreso Ibérico de Geoquímica. Soria, España.
- SÁNCHEZ RODRÍGUEZ, A., 2011. «Análisis de la aplicabilidad de los áridos reciclados mixtos en hormigones». Universitat Politècnica de Catalunya. Enginyeria de la Construcció, Tesina, pp. 1-59.
- SANGIORGI, C., TATARANNI, P., SIMONE, A., VIGNALI, V., LANTIERI, C. y DONDI, G., 2017. «A laboratory and field evaluation of Cold Recycled Mixture for base layer entirely made with Reclaimed Asphalt Pavement». *Construction and Building Materials*, 138, pp. 232-239. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2017.02.004.
- SANTANA RODRÍGUEZ, R.J., 2006. «Paneles prefabricados para fachada con hormigón de altas prestaciones». Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, pp. 368.
- SANTOS, S.A., DA SILVA, P.R. y DE BRITO, J., 2017. «Mechanical performance evaluation of self-compacting concrete with fine and coarse recycled aggregates from the precast industry». *Materials*, 10, 8. DOI 10.3390/ma10080904.
- SCRIVENER, K.L., CRUMBIE, A.K. y LAUGESSEN, P., 2004. «The Interfacial Transition Zone (ITZ)

- Between Cement Paste and Aggregate in Concrete». *Interface Science*, 12, 4, pp. 411-421. ISSN 1573-2746. DOI 10.1023/B:INTS.0000042339.92990.4c.
- SEARA-PAZ, S., 2015. «Efecto de las deformaciones diferidas sobre la respuesta estructural a flexión y análisis del comportamiento adherente del hormigón reciclado». E.T.S. Enxeñeiros de Camiños, Canais e Portos. Universidade da Coruña. Departamento de Tecnoloxía da Construción, pp. 254.
- SEARA-PAZ, S., GONZÁLEZ-FONTEBOA, B., MARTÍNEZ-ABELLA, F. y GONZÁLEZ-TABOADA, I., 2016. «Time-dependent behaviour of structural concrete made with recycled coarse aggregates. Creep and shrinkage». *Construction and Building Materials*, 122, pp. 95-109. ISSN 09500618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2016.06.050.
- SEGARRA LAGUNES, S.S., 2008. «Mobiliario urbano en contextos históricos: evolución, adecuación, conservación». Universidad de Granada. Departamento de Historia del Arte, pp. 997.
- SEGURA PÉREZ, I., 2008. «Caracterización del proceso de descalcificación en morteros, mediante ensayos destructivos y no destructivos». Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puestos. Departamento de Ingeniería Civil: Construcción., pp. 338.
- SEÑAS, L., PRIANO, C. y MARFIL, S., 2016. «Influence of recycled aggregates on properties of self-consolidating concretes». *Construction and Building Materials*, 113, pp. 498-505. ISSN 09500618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2016.03.079.
- SERRES, N., BRAYMAND, S. y FEUGEAS, F., 2016. «Environmental evaluation of concrete made from recycled concrete aggregate implementing life cycle assessment». *Journal of Building Engineering*, 5, pp. 24-33. ISSN 23527102. DOI 10.1016/j.job.2015.11.004.
- SHAYAN, A. y XU, A., 2003. «Performance and Properties of Structural Concrete made with Recycled Concrete Aggregate». *ACI Materials Journal*, 100, 5, pp. 371-380.
- SHI, C., LI, Y., ZHANG, J., LI, W., CHONG, L. y XIE, Z., 2016. «Performance enhancement of recycled concrete aggregate - A review». *Journal of Cleaner Production*, 112, pp. 466-472. ISSN 09596526. DOI 10.1016/j.jclepro.2015.08.057.
- SHI, X.S., COLLINS, F.G., ZHAO, X.L. y WANG, Q.Y., 2012. «Mechanical properties and microstructure analysis of fly ash geopolymeric recycled concrete». *Journal of Hazardous Materials*, 237-238, pp. 20-29. ISSN 0304-3894. DOI 10.1016/j.jhazmat.2012.07.070.
- SHI, X.S., WANG, Q.Y., ZHAO, X.L. y COLLINS, F., 2012. «Discussion on Properties and Microstructure of Geopolymer Concrete Containing Fly Ash and Recycled Aggregate». *Advanced Materials Research*, 450-451, pp. 1577-1583. ISSN 1662-8985. DOI 10.4028/www.scientific.net/AMR.450-451.1577.
- SIDOROVA, A., 2013. «Estudio del efecto de la naturaleza del árido reciclado en la microestructura y propiedades de la zona de transición árido-pasta de cemento.» Universidad Politécnica de Catalunya, pp. 1-171.
- SIDOROVA, A., VÁZQUEZ-RAMONICH, E., BARRA-BIZINOTTO, M., ROA-ROVIRA, J.J. y JIMENEZ-PIQUE, E., 2014. «Study of the recycled aggregates nature's influence on the aggregate-cement paste interface and ITZ». *Construction and Building Materials*, 68, pp. 677-684. ISSN 09500618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2014.06.076.
- SILVA, H.M.R.D., OLIVEIRA, J.R.M. y JESUS, C.M.G., 2012. «Are totally recycled hot mix asphalts a sustainable alternative for road paving?». *Resources, Conservation and Recycling*, 60, pp. 38-48. ISSN 0921-3449. DOI 10.1016/j.resconrec.2011.11.013.
- SILVA, J., DE BRITO, J. y VEIGA, R., 2008. «Fine ceramics replacing cement in mortars partial replacement of cement with fine ceramics in rendering mortars». *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 41, 8, pp. 1333-1344. ISSN 13595997. DOI 10.1617/s11527-007-9332-z.



- SILVA, J., DE BRITO, J. y VEIGA, R., 2010. «Recycled red-clay ceramic construction and demolition waste for mortars production». *Journal of Materials in Civil Engineering*, 22, 3, pp. 236-244. DOI 10.1061/(ASCE)0899-1561(2010)22:3(236).
- SILVA, R.V., DE BRITO, J. y DHIR, R.K., 2014. «Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production». *Construction and Building Materials*, 65, pp. 201-217. ISSN 09500618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2014.04.117.
- SILVA, R.V., DE BRITO, J. y DHIR, R.K., 2016a. «Establishing a relationship between modulus of elasticity and compressive strength of recycled aggregate concrete». *Journal of Cleaner Production*, 112, pp. 2171-2186. ISSN 09596526. DOI 10.1016/j.jclepro.2015.10.064.
- SILVA, R.V., DE BRITO, J. y DHIR, R.K., 2016b. «Performance of cementitious renderings and masonry mortars containing recycled aggregates from construction and demolition wastes». *Construction and Building Materials*, 105, pp. 400-415. ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2015.12.171.
- SILVA, R.V., NEVES, R., DE BRITO, J. y DHIR, R.K., 2015. «Carbonation behaviour of recycled aggregate concrete». *Cement and Concrete Composites*, 62, pp. 22-32. ISSN 09589465. DOI 10.1016/j.cemconcomp.2015.04.017.
- SIM, J. y PARK, C., 2011. «Compressive strength and resistance to chloride ion penetration and carbonation of recycled aggregate concrete with varying amount of fly ash and fine recycled aggregate». *Waste Management*, 31, 11, pp. 2352-2360. ISSN 0956053X. DOI 10.1016/j.wasman.2011.06.014.
- SINGH, M.K., SENGUPTA, J.B. y KUMAR, B., 2018. «Properties of concrete integrated with recycled concrete sand». *Indian Concrete Journal*, 92, 9, pp. 36-44.
- SINGH, N. y SINGH, S.P., 2018. «Evaluating the performance of self compacting concretes made with recycled coarse and fine aggregates using non destructive testing techniques». *Construction and Building Materials*, 181, pp. 73-84. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2018.06.039.
- SINGH, R.B. y SINGH, B., 2018. «Rheological behaviour of different grades of self-compacting concrete containing recycled aggregates». *Construction and Building Materials*, 161, pp. 354-364. ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2017.11.118.
- SOARES, D., DE BRITO, J., FERREIRA, J. y PACHECO, J., 2014a. «In situ materials characterization of full-scale recycled aggregates concrete structures». *Construction and Building Materials*, 71, pp. 237-245. ISSN 09500618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2014.08.025.
- SOARES, D., DE BRITO, J., FERREIRA, J. y PACHECO, J., 2014b. «Use of coarse recycled aggregates from precast concrete rejects: Mechanical and durability performance». *Construction and Building Materials*, 71, pp. 263-272. ISSN 09500618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2014.08.034.
- SOGO, M., SOGABE, T., MARUYAMA, I., SATO, R. y KAWAI, K., 2004. «Shear behaviour of reinforced recycled concrete beams». *International RILEM conference on the use of recycled materials in building and structures*, January 2004, pp. 610-618.
- SOLEIMANBEIGI, A. y EDIL, T.B., 2015. «Compressibility of recycled materials for use as highway embankment fill». *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 141, 5. DOI 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001285.
- SOUSA, J.G., BAUER, E. y SPOSTO, R.M., 2003. «Empleo de residuos de la construcción civil como áridos reciclados. Producción de bloques de hormigón». *Materiales de construcción*, 53, 271-271, pp. 59-70. DOI 10.3989/mc.2003.v53.i271-272.289.
- SOUTSOS, M.N., KANG, K.T., MILLARD, S., BUNGEY, J. y TICKELL, G., 2008. «Precast concrete products made with recycled demolition material». *Betonwerk und Fertigteil-Technik/Concrete Plant and Precast Technology*, 74, 6, pp. 32-45. ISSN 03734331.
- SOUTSOS, M.N., TANG, K. y MILLARD, S.G., 2011a. «Concrete building blocks made with recycled demolition aggregate». *Construction and Building Materials*, 25, 2, pp. 726-735. ISSN 09500618.

- DOI 10.1016/j.conbuildmat.2010.07.014.
- SOUTSOS, M.N., TANG, K. y MILLARD, S.G., 2011b. «Use of recycled demolition aggregate in precast products, phase II: Concrete paving blocks». *Construction and Building Materials*, 25, 7, pp. 3131-3143. ISSN 09500618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2010.12.024.
- SOUTSOS, M.N., TANG, K. y MILLARD, S.G., 2012. «The use of recycled demolition aggregate in precast concrete products - Phase III: Concrete pavement flags». *Construction and Building Materials*, 36, pp. 674-680. ISSN 09500618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2012.06.045.
- SRIRAVINDRARAJAH, R., LOO, Y.H. y TAM, C.T., 1988. «Strength Evaluation of Recycled Aggregate Concrete by In-Situ Tests». *Materials and Structures*, 21, pp. 289-295. DOI 10.1007/BF02481828.
- STRUBLE, L. y STUTZMAN, P., 1989. «Epoxy impregnation of hardened cement for microstructural characterization». *Journal of Materials Science Letters*, 8, 6, pp. 632-634. ISSN 02618028. DOI 10.1007/BF01730426.
- SU, K., HACHIYA, Y. y MAEKAWA, R., 2009. «Study on recycled asphalt concrete for use in surface course in airport pavement». *Resources, Conservation and Recycling*, 54, 1, pp. 37-44. ISSN 0921-3449. DOI 10.1016/j.resconrec.2009.06.003.
- SUÁREZ GONZÁLEZ, J., LÓPEZ GAYARRE, F., LÓPEZ-COLINA PÉREZ, C., SERNA, P. y SERRANO-LÓPEZ, M.A., 2017. «Influence of recycled brick aggregates on properties of structural concrete for manufacturing precast prestressed beams». *Construction and Building Materials*, 149, pp. 507-514. ISSN 09500618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2017.05.147.
- SUÁREZ SILGADO, S.S., 2015. «Propuesta metodológica para evaluar el comportamiento ambiental y económico de los residuos de construcción y demolición (RCD) en la producción de materiales pétreos». *Universitat Politècnica de Catalunya*, pp. 305.
- SUZUKI, M., SEDDIK MEDDAH, M. y SATO, R., 2009. «Use of porous ceramic waste aggregates for internal curing of high-performance concrete». *Cement and Concrete Research*, 39, 5, pp. 373-381. ISSN 0008-8846. DOI 10.1016/j.cemconres.2009.01.007.
- SYMONDS, ARGUS, COWI y PRC BOUWCENTRUM, 1999. «Construction and demolition waste management practices and their economic impacts.» Report to DGXI, European Commission, february, pp. 83.
- TAHA, R., ALI, G., BASMA, A. y AL-TURK, O., 1999. «Evaluation of Reclaimed Asphalt Pavement Aggregate in Road Bases and Subbases». *Transportation Research Record*, 1652, pp. 264-269. ISSN 0361-1981. DOI 10.3141/1652-33.
- TAHAR, Z., KADRI, E.H., NGO, T.T., BOUVET, A. y KACI, A., 2016. «Influence of recycled sand and gravel on the rheological and mechanical characteristic of concrete». *Journal of Adhesion Science and Technology*, 30, 4, pp. 392-411. DOI 10.1080/01694243.2015.1101185.
- TAM, V.W.Y., GAO, X.F. y TAM, C.M., 2005. «Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach». *Cement and Concrete Research*, 35, pp. 1195-1203. ISSN 00088846. DOI 10.1016/j.cemconres.2004.10.025.
- TAM, V.W.Y., SOOMRO, M. y EVANGELISTA, A.C.J., 2018. «A review of recycled aggregate in concrete applications (2000-2017)». *Construction and Building Materials*, 172, pp. 272-292. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.240.
- TAM, V.W.Y., WANG, K. y TAM, C.M., 2008. «Assessing relationships among properties of demolished concrete, recycled aggregate and recycled aggregate concrete using regression analysis». *Journal of Hazardous Materials*, 152, 2, pp. 703-714. ISSN 03043894. DOI 10.1016/j.jhazmat.2007.07.061.
- TANG, J., WU, J., ZOU, Z., YUE, A. y MUELLER, A., 2018. «Influence of axial loading and carbonation age on the carbonation resistance of recycled aggregate concrete». *Construction and Building Materials*, 173, pp. 707-717. ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.269.
- TANG, K., SOUTSOS, M.N. y MILLARD, S.G., 2007. «Concrete paving products made with recycled



- demolition aggregates». Proceedings of the International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies, pp. 77-84.
- TAVIRA, J., JIMÉNEZ, J.R., AYUSO, J., SIERRA, M.J. y LEDESMA, E.F., 2018. «Functional and structural parameters of a paved road section constructed with mixed recycled aggregates from non-selected construction and demolition waste with excavation soil». *Construction and Building Materials*, 164, pp. 57-69. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2017.12.195.
- TERTRE TORÁN, J.I. y MORENO BURRIEL, A., 2013. «Hormigón con árido reciclado. Monografía». 3 Recycling, S.L. y CEMEX, pp. 64.
- THOMAS GARCÍA, C., 2012. «Hormigón reciclado de aplicación estructural: durabilidad en ambiente marino y comportamiento a fatiga». Universidad de Cantabria. Escuela Técnica superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad de Cantabria. Departamento de Ciencia e Ingeniería del Terreno y de los Materiales, pp. 478.
- THOMAS GARCÍA, C., DE BRITO, J., GIL, V., SAINZ-AJA, J.A. y CIMENTADA, A.I., 2018. «Multiple recycled aggregate properties analysed by X-ray microtomography». *Construction and Building Materials*, 166, pp. 171-180. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2018.01.130.
- THOMAS GARCÍA, C., POLANCO MADRAZO, J.A., SETIÉN, J. y LOMBILLO, I., 2010. «Durabilidad en ambiente marino de hormigón con incorporación de Áridos reciclados procedentes de la trituración de hormigón». XI Congreso Nacional de Materiales, Zaragoza 2010 (España). pp. 4.
- THOMAS GARCÍA, C., SETIÉN, J., POLANCO, J.A., DE BRITO, J. y FIOL, F., 2019. «Micro- and macro-porosity of dry- and saturated-state recycled aggregate concrete». *Journal of Cleaner Production*, 211, pp. 932-940. ISSN 09596526. DOI 10.1016/j.jclepro.2018.11.243.
- THOMAS GARCÍA, C., SETIÉN, J. y POLANCO MADRAZO, J.A., 2016. «Structural recycled aggregate concrete made with precast wastes». *Construction and Building Materials*, 114, April 2002, pp. 536-546. ISSN 09500618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2016.03.203.
- THOMAS GARCÍA, C., SETIÉN, J., POLANCO MADRAZO, J.A., ALAEJOS GUTIÉRREZ, P. y SÁNCHEZ DE JUAN, M., 2013. «Durability of recycled aggregate concrete». *Construction and Building Materials*, 40, pp. 1054-1065. ISSN 09500618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2012.11.106.
- THOMAS GARCÍA, C., SETIÉN, J., POLANCO MADRAZO, J.A., CIMENTADA, A.I. y MEDINA, C., 2018. «Influence of curing conditions on recycled aggregate concrete». *Construction and Building Materials*, 172, pp. 618-625. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2018.04.009.
- THOMAS, J., THAICKAVIL, N.N. y WILSON, P.M., 2018. «Strength and durability of concrete containing recycled concrete aggregates». *Journal of Building Engineering*, 19, pp. 349-365. ISSN 2352-7102. DOI 10.1016/j.jobbe.2018.05.007.
- TU, T.-Y., CHEN, Y.-Y. y HWANG, C.-L., 2006. «Properties of HPC with recycled aggregates». *Cement and Concrete Research*, 36, 5, pp. 943-950. ISSN 0008-8846. DOI 10.1016/j.cemconres.2005.11.022.
- UCHIKAWA, H. y HANEHARA, S., 1996. «Recycling of concrete waste». *Concrete in the Service of Mankind: Concrete for environment enhancement and protection*. E & FN Spon, pp. 163-172.
- UEPG, 2017. «European aggregates association. A sustainable industry for a sustainable Europe. Annual Review 2016-2017». Union Européenne des Producteurs de Granulats. Brussels-Belgium, pp. 32. ISSN 0038092X. DOI 10.1016/0038-092X(81)90058-X.
- ULLOA MAYORGA, V.A., 2012. «Durabilidad de hormigones armados, con árido reciclado: Una evaluación de la corrosión en un ambiente marino». Universitat Politècnica de València. Departamento de Ingeniería de la Construcción y de Proyectos de Ingeniería Civil. Valencia (Spain), pp. 356. DOI 10.4995/Thesis/10251/16700.
- ULSEN, C., KAHN, H., HAWLITSCHKE, G., MASINI, E.A., ANGULO, S.C. y JOHN, V.M., 2013. «Production of recycled sand from construction and demolition waste». *Construction and Building Materials*, 40, pp. 1168-1173. ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2012.02.004.

- UYGUNOĞLU, T., TOPCU, I.B., GENÇEL, O. y BROSTOW, W., 2012. «The effect of fly ash content and types of aggregates on the properties of pre-fabricated concrete interlocking blocks (PCIBs)». *Construction and Building Materials*, 30, pp. 180-187. ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2011.12.020.
- VALCUENDE, M., MARCO, E., PARRA, C. y SERNA, P., 2012. «Influence of limestone filler and viscosity-modifying admixture on the shrinkage of self-compacting concrete». *Cement and Concrete Research*, 42, 4, pp. 583-592. ISSN 00088846. DOI 10.1016/j.cemconres.2012.01.001.
- VALDÉS, G., PÉREZ-JIMÉNEZ, F., MIRÓ, R., MARTÍNEZ, A. y BOTELLA, R., 2011. «Experimental study of recycled asphalt mixtures with high percentages of reclaimed asphalt pavement (RAP)». *Construction and Building Materials*, 25, 3, pp. 1289-1297. ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2010.09.016.
- VALVERDE-ESPINOSA, I., 1992. «Caracterización de aridos para hormigón en la depresión de Granada». Universidad de Granada, pp. 651.
- VAQUERO GARCÍA, J.J., CASTRO, T., CONCEJO, F., GONZÁLEZ, J.C., LLEYDA, J.L. y VALLE, J., 1996. «Edificación con prefabricados de hormigón: para usos industriales, comerciales, aparcamientos y servicios». IECA (Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones), pp. 94.
- VEGAS, I., AZKARATE, I., JUARRERO, A. y FRÍAS, M., 2009. «Diseño y prestaciones de morteros de albañilería elaborados con áridos reciclados procedentes de escombros de hormigón». *Materiales de Construcción*, 59, 295, pp. 5-18. ISSN 1988-3226. DOI 10.3989/mc.2009.44207.
- VEGAS, I., IBAÑEZ, J.A., LISBONA, A., SÁEZ DE CORTAZAR, A. y FRÍAS, M., 2011. «Pre-normative research on the use of mixed recycled aggregates in unbound road sections». *Construction and Building Materials*, 25, 5, pp. 2674-2682. ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2010.12.018.
- VEGAS, I., IBAÑEZ, J.A., SAN JOSÉ, J.T. y URZELAI, A., 2008. «Construction demolition wastes, Waelz slag and MSWI bottom ash: A comparative technical analysis as material for road construction». *Waste Management*, 28, 3, pp. 565-574. ISSN 0956053X. DOI 10.1016/j.wasman.2007.01.016.
- VEJMELKOVÁ, E., KEPPERT, M., ROVNANÍKOVÁ, P., ONDRÁČEK, M., KERŠNER, Z. y ČERNÝ, R., 2012. «Properties of high performance concrete containing fine-ground ceramics as supplementary cementitious material». *Cement and Concrete Composites*, 34, 1, pp. 55-61. ISSN 0958-9465. DOI 10.1016/j.cemconcomp.2011.09.018.
- VERIAN, K.P., ASHRAF, W. y CAO, Y., 2018. «Properties of recycled concrete aggregate and their influence in new concrete production». *Resources, Conservation and Recycling*, 133, pp. 30-49. DOI 10.1016/j.resconrec.2018.02.005.
- VIDAL LESCUYER, C., 2012. «Estudio de la fijación de cloruros de los RCD y su influencia en la difusión de cloruros en hormigones con áridos reciclados». Universitat Politècnica de Catalunya, Tesina, pp. 91.
- VIEIRA, C.S. y PEREIRA, P.M., 2015. «Use of recycled construction and demolition materials in geotechnical applications: A review». *Resources, Conservation and Recycling*, 103, pp. 192-204. ISSN 0921-3449. DOI 10.1016/j.resconrec.2015.07.023.
- VILLORIA SÁEZ, P., 2014. «Sistema de gestión de residuos de construcción y demolición en obras de edificación residencial. Buenas prácticas en la ejecución de obra». Universidad Politécnica de Madrid. ETS de Edificación, pp. 111.
- VINAY KUMAR, B.M., ANANTHAN, H. y BALAJI, K.V.A., 2017. «Experimental studies on utilization of coarse and finer fractions of recycled concrete aggregates in self compacting concrete mixes». *Journal of Building Engineering*, 9, pp. 100-108. ISSN 2352-7102. DOI 10.1016/j.job.2016.11.013.
- WANG, J., HUANG, T., LIU, X., WU, P. y GUO, Z., 2013. «Mechanical Properties of Recycled Concrete in Marine Environment». Hindawi Publishing Corporation. *The Scientific World Journal*, 2013, pp. 8. DOI <http://dx.doi.org/10.1155/2013/728357>.



- WANG, X., LIU, W., WEI, D., ZHU, P. y HU, K., 2017. «A simple mix proportion design method based on frost durability for recycled high performance concrete using fully coarse recycled aggregate». *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, 32, 5, pp. 1119-1124. ISSN 1993-0437. DOI 10.1007/s11595-017-1720-9.
- WBTC, 2002. «Specifications Facilitating the Use of Recycled Aggregates». Works Bureau Technical Circular, 27 march, pp. 16.
- WEGIAN, F.M., 2010. «Effect of seawater for mixing and curing on structural concrete». *The IES Journal Part A: Civil & Structural Engineering*, 3, 4, pp. 235-243. ISSN 1937-3260. DOI 10.1080/19373260.2010.521048.
- WERLE, A., KAZMIERCZAK, C.S. y KULAKOWSKI, M., 2011. «Carbonation in concretes with recycled concrete aggregates». XII DBMC. International Conference on Durability of Building Materials and Components. Porto, Portugal: pp. 213-228. DOI 10.1590/S1678-86212011000200015.
- XIAO, J., HUANG, Y., YANG, J. y ZHANG, C., 2012. «Mechanical properties of confined recycled aggregate concrete under axial compression». *Construction and Building Materials*, 26, 1, pp. 591-603. ISSN 09500618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2011.06.062.
- XIAO, J., LI, J. y ZHANG, C., 2005. «Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading». *Cement and Concrete Research*, 35, 6, pp. 1187-1194. ISSN 00088846. DOI 10.1016/j.cemconres.2004.09.020.
- XIAO, J., LI, W., CORR, D.J. y SHAH, S.P., 2013. «Effects of interfacial transition zones on the stress-strain behavior of modeled recycled aggregate concrete». *Cement and Concrete Research*, 52, pp. 82-99. ISSN 00088846. DOI 10.1016/j.cemconres.2013.05.004.
- XIAO, J., LI, W., FAN, Y. y HUANG, X., 2012. «An overview of study on recycled aggregate concrete in China (1996-2011)». *Construction and Building Materials*, 31, pp. 364-383. ISSN 09500618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2011.12.074.
- XIAO, J., LI, W., SUN, Z., LANGE, D.A. y SHAH, S.P., 2013. «Properties of interfacial transition zones in recycled aggregate concrete tested by nanoindentation». *Cement and Concrete Composites*, 37, 1, pp. 276-292. ISSN 09589465. DOI 10.1016/j.cemconcomp.2013.01.006.
- XIAO, Z., LING, T.-C., KOU, S.-C., WANG, Q.Y. y POON, C.-S., 2011. «Use of wastes derived from earthquakes for the production of concrete masonry partition wall blocks». *Waste Management*, 31, 8, pp. 1859-1866. DOI 10.1016/j.wasman.2011.04.010.
- XUAN, D., HOUBEN, L.J.M., MOLENAAR, A.A.A. y SHUI, Z., 2012. «Mixture optimization of cement treated demolition waste with recycled masonry and concrete». *Materials and Structures*, 45, 1, pp. 143-151. ISSN 1871-6873. DOI 10.1617/s11527-011-9756-3.
- XUAN, D., ZHAN, B. y POON, C.-S., 2016. «Assessment of mechanical properties of concrete incorporating carbonated recycled concrete aggregates». *Cement and Concrete Composites*, 65, pp. 67-74. ISSN 09589465. DOI 10.1016/j.cemconcomp.2015.10.018.
- YANG, J., DU, Q. y BAO, Y., 2011. «Concrete with recycled concrete aggregate and crushed clay bricks». *Construction and Building Materials*, 25, 4, pp. 1935-1945. ISSN 09500618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2010.11.063.
- YAPRAK, H., ARUNTAS, H.Y., DEMIR, I. y SIMSEK, O., 2011. «Effects of the fine recycled concrete aggregates on the concrete properties». *International Journal of the Physical Sciences*, 6, 10, pp. 2455-2461. ISSN 19921950. DOI 10.5897/AJBM11.253.
- YE, G., 2003. «Experimental study and numerical simulation of the development of the microstructure and permeability of cementitious materials». Master of Engineering aan de Asian Institute of Technology geboren te Xiangtan, Hunan Province (China), pp. 206.
- YILDIRIM, S.T., MEYER, C. y HERFELLNER, S., 2015. «Effects of internal curing on the strength, drying shrinkage and freeze-thaw resistance of concrete containing recycled concrete aggregates».

- Construction and Building Materials, 91, pp. 288-296. ISSN 09500618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2015.05.045.
- ZARAGOZA BERNAL, A., 2000. «Reutilización de los residuos generados en obra para la obtención de hormigones». Universidad de Alicante. ISBN 8479085150.
- ZAUMANIS, M., MALLICK, R.B. y FRANK, R., 2014. «100% recycled hot mix asphalt: A review and analysis». Resources, Conservation and Recycling, 92, pp. 230-245. ISSN 0921-3449. DOI 10.1016/j.resconrec.2014.07.007.
- ZEGA, C.J., DI MAIO, Á.A. y ZERBINO, R.L., 2014. «Influence of Natural Coarse Aggregate Type on the Transport Properties of Recycled Concrete». Journal of Materials in Civil Engineering, 26, 2005, pp. 1-9. DOI 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000910.
- ZHANG, B., 1998. «Relationship between pore structure and mechanical properties of ordinary concrete under bending fatigue». Cement and Concrete Research, 28, 5, pp. 699-711. DOI 10.1016/S0008-8846(98)00037-4.
- ZHANG, J., SHI, C., LI, Y., PAN, X., POON, C.-S. y XIE, Z., 2015. «Influence of carbonated recycled concrete aggregate on properties of cement mortar». Construction and Building Materials, 98, Supplement C, pp. 1-7. ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2015.08.087.
- ZHANG, X., DENG, S. y QIN, Y., 2007. «Additional adsorbed water in recycled concrete». J. Cent. South Univ. Technol., pp. 449-453. DOI 10.1007/s11771-007-0304-9.
- ZHENG, C., LOU, C., DU, G., LI, X., LIU, Z. y LI, L., 2018. «Mechanical properties of recycled concrete with demolished waste concrete aggregate and clay brick aggregate». Results in Physics, 9, pp. 1317-1322. ISSN 2211-3797. DOI 10.1016/j.rinp.2018.04.061.
- ZHU, J., WU, S., ZHONG, J. y WANG, D., 2012. «Investigation of asphalt mixture containing demolition waste obtained from earthquake-damaged buildings». Construction and Building Materials, 29, pp. 466-475. ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2011.09.023.
- ZHU, P., ZHANG, X., WU, J. y WANG, X., 2016. «Performance degradation of the repeated recycled aggregate concrete with 70% replacement of three-generation recycled coarse aggregate». Journal Wuhan University of Technology, Materials Science Edition, 31, 5, pp. 989-995. ISSN 10002413. DOI 10.1007/s11595-016-1480-y.