

UNIVERSIDAD DE GRANADA
DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIONES ARQUITECTÓNICAS



EL RESIDUO DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN (RCD) COMO ÁRIDO EN
LA ELABORACIÓN DE PREFABRICADOS NO ESTRUCTURALES

TESIS DOCTORAL – 2013

MARÍA MARTÍN MORALES

Para la obtención del
GRADO DE DOCTOR POR LA UNIVERSIDAD DE GRANADA

DIRECTOR:

IGNACIO VALVERDE ESPINOSA

Universidad de Granada

Editor: Editorial de la Universidad de Granada
Autor: María Martín Morales
D.L.: GR 2243-2013
ISBN: 978-84-9028-648-7

La doctoranda María Martín Morales y el director de la Tesis Ignacio Valverde Espinosa, garantizamos, al firmar esta Tesis Doctoral, que el trabajo ha sido realizado por la doctoranda bajo la dirección de los directores de la Tesis y hasta donde nuestro conocimiento alcanza, en la realización del trabajo, se han respetado los derechos de otros autores a ser citados, cuando se han utilizado sus resultados o publicaciones.

Granada, a 15 de febrero de 2013

Director de la Tesis

Doctoranda

Fdo. Ignacio Valverde Espinosa

Fdo. María Martín Morales

PRELIMINAR

Con esta Memoria de Tesis se pretende dar cumplimiento a lo establecido en el Real Decreto 778/1998, de 30 de abril (BOE 5/05/98), por el que se regulan el tercer ciclo de estudios universitarios, la obtención y expedición del Título de Doctor y otros estudios de postgrado, para optar al Grado de Doctor por la Universidad de Granada.

En el Capítulo 7 se presentan tres artículos que forman parte de la investigación llevada a cabo y que se presentan en esta Memoria de Tesis:

- “Characterization of recycled aggregates construction and demolition waste for concrete production following the Spanish Structural Concrete Code EHE-08”, fue publicada en 2011 en el volumen 25 (2) de la revista CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS. Actualmente, en el Journal Citation Report, la revista tiene un índice de impacto de 1.834, encontrándose, en primer cuartil de la categoría CONSTRUCTION & BUILDING TECHNOLOGY, siendo la 8 de 56, y en segundo cuartil de la categoría MATERIAL SCIENCE, MULTIDISCIPLINARY siendo la 71 de 232.
 - “Métodos granulométricos en la caracterización del árido reciclado para su uso en hormigón estructural” (Size grading methods to characterize construction and demolition waste for its use in structural concrete), ha sido aceptado para su publicación en la revista MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN, encontrándose actualmente en prensa. En el Journal Citation Report, la revista cuenta actualmente con un índice de impacto de 0.437, encontrándose en el tercer cuartil de la categoría CONSTRUCTION & BUILDING TECHNOLOGY, siendo la 36 de 56, y en el cuarto cuartil de la categoría MATERIAL SCIENCE, MULTIDISCIPLINARY siendo la 192 de 232.
 - “Un estudio para la aplicación del árido reciclado en obras de carreteras en España siguiendo las especificaciones del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3) (Recycled aggregate in road construction following the Spanish General Technical Specifications for Roads and Bridge Works (PG-3): a case study)”, ha sido aceptado para su publicación en la revista INFORMES DE LA CONSTRUCCIÓN, encontrándose actualmente en prensa. En el Journal Citation Report, la revista cuenta actualmente con un índice de impacto de 0.260, encontrándose en el cuarto cuartil de la categoría CONSTRUCTION & BUILDING TECHNOLOGY, siendo la 47 de 56.
- Por último, esta Memoria cuenta con los informes favorables de los directores de investigación de la misma y del Consejo de Departamento de Construcciones Arquitectónicas de la Universidad de Granada, por lo que se deposita en la Secretaria de la Comisión de Doctorado con objeto de que sea conocida e informada por la dicha Comisión de Doctorado de la Universidad de Granada tras su exposición a la comunidad universitaria.

En Granada, a día 15 de febrero de 2013.

Fdo. María Martín Morales

Vº Bº del director de la Tesis:

Fdo. Dr. Ignacio Valverde Espinosa

.

ÍNDICE

ÍNDICE	7
ÍNDICE DE TABLAS.....	15
ÍNDICE DE FIGURAS.....	21
ÍNDICE DE ECUACIONES	25
1.INTRODUCCIÓN	27
2. OBJETIVOS	33
3. METODOLOGÍA	35
3.1. Etapa 1. Estudio bibliográfico	35
3.2. Etapa 2. Establecimiento de los objetivos.....	37
3.3. Etapa 3. Trabajo experimental	37
3.4. Etapa 4. Interpretación de los resultados.....	39
3.5. Etapa 5. Conclusiones y futuras líneas de investigación.....	39
4. ANTECEDENTES	41
4.1. Los residuos de construcción y demolición.....	41
4.1.1. Definición de residuo de construcción y demolición.....	41
4.1.2. La gestión de los residuos de construcción y demolición	43
4.2. Los residuos de construcción y demolición y el medio ambiente	46
4.2.1. Impactos medioambientales generados por los residuos de construcción y demolición	49
4.2.2. Datos estimativos de la producción de residuos de construcción y demolición.....	51
4.2.3. Datos estimativos del reciclado de residuos de construcción y demolición.....	54
4.2.4. Composición de los residuos de construcción y demolición	60
4.2.5. Utilización de los residuos de construcción y demolición	63
4.2.5.1. Utilización de los residuos de construcción y demolición en la elaboración de hormigón estructural	65
4.2.5.1.1. Influencia de la cantidad de árido reciclado en el comportamiento del hormigón estructural.....	66
4.2.5.1.2. Influencia de la calidad del árido reciclado en el comportamiento del hormigón estructural	69
4.2.5.1.3. Influencia de la composición del árido reciclado en el comportamiento del hormigón estructural.....	72
4.2.5.2. Utilización de los residuos de construcción y demolición en ingeniería civil.....	76
4.3. Los residuos de construcción y demolición y la prefabricación	80

4.3.1. Recorrido histórico de la técnica de la prefabricación	81
4.3.2. Prefabricación con residuos de construcción y demolición.....	85
4.4. Marco legislativo de los residuos de construcción y demolición	87
4.4.1. Marco legislativo de residuos de construcción y demolición en la Unión Europea	89
4.4.2. Marco legislativo de residuos de construcción y demolición en España.....	95
4.4.3. Marco legislativo de residuos de construcción y demolición en las Comunidades Autónomas.....	106
4.4.3.1. Marco legislativo de residuos de construcción y demolición de Andalucía.....	107
4.4.3.2. Marco legislativo de residuos de construcción y demolición de Aragón .	114
4.4.3.3. Marco legislativo de residuos de construcción y demolición de la Comunidad Asturiana	117
4.4.3.4. Marco legislativo de residuos de construcción y demolición de Baleares	117
4.4.3.5. Marco legislativo de residuos de construcción y demolición de Canarias	118
4.4.3.6. Marco legislativo de residuos de construcción y demolición de Cantabria.....	119
4.4.3.7. Marco legislativo de residuos de construcción y demolición de Castilla y León	121
4.4.3.8. Marco legislativo de residuos de construcción y demolición de Castilla-La Mancha	122
4.4.3.9. Marco legislativo de residuos de construcción y demolición en Cataluña	123
4.4.3.10. Marco legislativo de residuos de construcción y demolición en la Ciudad Autónoma de Ceuta.....	126
4.4.3.12. Marco legislativo de residuos de construcción y demolición de Galicia.....	126
4.4.3.13. Marco legislativo de residuos de construcción y demolición en Madrid	128
4.4.3.14. Marco legislativo de residuos de construcción y demolición en la Ciudad Autónoma de Melilla.....	130
4.4.3.15. Marco legislativo de residuos de construcción y demolición de Murcia	130
4.5. Marco técnico de los áridos reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición	135
4.5.1. Alemania	136
4.5.2. Australia	138
4.5.3. Bélgica	140
4.5.4. Brasil	141

4.5.5. China	142
4.5.6. Corea.....	143
4.5.7. España.....	143
4.5.7.1. Proyecto GEAR: Guía española de áridos reciclados procedentes de RCD	143
4.5.7.2. Instrucción EHE-08.....	145
4.5.8. Europa	149
4.5.8.1. Proyecto de Norma Europea prEN 12620	149
4.5.8.2. Norma Europea EN 933-11	150
4.5.9. Holanda.....	150
4.5.9.1. Recomendación CUR	150
4.5.9.2. Norma holandesa NEN 5905	152
4.5.10. Hong Kong.....	153
4.5.11. Italia.....	154
4.5.12. Japón	155
4.5.12.1. Recomendaciones BCSJ.....	155
4.5.12.2. Normas de la Japanese Industrial Standard JIS.....	156
4.5.13. Noruega.....	157
4.5.14. Portugal.....	159
4.5.15. Reino Unido.....	161
4.5.15.2. BRE Digest 433	162
4.5.16. Suiza	166
4.6. Criterios de calidad para el uso del árido reciclado en la elaboración de hormigón.....	169
4.6.1. Clasificación del árido reciclado de acuerdo con su composición	170
4.6.2. Características físicas de los áridos reciclados	171
4.6.2.1. Densidad	176
4.6.2.2. Absorción de agua	188
4.6.2.3. Porosidad	190
4.6.2.4. Pérdidas por calcinación	190
4.6.3. Comportamiento mecánico de los áridos reciclados	191
4.6.3.1. Resistencia a la fragmentación de Los Ángeles	193
4.6.3.2. Valor del 10% de finos	195
4.6.3.3. Pérdida de peso por sulfato magnésico.....	195
4.6.4. Aptitud química de los áridos reciclados	196
4.6.4.1. Compuestos de azufre.....	203
4.6.4.2. Cloruros	204

4.6.4.3. Sustancias peligrosas	206
4.6.4.4. Materia orgánica.....	207
4.6.5. Requisitos granulométricos de los áridos reciclados	207
4.6.5.1. Tamaño del árido.....	213
4.6.5.2. Contenido en arena	213
4.6.5.3. Coeficiente de forma	214
4.6.5.4. Índice de lajas.....	215
4.6.5.5. Porcentaje de partículas trituradas	215
4.6.5.6. Módulo de finura	216
4.6.5.7. Contenido en finos.....	217
4.6.5.8. Índice de equivalente de arena	217
5. MATERIALES Y MÉTODOS.....	219
5.1. Introducción.....	219
5.2. Caracterización del árido reciclado.....	219
5.2.1. Toma de muestras	219
5.2.2. Descripción de la planta de valorización.....	221
5.2.3. Ensayos realizados al árido reciclado en la fase primera de caracterización	224
5.2.3.1. Determinación de la granulometría de las partículas. Método de Tamizado.....	224
5.2.3.2. Evaluación de los finos. Ensayo del equivalente de arena	228
5.2.3.3. Resistencia a la fragmentación. Ensayo de Los Ángeles	229
5.2.3.4. Determinación de la plasticidad de un suelo	231
5.2.3.5. Ensayo de compactación. Próctor normal y próctor modificado	232
5.2.3.6. Contenido en materia orgánica	232
5.2.3.7. Determinación del contenido en sulfatos solubles en ácido.....	233
5.2.4. Ensayos no realizados al árido reciclado en la fase primera de caracterización	233
5.2.4.1. Ensayos no realizados según la Instrucción EHE-08	234
5.2.4.2. Ensayos no realizados según el Pliego PG-3	235
5.3. Fase 2: Elaboración de morteros en laboratorio.....	236
5.4. Fase 3: Fabricación de piezas prefabricadas de hormigón.....	238
5.4.1. Descripción de la planta de prefabricados	239
5.4.2. Ensayos realizados a las piezas prefabricadas de hormigón no estructural	242
5.4.2.1. Ensayos realizados a los bloques prefabricados de hormigón no estructural	242

5.4.2.2. Ensayos realizados a las bovedillas prefabricadas de hormigón no estructural	243
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	245
6.1. Análisis de resultados de los ensayos realizados al árido reciclado en la primera fase de caracterización y discusión	245
6.1.1. Introducción.....	245
6.1.2. Análisis de resultados y discusión para la aplicación de árido reciclado en hormigón estructural.....	246
6.1.2.1. Designación de los áridos según la Instrucción EHE-08 y la norma UNE-EN 12620.....	246
6.1.2.2. Requisitos granulométricos del árido grueso según la Instrucción EHE-08 y la norma UNE-EN 12620	247
6.1.2.3. Requisitos granulométricos del árido fino según la Instrucción EHE-08 y la norma UNE-EN 12620	254
6.1.2.4. Requisitos granulométricos del árido todo uno según la Instrucción EHE-08 y la norma UNE-EN 12620	254
6.1.2.5. Recomendaciones para la utilización de hormigones reciclados según el anejo 15 de la Instrucción EHE-08.....	255
6.1.2.6. Recomendaciones para la utilización de hormigones reciclados según el anejo 18 de la Instrucción EHE-08.....	256
6.1.2.7. Requisitos granulométricos del árido según otros autores	257
6.1.2.7.1. Método granulométrico de Fuller	257
6.1.2.7.2. Método granulométrico según Bolomey.....	257
6.1.2.7.3. Método granulométrico según la norma alemana DIN 1045-1	258
6.1.2.7.4. Modulo granulométrico de Abrams	259
6.1.2.7.5. Método granulométrico de la norma ASTM C 33-11	260
6.1.2.7.6. Husos granulométricos de las arenas según la EHE-08.....	260
6.1.2.7.7. Método granulométrico DREUX.	261
6.1.2.8. Aptitud granulométrica del árido reciclado según otros autores	261
6.1.2.8.1. Muestras de árido grueso reciclado H	261
6.1.2.8.2. Muestras de árido grueso reciclado H-001	264
6.1.2.8.3. Muestras de árido fino reciclado H-002.....	265
6.1.2.8.4. Muestras de árido grueso reciclado 001	265
6.1.2.8.5. Muestras de árido fino reciclado 002	268
6.1.2.8.6. Muestras de árido todo en uno reciclado 003	270
6.1.2.8.7. Muestras de árido todo en uno reciclado 004	273
6.1.2.9. Evaluación de los finos	279
6.1.2.10. Resistencia a la fragmentación.....	280

6.1.2.11. Contenido de materia orgánica.....	281
6.1.2.12. Contenido en sulfatos solubles en ácido.....	281
6.1.3. Análisis de resultados y discusión para la aplicación de árido reciclado en obras de carreteras según el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales PG-3	281
6.1.3.1. Clasificación de suelos.....	282
6.1.3.1.1. Clasificación ASTM.....	282
6.1.3.1.2. Clasificación A.A.S.H.T.O.....	283
6.1.3.1.3. Clasificación del artículo 330 del PG-3.....	284
6.1.3.2. Compactación.....	288
6.1.3.3. Cumplimiento del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para obras de Carreteras y Puentes PG-3	290
6.1.3.3.1. Artículo 330: Terraplenes (Parte 3: Explanaciones)	290
6.1.3.3.2. Artículo 331: Pedraplenes (Parte 3: Explanaciones).....	292
6.1.3.3.3. Artículo 332: Rellenos localizados (Parte 3: Explanaciones).....	292
6.1.3.3.4. Artículo 333: Rellenos todo uno (Parte 3: Explanaciones)	293
6.1.3.3.5. Artículo 421: Rellenos localizados de material drenante (Parte 4: Drenaje)	293
6.1.3.3.6. Artículo 510: Zahorras (Parte 5: Firmes)	295
6.1.3.3.7. Artículo 512: Suelos estabilizados in situ (Parte 5: Firmes).....	301
6.1.3.3.8. Artículo 513: Materiales tratados con cemento: suelocemento y gravacemento (Parte 5: Firmes).....	303
6.1.3.3.9. Artículo 530: Riegos de imprimación (Parte 5: Firmes)	308
6.1.3.3.10. Artículo 532: Riegos de curado (Parte 5: Firmes)	308
6.1.3.3.11. Artículo 533: Tratamientos superficiales mediante riegos con gravilla (Parte 5: Firmes).....	309
6.1.3.3.12. Artículo 540: Lechadas bituminosas (Parte 5: Firmes).....	309
6.1.3.3.13. Artículo 542: Mezclas bituminosas en caliente tipo hormigón bituminoso (Parte 5: Firmes)	313
6.1.3.3.14. Artículo 543: Mezclas bituminosas para capas de rodadura. Mezclas drenantes y discontinuas (Parte 5: Firmes).....	318
6.1.3.3.15. Artículo 550: Pavimentos de hormigón (Parte 5: Firmes).....	323
6.1.3.3.16. Artículo 551: Hormigón magro vibrado (Parte 5: Firmes)	325
6.2. Análisis de resultados de los ensayos realizados al árido reciclado en la segunda fase de elaboración de morteros y discusión.....	325
6.2.1. Aptitud de los áridos reciclados	326
6.2.1.1. Aptitud granulométrica del árido reciclado.....	326
6.2.1.2. Determinación de la densidad y absorción de agua del árido reciclado	329

6.2.1.3. Determinación de los componentes químicos del árido reciclado	330
6.2.1.4. Clasificación de los componentes de los áridos gruesos reciclados.....	331
6.2.2. Aptitud de los morteros	332
6.2.2.1. Elaboración de probetas de mortero.....	332
6.2.2.2. Determinación de las resistencias mecánicas de las probetas de mortero	334
6.2.2.2.1. Pruebas iniciales	334
6.2.2.2.2. Primer ajuste.....	336
6.2.2.2.3. Sustituciones parciales de árido natural	344
6.2.2.3. Determinación de la compacidad de las probetas de mortero.....	347
6.3. Análisis de resultados de los ensayos realizados al árido reciclado en la tercera fase de fabricación de piezas prefabricadas y discusión	349
6.3.1. Aptitud de los bloques prefabricados de hormigón reciclado.....	349
6.3.1.1. Dosificaciones.....	349
6.3.1.2. Resultados de los ensayos realizados a los bloques prefabricados de hormigón reciclado	349
6.3.2. Aptitud de las bovedillas prefabricadas de hormigón reciclado	356
6.3.2.1. Dosificaciones.....	356
6.3.2.2. Resultados de los ensayos realizados a las bovedillas prefabricadas de hormigón reciclado	357
7. PUBLICACIONES EN LAS QUE SE INCLUYEN PARTE DE LOS RESULTADOS DE LA TESIS DOCTORAL	362
7.1. Primera publicación.....	362
7.2. Segunda publicación	371
7.3. Tercera publicación	389
8. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	408
8.1. Conclusiones	408
8.2. Futuras líneas de investigación.....	410
REFERENCIAS	412

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Alternativas probables de valorización de los residuos sin mezclar según el II PNRCD 2007-15.....	47
Tabla 2. Alternativas probables de valorización de los residuos sin mezclar según el II PNRCD 2007-15.....	48
Tabla 3. Residuos de construcción y demolición generados en la Unión Europea (1000 toneladas) según Eurostat.....	55
Tabla 4. Datos de gestión de RCD en España desde 2002 a 2006 según II PNRCD	59
Tabla 5. Distribución de los constituyentes de los RCD según el ITeC	61
Tabla 6. Evaluación del volumen de RCD generados de acuerdo con la tipología de la construcción según el ITeC	61
Tabla 7. Distribución de los constituyentes de los RCD según Katz y Baum.....	62
Tabla 8. Composición del árido reciclado para hormigón según la norma DIN 4226-100.....	137
Tabla 9. Prescripciones del árido reciclado para hormigón según la norma DIN 4226-100	137
Tabla 10. Porcentaje de sustitución de árido grueso reciclado para hormigón según la norma DIN 4226-100	138
Tabla 11. Composición del árido grueso reciclado para hormigón según la guía CSIRO	139
Tabla 12. Prescripciones del árido grueso reciclado para hormigón según la guía CSIRO	139
Tabla 13. Composición de los áridos reciclados según la norma PTV-406.....	140
Tabla 14. Prescripciones del árido reciclado para hormigón según la norma MBR 15116.....	142
Tabla 15. Prescripciones del árido grueso reciclado para hormigón según la norma DG/TJ07/008.....	142
Tabla 16. Prescripciones del árido reciclado según la norma KS F 2573	143
Tabla 17. Propuesta de clasificación de los áridos reciclados para las recomendaciones técnicas de la guía GEAR.....	145
Tabla 18. Prescripciones del árido reciclado para las recomendaciones técnicas de la guía GEAR	146
Tabla 19. (Continuación) Prescripciones del árido reciclado para las recomendaciones técnicas de la guía GEAR.....	147
Tabla 20. Prescripciones del árido grueso reciclado según la Instrucción EHE-08.....	148
Tabla 21. Clasificación de los áridos reciclados según la norma EN 933-11.....	150
Tabla 22. Clasificación de los áridos reciclados según las recomendaciones CUR.....	151
Tabla 23. Prescripciones del árido reciclado según las recomendaciones CUR..	152
Tabla 24. Prescripciones del árido grueso reciclado según la norma NEN 5905	153
Tabla 25. Prescripciones del árido grueso reciclado según las recomendaciones WBTC 12/2000	154
Tabla 26. Prescripciones del árido grueso reciclado para hormigón según la norma NTC	155

Tabla 27. Prescripciones del árido reciclado según las recomendaciones BCSJ	156
Tabla 28. Tipos de hormigón con árido reciclado según las recomendaciones BCSJ	156
Tabla 29. Prescripciones del árido reciclado según las normas JIS.....	157
Tabla 30. Cantidad de contaminantes permitidos al árido reciclado de clase H según la norma JIS A 5021.....	157
Tabla 31. Requisitos del árido reciclado de la guía NB 26.....	158
Tabla 32. Porcentajes máximos de sustitución según la guía NB 26.....	158
Tabla 33. Composición de los áridos reciclados según la norma LNEC E 471 ...	159
Tabla 34. Prescripciones del árido reciclado de la norma LNEC E 471	160
Tabla 35. Aplicaciones permitidas para los áridos reciclados según la norma LNEC E 471	161
Tabla 36. Prescripciones del árido grueso reciclado según recomendaciones RILEM	162
Tabla 37. Composición del árido grueso reciclado según recomendaciones RILEM	162
Tabla 38. Tipología y composición del árido reciclado según las recomendaciones BRE Digest 433	163
Tabla 39. Categoría resistente máxima del hormigón según las recomendaciones BRE Digest 433	163
Tabla 40. Contenido en impurezas del árido reciclado según las recomendaciones BRE Digest 433	164
Tabla 41. Prescripciones del árido grueso reciclado según norma BS 8500-2 ...	165
Tabla 42. Composición del árido grueso reciclado según norma BS 8500-2.....	165
Tabla 43. Especificaciones de utilización del árido grueso reciclado según norma BS 8500-2.....	165
Tabla 44. Composición del árido grueso reciclado según boletín SIA 2030.....	166
Tabla 45. Requisitos del árido reciclado según SIA 162/4	167
Tabla 46. Condiciones de utilización del árido reciclado según norma OT 70085	168
Tabla 47. Clases de exposición recomendadas para el hormigón reciclado según boletín SIA 2030	169
Tabla 48. Composición del árido reciclado todo en uno	172
Tabla 49. Composición del árido grueso reciclado	173
Tabla 50. Composición del árido fino reciclado.....	173
Tabla 51. Resumen de la clasificación de los áridos reciclados basada en su composición según las normas y guías de recomendaciones	174
Tabla 52. (Continuación) Resumen de la clasificación de los áridos reciclados basada en su composición según las normas y guías de recomendaciones	175
Tabla 53. Requisitos físicos del árido reciclado de acuerdo con las normas y guías de recomendaciones.....	177
Tabla 54. Límites de los requisitos físicos del árido reciclado de acuerdo con las normas y guías de recomendaciones	178
Tabla 55. Propiedades físicas de los áridos reciclados todo uno.....	179
Tabla 56. Propiedades físicas de los áridos gruesos reciclados mixtos (MRA) a los que no se les indica el tamaño	180

Tabla 57. Propiedades físicas de los áridos gruesos reciclados mixtos (MRA) de hasta 31.5mm	181
Tabla 58. Propiedades físicas de los áridos gruesos reciclados mixtos (MRA) de más de 31.5mm.....	182
Tabla 59. Propiedades físicas de los áridos gruesos reciclados cerámicos (RMA).....	182
Tabla 60. Propiedades físicas de los áridos gruesos reciclados de hormigón (RCA)	183
Tabla 61. Propiedades físicas de los áridos finos reciclados mixtos (MRA).....	184
Tabla 62. Propiedades físicas de los áridos finos reciclados de hormigón (RCA)	185
Tabla 63. Propiedades físicas de los áridos finos reciclados cerámicos (RMA) y de los finos reciclados.....	185
Tabla 64. Valores máximos y mínimos de densidad en las referencias.....	186
Tabla 65. Propiedades mecánicas del árido reciclado de acuerdo las normas y guías de recomendaciones	191
Tabla 66. Límites de los requisitos mecánicos del árido reciclado de acuerdo con las normas y guías de recomendaciones.....	192
Tabla 67. Comportamiento mecánico de los áridos reciclados todo en uno según las normas y guías de recomendaciones	192
Tabla 68. Comportamiento mecánico de los áridos gruesos reciclados mixtos (MRA) según las normas y guías de recomendaciones.....	193
Tabla 69. Comportamiento mecánico de los áridos gruesos reciclados de hormigón (RCA) y cerámicos (RMA) según las normas y guías de recomendaciones	194
Tabla 70. Requisitos químicos de los áridos reciclados contemplados en las normas y guías de recomendaciones	197
Tabla 71. Límites de los requisitos químicos del árido reciclado de acuerdo con las normas y guías de recomendaciones.....	198
Tabla 72. (Continuación) Límites de los requisitos químicos del árido reciclado de acuerdo con las normas y guías de recomendaciones	199
Tabla 73. Requisitos químicos de los áridos reciclados todo uno	200
Tabla 74. Requisitos químicos de los áridos gruesos reciclados	201
Tabla 75. Requisitos químicos de los áridos finos reciclados	202
Tabla 76. Requisitos geométricos de los áridos reciclados en las normas y guías de recomendaciones.....	208
Tabla 77. Límites de los requisitos químicos del árido reciclado de acuerdo con las normas y guías de recomendaciones.....	209
Tabla 78. Requisitos geométricos de los áridos reciclados todo uno.....	210
Tabla 79. Requisitos geométricos de los áridos gruesos reciclados de hormigón y cerámicos	210
Tabla 80. Requisitos geométricos de los áridos gruesos reciclados mixtos	211
Tabla 81. Requisitos geométricos de los áridos finos reciclados mixtos.....	212
Tabla 82. Requisitos geométricos de los áridos finos reciclados de hormigón y cerámicos y de los finos reciclados	213
Tabla 83. Módulos de finura de los áridos reciclados de los estudios consultados	216
Tabla 84. Ensayos realizados conforme a su correspondiente normativa.	224

Tabla 85. Ensayos realizados en la segunda fase de trabajo conforme a su correspondiente normativa.....	237
Tabla 86. Ensayos realizados a los bloques prefabricados de hormigón según UNE-EN 771-3.....	243
Tabla 87. Ensayos realizados a las bovedillas prefabricadas de hormigón	244
Tabla 88. Designación de los áridos según artículo 28.2 EHE-08 y norma UNE-EN 12620	246
Tabla 89. Contenido máximo en finos de los áridos según EHE-08 y UNE-EN 12620	250
Tabla 90. Requisitos generales granulométricos del árido según EHE-08 y UNE- EN 12620	251
Tabla 91. Requisitos granulométricos del árido, indicando la desviación. EHE-08 y UNE- EN 12620	252
Tabla 92. Categoría para los áridos gruesos, según las limitaciones de los tamices intermedios según UNE-EN 12620	253
Tabla 93. Categoría para los áridos finos y todo uno, según las limitaciones de los tamices intermedios según UNE- EN 12620	253
Tabla 94. Métodos granulométricos y muestras a las que se le han aplicado	256
Tabla 95. Módulos granulométricos de Abrams que siguen la parábola de Fuller.....	259
Tabla 96. Módulos granulométricos de las muestras estudiadas para el tamaño máximo D.....	260
Tabla 97. Valores que limitan el dominio de las arenas según la norma ASTM C 33-11	260
Tabla 98. Husos granulométricos del árido fino según la Instrucción EHE-08..	261
Tabla 99. Módulos granulométricos de la muestra 004 para el tamaño máximo D	278
Tabla 100. Requisitos granulométricos del árido. Contenido en finos y calidad de la arena según EHE-08 y categoría declarada según UNE-EN 12620	279
Tabla 101. Resistencia al desgaste de Los Ángeles según EHE-08 y categoría declarada según UNE-EN 12620	280
Tabla 102. Contenido en sulfatos solubles en ácido según EHE-08 y categoría declarada según UNE-EN 12620	281
Tabla 103. Clasificación de las muestras como suelo según el método ASTM ...	283
Tabla 104. Clasificación de las muestras como suelo según el método AASHTO M 145-91.....	283
Tabla 105. Cumplimiento de los requisitos granulométricos según clasificación de suelos del artículo 330 del PG-3.....	285
Tabla 106. (Continuación) Cumplimiento de los requisitos granulométricos según clasificación de suelos del artículo 330 del PG-3.....	286
Tabla 107. Cumplimiento de los requisitos granulométricos según clasificación de suelos del artículo 330 del PG-3.....	287
Tabla 108. Resultados ensayos próctor normal, próctor modificado y resistencia a compresión simple	289
Tabla 109. Cumplimiento de los requisitos granulométricos para rellenos tipo terraplén según PG-3	291

Tabla 110. Cumplimiento de los requisitos granulométricos para pedraplenes según PG-3	292
Tabla 111. Cumplimiento de los requisitos granulométricos para rellenos todo uno según PG-3	293
Tabla 112. Cumplimiento de los requisitos generales para rellenos localizados de material drenante según PG-3.....	294
Tabla 113. Cumplimiento de los requisitos específicos para rellenos localizados de material drenante según PG-3.....	294
Tabla 114. Cumplimiento de los requisitos generales para zahorras según PG-3	298
Tabla 115. Cumplimiento de los requisitos generales para suelos estabilizados in situ según PG-3.....	302
Tabla 116. Cumplimiento de los requisitos granulométricos para suelos estabilizados in situ según PG-3.....	303
Tabla 117. Cumplimiento de los requisitos para suelos tratados con cemento según PG3	304
Tabla 118. Cumplimiento de los requisitos granulométricos para el árido grueso en suelos tratados con cemento-gravacemento según PG3	305
Tabla 119. Cumplimiento de los requisitos para riegos de imprimación según PG3	308
Tabla 120. Cumplimiento de los requisitos generales del árido grueso para lechadas bituminosas según PG3.....	310
Tabla 121. Cumplimiento de los requisitos generales del árido fino para lechadas bituminosas según PG3.....	310
Tabla 122. Cumplimiento de los requisitos del árido para mezclas bituminosas en caliente tipo hormigón bituminoso según PG3	314
Tabla 123. Cumplimiento de los requisitos del árido para mezclas bituminosas para capas de rodadura. Mezclas drenantes y discontinuas según PG3.....	320
Tabla 124. Cumplimiento de los requisitos del árido para pavimentos de hormigón según PG3.....	324
Tabla 125. Designación y contenido en finos de los áridos según artículo 28.2 EHE-08 y norma UNE-EN 12620.....	326
Tabla 126. Valores de densidad y absorción de los áridos utilizados en la elaboración de morteros	330
Tabla 127. Composición química de los áridos reciclados utilizados en los morteros	330
Tabla 128. Clasificación de los áridos gruesos reciclados según UNE-EN 933-11 y categoría asignada según UNE-EN 12620	331
Tabla 129. Resistencia de los morteros ensayados en la prueba inicial.....	340
Tabla 130. Resistencia de los morteros ensayados en el primer ajuste	341
Tabla 131. Resistencia de los morteros ensayados con sustituciones parciales de árido natural por árido reciclado de hormigón (RCA)	342
Tabla 132. Resistencia de los morteros ensayados con sustituciones parciales de árido natural por árido reciclado mixto (MRA)	343
Tabla 133. Densidad de los morteros ensayados en la prueba inicial.....	348
Tabla 134. Densidad de los morteros ensayados con sustituciones parciales y total de árido natural por árido reciclado	348

Tabla 135. Dosificación de bloques de hormigón	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 136. Dimensiones, tolerancias y aspecto de los bloques de hormigón según UNE-EN 772-3, UNE-EN 772-16 y UNE-EN 772-20.....	351
Tabla 137. Propiedades físicas, mecánicas y durabilidad de los bloques de hormigón según UNE-EN 771-3	352
Tabla 138. Peso que presentan los bloques de hormigón reciclado	353
Tabla 139. Requisitos de los bloques de hormigón según UNE 41166 y NTE-EFB	354
Tabla 140. Designación de los bloques de hormigón reciclado	356
Tabla 141. Dosificación de bovedillas de hormigón reciclado	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 142. Dimensiones y tolerancias de las bovedillas de hormigón según UNE-EN 15037-2	358
Tabla 143. Propiedades físicas y mecánicas de las bovedillas de hormigón según UNE-EN 15037-2	359

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Porcentaje de RCD reciclado sobre el porcentaje de RCD producido	56
Figura 2. Evolución del tratamiento de los residuos en la EU-27 (1000 toneladas) según Eurostat.....	58
Figura 3. Procesado de las muestras por cuarteo según UNE-EN 932-2	221
Figura 4. Descarga en planta y acopio del residuo de construcción y demolición (RCD) y alimentación del trómel.....	222
Figura 5. Separación del material de tamaño inferior a 10mm y salida hacia la cinta de triaje	222
Figura 6. Aspiración de polvo y limpieza manual en cinta de triaje.....	223
Figura 7. Separación de material férrico antes de la trituración y trituración, cribado y limpieza de metales férricos a la salida de la trituradora.....	223
Figura 8. Residuos de construcción y demolición y áridos reciclados producidos en planta	223
Figura 9. Procedimiento de tamizado según normas UNE-EN 932 y UNE-EN 933	225
Figura 10. Ensayo de equivalente de arena según la norma UNE-EN 933-8	228
Figura 11. Muestra preparada para el ensayo de Los Ángeles según la norma UNE-EN 1097-2	230
Figura 12. Resultado de la muestra de ensayo procesada según la norma UNE-EN 1097-2	230
Figura 13. Ensayo de plasticidad según UNE 103103 y UNE 103104.....	231
Figura 14. Ensayo próctor modificado según UNE 103501.....	232
Figura 15. Ensayo de materia orgánica según UNE-EN 1744-1	233
Figura 16. Bloques y bovedillas recién fabricadas	240
Figura 17. Amasado del hormigón y alimentación al equipo de vibrocompactación	240
Figura 18. Equipo de vibrocompactación fabricando bloques	241
Figura 19. Carro contenedor vertical y traslado de tablas a la cámara de curado	241
Figura 20. Muestras H comparadas con la curva de Fuller para tamaño máximo 40 y 31.5mm	262
Figura 21. Muestras H comparadas con las curvas de Bolomey para tamaño 31.5mm	263
Figura 22. Muestras H comparadas con las curvas de Bolomey para tamaño 40mm	263
Figura 23. Muestras H comparadas con los husos DIN 1045-1 para tamaño 31.5mm	264
Figura 24. Muestras H-002 comparadas con los husos granulométricos del árido fino según la Instrucción EHE-08.....	266
Figura 25. Muestras H-002 comparadas con los husos ASTM C 33-11.....	266
Figura 26. Muestras H-002 comparadas con los husos Dreux.....	267
Figura 27. Muestras H-002 comparadas con los husos DIN 1045-1	267
Figura 28. Muestras 002 comparadas con los husos granulométricos del árido fino según la Instrucción EHE-08.....	268
Figura 29. Muestras 002 comparadas con los husos ASTM C 33-11	269
Figura 30. Muestras 002 comparadas con los husos Dreux	269

Figura 31. Muestras 002 comparadas con los husos DIN 1045-1	270
Figura 32. Muestras 003 comparadas con los husos granulométricos del árido fino según la Instrucción EHE-08.....	271
Figura 33. Muestras 003 comparadas con los husos DIN 1045-1	271
Figura 34. Muestras 003 comparadas con los husos ASTM C 33-11	272
Figura 35. Muestras 003 comparadas con los husos Dreux	272
Figura 37. Muestras 004 comparadas con la curva de Fuller para tamaño máximo 63mm.....	274
Figura 38. Muestras 004 con tamaño máximo 125mm comparadas con la curva de Fuller para tamaño máximo 125, 63, 40 Y 31.5mm.....	275
Figura 39. Muestras 004 con tamaño máximo 63mm comparadas con la curva de Fuller para tamaño máximo 63, 40 y 31.5mm.....	275
Figura 40. Muestras 004 con tamaño máximo 40mm comparadas con la curva de Fuller para tamaño máximo 40 y 31.5mm.....	276
Figura 41. Muestras 004 con tamaño máximo 31.5mm comparadas con la curva de Fuller para tamaño máximo 40 y 31.5mm.....	276
Figura 42. Muestras 004 comparadas con las curvas de Bolomey para tamaño 63mm	277
Figura 43. Muestras 004 comparadas con las curvas de Bolomey para tamaño 40mm	277
Figura 44. Muestras 004 comparadas con los husos DIN 1045-1 para tamaño 40mm	278
Figura 45. Muestras comparadas con los husos granulométricos de las zahorras artificiales ZA25 según PG3	297
Figura 46. Muestras comparadas con los husos granulométricos de las zahorras artificiales ZA20 según PG3	299
Figura 47. Muestras comparadas con los husos granulométricos de las zahorras artificiales ZAD20 según PG3.....	299
Figura 48. Muestras comparadas con los husos granulométricos de las zahorras naturales ZN40 según PG3	300
Figura 49. Muestras comparadas con los husos granulométricos de las zahorras naturales ZN25 según PG3	300
Figura 50. Muestras comparadas con los husos granulométricos de las zahorras naturales ZN20 según PG3	301
Figura 51. Muestras comparadas con los husos granulométricos de los suelos tratados con cemento SC20 según PG3	306
Figura 52. Muestras comparadas con los husos granulométricos de los suelos tratados con cemento SC40 según PG3	306
Figura 53. Muestras comparadas con los husos granulométricos de los materiales tratados con cemento-gravacemento GC25 según PG3	307
Figura 54. Muestras comparadas con los husos granulométricos de los materiales tratados con cemento-gravacemento GC20 según PG3	307
Figura 55. Muestras comparadas con los husos granulométricos de las lechadas bituminosas LB-1 según PG3.....	311
Figura 56. Muestras comparadas con los husos granulométricos de las lechadas bituminosas LB-2 según PG3.....	311
Figura 57. Muestras comparadas con los husos granulométricos de las lechadas bituminosas LB-3 según PG3.....	312

Figura 58. Muestras comparadas con los husos granulométricos de las lechadas bituminosas LB-4 según PG3.....	312
Figura 59. Muestras comparadas con los husos granulométricos de las mezclas bituminosas en caliente tipo hormigón densas AC D 16 según PG3	315
Figura 60. Muestras comparadas con los husos granulométricos de las mezclas bituminosas en caliente tipo hormigón densas AC D 22 según PG3	315
Figura 61. Muestras comparadas con los husos granulométricos de las mezclas bituminosas en caliente tipo hormigón semidensas AC S 16 según PG3	316
Figura 62. Muestras comparadas con los husos granulométricos de las mezclas bituminosas en caliente tipo hormigón semidensas AC S 22 según PG3	316
Figura 63. Muestras comparadas con los husos granulométricos de las mezclas bituminosas en caliente tipo hormigón semidensas AC S 32 según PG3	317
Figura 64. Muestras comparadas con los husos granulométricos de las mezclas bituminosas en caliente tipo hormigón gruesas AC G 22 según PG3	317
Figura 65. Muestras comparadas con los husos granulométricos de las mezclas bituminosas en caliente tipo hormigón gruesas AC G 32 según PG3	318
Figura 66. Muestras comparadas con los husos granulométricos de las mezclas bituminosas para capas de rodadura. Mezclas drenantes PA 16 según PG3	319
Figura 67. Muestras comparadas con los husos granulométricos de las mezclas bituminosas para capas de rodadura. Mezclas drenantes PA 11 según PG3	321
Figura 68. Muestras comparadas con los husos granulométricos de las mezclas bituminosas para capas de rodadura. Mezclas discontinuas BBTM 8A según PG3.....	321
Figura 69. Muestras comparadas con los husos granulométricos de las mezclas bituminosas para capas de rodadura. Mezclas discontinuas BBTM 11A según PG3.....	322
Figura 70. Muestras comparadas con los husos granulométricos de las mezclas bituminosas para capas de rodadura. Mezclas discontinuas BBTM 8B según PG3.....	322
Figura 71. Muestras comparadas con los husos granulométricos de las mezclas bituminosas para capas de rodadura. Mezclas discontinuas BBTM 11B según PG3.....	323
Figura 72. Muestras de árido fino comparadas con los husos granulométricos de las arenas para pavimentos de hormigón según PG3	324
Figura 73. Muestras de áridos para la elaboración de morteros comparadas con los husos granulométricos de la arena según la Instrucción EHE-08.....	327

Figura 74. Muestras de áridos según los husos granulométricos para la arena ASTM C 33-11	328
Figura 75. Muestras de áridos para la elaboración de morteros comparadas con los husos Dreux	328
Figura 76. Muestras de áridos para la elaboración de morteros comparadas con los husos granulométricos para la arena DIN 1045-1	329
Figura 77. Equipo de compactación adaptado.....	333
Figura 78. Fabricación de mortero y llenado de probetas	333
Figura 79. Desmoldeo y curado de probetas de mortero	334
Figura 80. Rotura de probetas de mortero a flexión y compresión	335
Figura 81. Resistencias a compresión a 7 y 28 días obtenidas por los morteros en las pruebas iniciales	336
Figura 82. Resistencias a flexión a 7 y 28 días obtenidas por los morteros en las pruebas iniciales	336
Figura 83. Probetas defectuosas	336
Figura 84. Resistencias a flexión a 7 días de los morteros en el primer ajuste de dosificación	337
Figura 85. Resistencias a flexión a 28 días de los morteros en el primer ajuste de dosificación.....	338
Figura 86. Resistencias a compresión a 7 días de los morteros en el primer ajuste de dosificación.....	338
Figura 87. Resistencias a compresión a 28 días de los morteros en el primer ajuste de dosificación.....	338
Figura 88. Resistencias a flexión a 7 días de los morteros con sutitución de RCA.....	344
Figura 89. Resistencias a flexión a 28 días de los morteros con sutitución de RCA.....	344
Figura 90. Resistencias a compresión a 7 días de los morteros con sutitución de RCA.....	345
Figura 91. Resistencias a compresión a 28 días de los morteros con sutitución de RCA.....	345
Figura 92. Resistencias a flexión a 7 días de los morteros con sutitución de MRA.....	345
Figura 93. Resistencias a flexión a 28 días de los morteros con sutitución de MRA.....	346
Figura 94. Resistencias a compresión a 7 días de los morteros con sutitución de MRA.....	346
Figura 95. Resistencias a compresión a 28 días de los morteros con sutitución de MRA	346
Figura 96. Medición de volumen por desplazamiento de mercurio descrito en la norma UNE 103108	347

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Expresión de Fuller para la obtención de la curva granulométrica ideal.....	257
Ecuación 2. Expresión de Bolomey para la obtención de la curva granulométrica ideal	258

1.INTRODUCCIÓN

La producción y el tratamiento de los residuos que se generan es uno de los problemas más acuciantes a los que se tienen que enfrentar las sociedades actuales (Medina, Sánchez de Rojas et al. 2011). Este problema viene creciendo exponencialmente, no sólo en cantidad de los residuos generados sino en diversidad, fundamentalmente desde la revolución industrial de finales del s. XVIII y a medida que progresa el nivel de desarrollo social, económico y tecnológico (Katz, Baum 2011), suponiendo para las administraciones un verdadero problema de gestión, ya que además de afectar considerablemente al deterioro del medio ambiente, su vertido resulta difícil y costoso (Sani, Moriconi et al. 2005).

A nivel mundial, de todos los tipos de residuos que se producen, los que más volumen ocupan, en torno a un 35% (Llatas 2011), y menor control ambiental se ha desarrollado sobre ellos han sido los residuos de construcción y demolición (RCD). Éstos, que proceden en su mayoría del derribo de edificios e infraestructuras de obras existentes o del rechazo de materiales de construcción en las obras de nueva planta y son conocidos comúnmente como escombros, no revisten ningún tipo de peligrosidad, por lo que son considerados como inertes o asimilables a inertes, según la Decisión del Consejo 2003/33/EC (Decisión del Consejo 2003/33/EC de 19 de diciembre de 2002 2003). No obstante, tradicionalmente, han sido vertidos incontroladamente generando altos impactos medioambientales, no sólo desde el punto de vista del deterioro paisajístico que visualmente se produce sobre los terrenos que constituyen una morfología natural, como en aquellos resultantes de la extracción de materias primas, así como del derivado de los problemas de contaminación ambiental en los suelos y acuíferos, por la lixiviación de determinadas sustancias que puedan contener. Collins y Atkinson (Collins, Atkinson 1994) llegan a incluir dentro del catálogo de impactos medioambientales aquellos elementos que puedan verse afectados por el flujo de los residuos, considerando desde la población o los recursos naturales: flora, fauna, suelo, agua; hasta el clima, la arquitectura, la herencia arqueológica, el paisaje y la infraestructura de transportes.

En las últimas décadas, y debido a la notable mejora del nivel de vida, se ha producido un rápido desarrollo del sector de la construcción que ha fomentado dramáticamente el crecimiento de la generación de residuos de construcción y demolición producido por la demolición de viejas estructuras y la reconstrucción de edificios, así como de los procedentes de la industria de los productos de construcción (Mas, Cladera et al. 2011). En la misma medida, las reservas de materias primas tradicionales destinadas al sector de la construcción comienzan a agotarse con rapidez (Sim, Park 2011). No obstante, las actividades de extracción y uso de árido natural generan una serie de impactos ambientales nada despreciables, que la Agencia Europea de Medioambiente pretende minimizar aplicando una política prioritaria de tasas y gravámenes, que fomente el empleo del árido reciclado, como sustituto del natural en aquellas aplicaciones que sean viables (EEA Report nº2/2008 2008).

En consecuencia, desde el punto de vista de los residuos en general, y de los de construcción y demolición en particular, es obligatorio que el conjunto de la sociedad y los sectores productivos y económicos que los provocan, se planteen establecer una profunda reorientación en las pautas de producción y consumo, encaminadas a disminuir los efectos negativos planteados. En este sentido, y desde el punto de vista de la preservación medioambiental y el desarrollo sostenible, es prudente que en el entorno del sector de la construcción se promueva la investigación a cerca de otros recursos para obtener materias primas que contribuyan a reducir el consumo energético y el gasto de recursos naturales disponibles (Tam, Tam 2006) y a cerrar el ciclo de vida del material (González-Fontboa, Martínez-Abella 2008) al producir productos estratégicos que se han llegado a denominar como “*productos verdes*” (Rahal 2007, Senthamarai, Manoharan et al. 2011, Tabsh, Abdelfatah 2009).

El reciclaje de los residuos de construcción y demolición que se generan en el proceso constructivo y la consecuente utilización de los productos reciclados, se presenta como una de las oportunidades (Kou, Poon et al. 2011, Miranda, Selmo 2006) para que el sector de la construcción dé el giro necesario hacia la adopción de decisiones encaminadas hacia la sostenibilidad (Solís-Guzmán, Marrero et al. 2009). Aún no hay conciencia de que la producción de estos residuos es un recurso económico potencial que hay que tener en cuenta desde la fase de diseño de la obra o infraestructura que durante su construcción y demolición generará dichos residuos.

Con la introducción de la legislación en materia de residuos en forma de Leyes y Directivas, en muchos países se ha dado un paso significativo para que el desarrollo sostenible en el caso de los residuos de construcción y demolición se convierta en un requerimiento legal (Limbachiya, Marrocchino et al. 2007). En el territorio español, su gestión deben estar enmarcada en los principios básicos establecidos tanto en la Ley 22/2011, de residuos y suelos contaminados (Jefatura del Estado 2011) que transpone a la Directiva Comunitaria 98/2008/CE sobre residuos (Directiva 2008/98/CE 2008), como en el Real Decreto 105/2008 por el que se regula la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición (Ministerio de la Presidencia 2008). En este sentido, las distintas Administraciones han promovido la implementación de planes de gestión de este tipo de residuos, apoyados fundamentalmente en la creación de una red de instalaciones, públicas y privadas, en los que se prima la minimización, reciclaje y valorización, frente a su eliminación en vertedero.

En la actualidad, la tecnología del reciclaje de los residuos de la construcción y demolición se encuentra desarrollada e implantada prácticamente todos los países que, en mayor o menor medida, se han esforzado en introducir la regulación específica y las medidas políticas necesarias para asegurar el uso de árido reciclado en los trabajos de edificación e ingeniería civil (Kou, Poon et al. 2011). Los que han avanzado más en este sentido son sobre todo los países del norte de Europa, Japón, Hong Kong (Poon, Chan 2006) y Australia, donde la escasez de recursos naturales destinados a ser materias primas empleadas en la fabricación de productos de construcción ha propiciado la aplicación de políticas que elevan el

coste de vertido de residuos, haciendo competitivo en precio al árido reciclado (Collins 2003). Esta política de tasas, unida a una alta concienciación medioambiental, tanto en materia de agotamiento de recursos como de vertido, de emisiones a la atmósfera, ahorro energético y de gestión de residuos (Richardson, Allain et al. 2010) , ha conseguido que se alcancen cifras de reciclado de entre el 80 y el 100%. Sin embargo en nuestro país, a excepción de casos puntuales en comunidades autónomas como Madrid, Cataluña o el País Vasco, las actuaciones encaminadas al desarrollo tecnológico y medioambiental del reciclaje de residuos de construcción y demolición no han dejado de ser más que una mera implantación de plantas destinadas a la valorización de los RCD, con motivos más o menos estratégicos, pero con escasa implementación del árido reciclado en el mercado general de los áridos.

Si bien es cierto que el árido reciclado procedente de residuos de construcción y demolición es un material que ofrece menores prestaciones mecánicas y durabilidad que el natural (Sánchez de Juan, Alaejos Gutiérrez 2005), no existe ningún estudio que revele que sea inadecuado en la práctica para ser utilizado en la ejecución de obras, sino que por el contrario ponen de manifiesto los potenciales beneficios de la utilización de este producto en la construcción de edificios e infraestructuras (Li 2009, Limbachiya, Marrocchino et al. 2007, Oikonomou 2005, Eguchi, Teranishi et al. 2007, Evangelista, de Brito 2007, Etxeberria, Vázquez et al. 2007, Poon, Chan 2007, Sagoe-Crentsil, Brown et al. 2001, Poon, Shui et al. 2004).

En este sentido, numerosos estudios han puesto de manifiesto la posible aplicación de los RCD en diferentes usos, entre ellos la construcción de carreteras (Poon y Chan, 2006; Chini et al., 2001; Park, 2003; (Poon, Chan 2007, Rao, Jha et al. 2007), como material de drenaje (Chini et al., 2001; Tu et al., 2006; Pappu et al, 2007), en la fabricación de hormigón estructural (Rahal 2007, Gómez Soberón, Vázquez Ramonich et al. 2001, GEHO-CEB. Grupo Español del Hormigón 1997, Etxeberria, Vázquez et al. 2007, Sánchez de Juan, Gutiérrez Alaejos 2009) y no estructural (Soutsos, Tang et al. 2011, Soutsos, Tang et al. 2011, Gencel, Ozel et al. 2012, de Brito, Pereira et al. 2005). Aunque la mayoría coinciden en poner de manifiesto los problemas técnicos que presenta el árido reciclado, como el mortero adherido, las impurezas, los contaminantes, la debilidad de la zona de transición pasta-árido, la porosidad y fisuración interna, el alto contenido en cloruros y sulfatos, el exceso de cemento, la deficiente granulometría y la variabilidad en su calidad, que tienen efectos negativos en la calidad del mismo, afectando consecuentemente a la calidad final del producto, lo que dificulta su utilización en aplicaciones estructurales (Poon, Chan 2007, Tam, Le 2007, Tam, Tam et al. 2007).

El nivel de exigencia que debe de cumplir el árido reciclado para todas las aplicaciones descritas es consecuentemente alto. En este sentido los límites impuestos al uso de los áridos reciclados suponen un importante condicionante para las posibles aplicaciones, reduciéndose, en muchas ocasiones, las posibilidades de valorización y reciclaje de árido a un coste de producción competitivo con el árido natural. De todas las aplicaciones posibles para este tipo

de materiales reciclados, la más restrictiva se encuentra en su utilización en la elaboración de hormigón estructural (Sánchez de Juan, Alaejos Gutiérrez 2005) , ya que incide negativamente en las propiedades del hormigón que se fabrique con el mismo, afectando considerablemente a su comportamiento elástico, proceso de fraguado, trabajabilidad, durabilidad o resistencia, llegando incluso a acelerar su proceso de degradación (Etxeberria, Vázquez et al. 2007, Rahal 2007, Tu, Chen et al. 2006).

Son por tanto en las aplicaciones de mayor grado de responsabilidad donde se necesita aún que el sector del reciclado de RCD se posicione estratégicamente avanzando en tres direcciones: (i) la incorporación de mejoras tecnológicas en las instalaciones donde se realizan las operaciones de reciclado, (ii) el aumento de la inversión en I+D+i, que permita la mejora sustancial de la calidad de los productos obtenidos, y (iii) el desarrollo de una campaña de marketing que permita un mayor conocimiento de las ventajas reales del uso de estos materiales (Soutsos, Tang et al. 2011).

En general, la aceptación de los materiales reciclados en las obras de construcción se ha visto obstaculizada principalmente debido a la pobre imagen que está asociada a la actividad del reciclaje (Rahal 2007), en la que la red de instalaciones dedicadas al mismo presenta aún grandes deficiencias tecnológicas, existiendo además un alto desconocimiento de las posibilidades que ofrecen los productos reciclados. Todo ello auspiciado por el escaso apoyo de la normativa técnica, que se desarrolla a un ritmo muy lento y, sobre todo, por una aún deficiente política gubernamental que fomenten el uso de material reciclado. Consecuentemente, en la tarea de poner en valor este tipo de materiales las empresas recicladoras, las administraciones y organismos de normalización deben trabajar conjuntamente. Las primeras, mejorando la calidad de los productos ofertados, a través del fomento de los aspectos internos relativos a la formación profesional de sus empleados y a la innovación y mejora tecnológica, implicando a los demás entes en el desarrollo de una eficiente regulación de los productos reciclados y su adecuación a las demandas de mercado (Tam 2008).

A pesar de la existencia de numerosos estudios, es necesario seguir abundando en el estudio de las propiedades físico-mecánicas y la durabilidad del árido reciclado para poder establecer cuáles son los usos más apropiados en función del tipo de árido y características que presentan (Rahal 2007). El árido reciclado constituye una alternativa al árido natural (Limbachiya, Marrocchino et al. 2007), pero probablemente no hay que ser tan ambiciosos y pretender que sustituya al natural en aplicaciones estructurales. Estos materiales granulares pueden tener un mercado potencial en usos de menor grado de responsabilidad que el estructural, en los que los aspectos negativos que presentan estos áridos no estén prescritos, o al menos no sean tan limitantes.

En este sentido se ha dirigido el trabajo realizado en la presente Memoria de Tesis Doctoral, en la que se han caracterizado los diferentes materiales granulares procedentes de residuos de construcción y demolición tanto para las distintas aplicaciones contempladas en el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares

para Obras de Carreteras y Puentes PG-3 (PG-3 1975) así como en la Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08 (EHE-08 2008), eligiéndose en última instancia el estudio de la viabilidad del árido reciclado en la elaboración de prefabricados de hormigón no estructural.

Aun siendo conscientes de que es necesario apostar por la investigación y el desarrollo de proyectos que mejoren la calidad del árido reciclado (Tam, Tam et al. 2007) , para demostrar que es competitivo con el de nueva extracción, se ha escogido una aplicación en la ejecución de elementos prefabricados que no tienen ningún tipo de misión estructural, para intentar poner de manifiesto que las limitaciones técnicas que actualmente se les demandan a este tipo de productos granulares son demasiado exigentes y se pueden y deben ampliar los límites impuestos (Tam 2009), para transmitir y canalizar adecuadamente los resultados obtenidos (Soutsos, Tang et al. 2011) y, finalmente, intentar proporcionarles a estos materiales reciclados un nuevo valor añadido que contribuya a la sostenibilidad ambiental en el sector de la construcción (Llatas 2011, Katz, Baum 2011, Tam, Tam 2006, Tam 2008, Tam, Tam et al. 2010, Agrela, Barbudo et al. 2012).

Durante el desarrollo de los trabajos experimentales hemos contado con la inestimable colaboración de tres empresas granadinas: ECOINERTES S.L., que ha aportado todo el árido reciclado necesario, tanto para su caracterización como para la fabricación de las piezas prefabricadas, el Grupo PÉREZ LÁZARO que proporcionó los materiales y dosificaciones tipo inicialmente; y finalmente FORJADOS TRIUNFO, fue la empresa encargada de la manufactura en sus instalaciones de cuantas piezas prefabricadas han sido necesarias.

Finalmente, el trabajo de investigación objeto de la presente Memoria de tesis Doctoral se presenta como una oportunidad para que el sector de los prefabricados no estructurales se convierta en una industria estratégica desde el punto de vista del desarrollo económico, social y medioambientalmente sostenible. Consideramos que la actividad sería lo suficientemente innovadora como para contribuir a la sostenibilidad de las empresas del sector, en las que se produciría un estímulo de la productividad y la competitividad, así como una disminución de los aspectos medioambientales negativos asociados a la explotación de canteras y los depósitos indiscriminados de residuos en vertederos.

2. OBJETIVOS

El objetivo principal de esta Tesis Doctoral es la ejecución de piezas prefabricadas de hormigón no estructural realizadas con árido reciclado.

Para la consecución de este objetivo principal se han establecido y desarrollado los siguientes objetivos secundarios, con las correspondientes tareas a realizar:

1. Estudio de la situación legal y socioeconómica en la que se encuentran enmarcados los residuos de construcción y demolición que se utilizan para la elaboración de árido reciclado.

Tarea 1.1. Conocimiento de los datos de producción de los residuos de construcción y demolición generados.

Tarea 1.2. Conocimiento del marco legal en el que se encuentran definidos y regulados los residuos de construcción y demolición.

2. Estudio de las posibilidades de utilización de los áridos reciclados.

Tarea 2.1. Conocimiento de la normativa técnica referente a los áridos reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición.

Tarea 2.2. Conocimiento de las posibles aplicaciones de los áridos reciclados

Tarea 2.3. Estudio de la viabilidad técnica de las posibles aplicaciones de los áridos reciclados.

Tarea 2.4. Clasificación de los áridos reciclados en base a su composición.

Tarea 2.4. Caracterización del árido reciclado.

3. Estudio del comportamiento de los productos prefabricados elaborados con árido reciclado.

Tarea 3.1. Elección de la aplicación.

Tarea 3.2. Elección del tipo de piezas a fabricar.

Tarea 3.3. Estudio de dosificación de los componentes del hormigón no estructural.

Tarea 3.4. Estudio de la viabilidad de fabricación y uso de las piezas fabricadas.

Tarea 3.5. Estudio de la viabilidad económica y medioambiental de las piezas prefabricadas.

3. METODOLOGÍA

La presente Tesis Doctoral, conducente al estudio de la viabilidad de fabricación y uso de piezas prefabricadas de hormigón no estructural, se ha estructurado en los siguientes capítulos:

Capítulo 1. Introducción y planteamiento del problema.

Capítulo 2. Objetivos.

Capítulo 3. Metodología.

Capítulo 4. Antecedentes.

Capítulo 5. Materiales y métodos.

Capítulo 6. Resultados y discusión.

Capítulo 7. Publicaciones en las que se incluyen parte de los resultados de la Tesis Doctoral.

Capítulo 8. Conclusiones y futuras líneas de investigación.

La metodología seguida en la elaboración de la presente Memoria de Tesis Doctoral para la consecución de los objetivos planteados, se desarrolla a continuación. Para ello se han propuesto una serie de etapas con sus correspondientes fases y las tareas propias de cada una de ellas.

3.1. Etapa 1. Estudio bibliográfico

El estudio bibliográfico realizado se ha llevado a cabo fundamentalmente en base a la obtención de los datos técnicos y a la regulación específica concerniente a los áridos reciclados y sus aplicaciones.

Para la obtención de los datos técnicos se han consultado un amplio abanico de trabajos experimentales relacionados con el tema, recopilados tanto de las bases de datos Science Direct y Scopus, para los artículos científicos y las actas de congresos y conferencias científicas, como de la base de datos Teseo, para las Tesis Doctorales. Así mismo se ha obtenido una extensa información bibliográfica de lo consultado en libros nacionales e internacionales.

La búsqueda bibliográfica desde el punto de vista técnico, se inició en un primer momento con las posibilidades de uso del árido reciclado, pasando posteriormente a un estudio más exhaustivo de las características físicas, mecánicas y químicas de los áridos reciclados, así como del comportamiento específico de los elementos y aplicaciones encontradas.

La normativa legal se ha consultado directamente a través de los buscadores de internet, el portal de derecho de la Unión Europea EUR-Lex y los sitios web del Ministerio y las Consejerías de medio ambiente españolas.

No así la regulación técnica, que ante la imposibilidad de obtener los datos directamente de la normativa, que ha de adquirirse directamente de los organismos que la promulgan, se han conseguido a través la interpretación que se

hace de los trabajos experimentales de los distintos autores consultados. En el caso de la normativa técnica española se ha podido consultar la base de datos de AENOR, a la que se encuentra suscrita la Universidad de Granada. De la comparación de los datos normativos que se han dispuesto, se ha encontrado una cierta dispersión en los resultados obtenidos en cuanto a las limitaciones establecidas por la normativa, que en muy pocos casos diferencia los posibles usos a los que van a destinarse los áridos reciclados.

Además se ha tenido acceso a los datos estadísticos que periódicamente proporciona la Comisión Europea de Estadística Eurostat, en cuanto a la producción y tratamiento de los residuos en el entorno de la Unión Europea.

La profunda revisión bibliográfica realizada puso de manifiesto una serie de aspectos esenciales para la determinación del objetivo principal de esta Tesis Doctoral, que se citan a continuación.

- La problemática que conlleva la alta producción de este tipo de residuos y la deficiente gestión de los mismos, que necesitan del establecimiento y puesta en práctica de soluciones definitivas encaminadas, por un lado, a minimizar la producción y, por otro, a conseguir las mayores tasas de recuperación y reciclaje.
- La prolija actuación en materia de regulación de residuos, en general, y de los de construcción y demolición, en particular, que desde la década de los años 70 se está llevando a cabo tanto en la Unión Europea, como a nivel de la Administración del Estado, de las Autonomías y la de los Entes Provinciales y Locales.
- Las numerosas regulaciones técnicas que en materia de áridos reciclados se han publicado a nivel internacional, lo que viene a corroborar la preocupación, no sólo de las Administraciones de los Estados, sino de organismos privados, que desarrollan y actualizan periódicamente lo regulado al respecto.
- La falta de armonización en la normativa técnica en cuanto a la concreción en la definición de los tipos de áridos reciclados, por una parte y, por la otra, en cuanto a las prescripciones que se le exigen y las limitaciones impuestas. En este sentido, resulta llamativo que no se encuentren muchos estudios normativos que diferencien estos parámetros en función de las aplicaciones concretas, lo que permitiría adecuar las limitaciones a los usos prescritos según el nivel de responsabilidad exigido.
- La amplia dispersión en los resultados arrojados por los estudios experimentales realizados sobre los áridos reciclados, lo que se atribuye directamente a los diferentes tipos y calidades que presentan los mismos, por lo que uno de las prioridades en esta investigación ha sido establecer la clasificación de los áridos reciclados en base a su composición.
- Prácticamente todos los usos establecidos para el árido natural se han testado para los áridos reciclados, aunque con diferentes nivel de aceptación debido al variado comportamiento que exhiben.

- La mayoría de los estudios publicados tenían como objetivo la utilización de estos productos granulares en la elaboración de hormigón con fines estructurales.
- La situación socioeconómica que viene aconteciendo, en la que no hay y por muchos años no se prevé crecimiento en el sector de la construcción, es propicia para dedicar esfuerzos al desarrollo de modelos sostenibles de cara a la producción y utilización de productos reciclados que se puedan emplear en las futuras construcciones.

Como resultado del estudio bibliográfico realizado se ha desarrollado el capítulo 4 de la presente Memoria de Tesis Doctoral en el que se intenta poner de manifiesto el estado en el que se encuentra la normativa legal de los residuos de construcción y demolición, la regulación técnica a cerca de los áridos reciclados procedentes de RCD y, los estudios publicados sobre el árido reciclado y sus aplicaciones, con especial incidencia en la elaboración de hormigón.

La bibliografía consultada se referencia en el apartado bibliográfico correspondiente siguiendo el estilo HARVARD- Anglia 2008.

3.2. Etapa 2. Establecimiento de los objetivos

El establecimiento del objetivo principal de este trabajo de investigación: la utilización de árido reciclado procedente de residuos de construcción y demolición, surge tras la profunda revisión bibliográfica llevada a cabo previamente, en la que quedan patente las debilidades técnicas de los áridos reciclados procedentes del tratamiento de los residuos de construcción y demolición, que básicamente los han conducido hacia aplicaciones estructurales en la que se utilizan parcialmente en sustitución de los materiales naturales, incluso excluyendo a la llamada fracción fina, cuyo tamaño es inferior a 4mm.

Ante la dispersión encontrada en los resultados consultados y el nivel de exigencia requerido al árido reciclado, que en raras ocasiones cumple, se decide abarcar el estudio de viabilidad de estos materiales granulares en aplicaciones menos ambiciosas desde el punto de vista de su comportamiento estructural, como serían los elementos prefabricados no estructurales.

Los objetivos fijados en esta etapa han quedado plasmados en el capítulo 2 del presente documento de Tesis Doctoral.

3.3. Etapa 3. Trabajo experimental

El trabajo experimental se ha llevado a cabo en las tres fases principales siguientes, que han quedado expuestas en el capítulo 5 del documento de Tesis Doctoral.

Fase 1. Caracterización del árido reciclado

La primera fase de trabajo se realiza durante un periodo de dos años, en el que se efectúan 15 tomas de muestras de los diferentes materiales granulares que se producen en la planta de reciclaje de la empresa ECOINERTES: árido reciclado obtenido del procesamiento de residuos de construcción y demolición procedentes de hormigón, de escombros y tierras de excavación. Para la caracterización de los tres tipos de materiales se realizaron una serie de ensayos físicos, mecánicos y químicos al objeto de establecer su posibilidad de uso como árido para hormigón, según la Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08, así como para los posibles usos en obras de carreteras, según el Pliego General de obras de Carreteras PG-3.

En esta fase se puso de manifiesto el variable comportamiento observado en los estudios sobre árido reciclado consultados anteriormente, e incluso, debido al incumplimiento de las prescripciones establecidas por parte de las muestras denominadas tierras de excavación, se tomó la decisión de eliminarlas del protocolo establecido en las siguientes fases de trabajo.

Fase 2. Elaboración de morteros

A la vista de los resultados arrojados durante la caracterización de los materiales granulares reciclados y a falta de una regulación técnica armonizada que permita establecer las limitaciones impuestas a las prescripciones de los áridos reciclados en función del tipo de árido y aplicación, se tomó la decisión de confeccionar piezas prefabricadas de hormigón no estructural, con diferentes porcentajes de sustitución de los áridos tradicionales por los áridos reciclados obtenidos a través de la trituración de residuos de construcción y demolición, tanto de la trituración de hormigón como de escombros, que se habían caracterizado en la fase anterior.

La mayoría de los estudios consultados pretenden el uso de estos materiales en aplicaciones de alto o medio nivel de responsabilidad, a pesar de que en la mayoría de las ocasiones el árido reciclado incumple los parámetros esenciales de calidad. En general, en España debido a los bajos costes de gestión de los residuos de construcción y demolición, así como al de venta del árido natural, las plantas de reciclaje no suelen emplear métodos intensivos en la elaboración del árido reciclado que permitan obtener un producto de mejor calidad.

Por lo que definitivamente, y avalada por la escasa bibliografía encontrada al respecto, se decidió encaminar la investigación hacia la fabricación de piezas de hormigón prefabricado no estructural, fundamentalmente piezas elaboradas mediante la técnica de presión-vibración, como resultan los bloques, bovedillas, bordillos y adoquines.

Durante esta fase, partiendo de la dosificación patrón proporcionada por la empresa de prefabricados, se prestó especial atención en la obtención de las cantidades necesarias a dosificar de árido reciclado en sustitución del natural, al objeto de conseguir morteros de resistencia y compacidad similares al mortero patrón, simulando en el laboratorio la técnica empleada en fábrica.

Fase 3. Ejecución de piezas prefabricadas de hormigón no estructural

Esta última fase experimental fue la más complicada de todas, más que por su elaboración, porque la empresa que inicialmente iba a fabricar las piezas, el GRUPO PÉREZ LÁZARO, azotada por la crisis económica, se vio obligada a vender los equipos de las plantas de prefabricación. La búsqueda de una nueva empresa a la que convencer del proyecto se convirtió en un penoso vagar, ya que las pocas que mantenían la maquinaria en sus instalaciones llevaban meses sin ponerla en marcha. Finalmente, FORJADOS TRIUNFO escuchó nuestro proyecto y, pese al escaso volumen de trabajo y la disponibilidad de personal, se ilusionaron con el proyecto y, con los mínimos recursos que disponían, comenzamos a trabajar. En consecuencia, la elección del tipo de piezas a fabricar vino condicionada más por los escasos recursos que podía ofrecer la empresa de prefabricados que por las necesidades planteadas a estas alturas de la investigación.

Del propósito inicial de fabricar cuatro tipos de piezas diferentes: bovedilla, bloque, bordillo y adoquín, con diferentes porcentajes de sustitución de los áridos grueso y fino, sólo se pudieron fabricar bloques y bovedillas, con sustitución total del conjunto del árido. Además, de cara a determinar la variación en su comportamiento, con respecto a las piezas patrón y a las elaboradas con sustitución total, se elaboraron también piezas con sustituciones parciales del 50%.

3.4. Etapa 4. Interpretación de los resultados

En el capítulo 6 de la presente Memoria de Tesis Doctoral se presentan los resultados del estudio experimental desarrollado en el capítulo anterior y la correspondiente discusión de los mismos.

En el capítulo 7 se han incluido tres publicaciones que avalan el estudio experimental desarrollado durante la fase de caracterización de los áridos reciclados para las posibles aplicaciones en la elaboración de hormigón estructural, según la Instrucción EHE-08 (EHE-08 2008), así como en la ejecución de obras de carreteras, según el correspondiente Pliego PG-3 (PG-3 1975).

Ante los resultados obtenidos se puso de manifiesto que la viabilidad de las piezas prefabricadas elegidas era absoluta. Técnicamente, y a pesar de necesitar ciertos ajustes en las dosificaciones, que se realizarán oportunamente en un futuro, esperamos que no muy lejano, se ha comprobado que los estudios experimentales llevados a cabo han arrojado resultados muy positivos en el comportamiento de las bovedillas y bloques fabricados. Resulta por tanto oportuno emprender un estudio de la viabilidad económica y medioambiental, al objeto de poner de manifiesto la total viabilidad de estos productos prefabricados.

3.5. Etapa 5. Conclusiones y futuras líneas de investigación

En el capítulo 8 se desarrollan las conclusiones a las que se han llegado durante el desarrollo de los trabajos conducentes a la elaboración de la presente Memoria de Tesis Doctoral.

Así mismo, en este capítulo se plantean las futuras líneas de investigación en las que se pretende seguir trabajando en el marco de los residuos de construcción y demolición, sus aplicaciones y el estudio del ciclo de vida, tanto de los productos desarrollados como de los planteados en las nuevas líneas de trabajo propuestas.

4. ANTECEDENTES

4.1. Los residuos de construcción y demolición

4.1.1. Definición de residuo de construcción y demolición

El residuo de construcción y demolición, comúnmente conocido como escombros, se define por primera vez en la legislación española 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 10/1998”, hoy derogada por la Ley 22/2011, que “se genere en una obra de construcción o demolición”*. En esta definición no se incluyen:

- *“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;*
- *los residuos de industrias extractivas regulados por la Directiva 2006/21/CE, de 15 de marzo; y*
- *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”*.

Previamente la Directiva 75/442/CEE del Consejo, de 15 de julio de 1975, relativa a los residuos (Directiva del Consejo 75/442/CEE 1975), definía residuo como *“cualquier sustancia u objeto perteneciente a una de las categorías que se recogen en el Anexo I y del cual su poseedor se desprenda o del que tenga la intención o la obligación de desprenderse”*. En su anexo I, se entiende que categorizaba a los RCD como Q16, en los que se incluían *“todos los residuos que no se podían incluir específicamente en cualquiera de las 15 categorías anteriores”*.

No obstante el término presenta una serie de matices necesarios de concretar. Así lo hace el II Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición 2007-15 (II PNRCD) (Ministerio de Medioambiente y Medio Rural y Marino 2008), en total consonancia con el Real Decreto y como herramienta articuladora de la aplicación de éste. Por un lado, si bien contempla como *“obra de construcción y demolición cualquier obra de construcción, reparación o demolición de un bien inmueble de edificación o de ingeniería civil, incluyendo los trabajos que modifiquen la forma o sustancia del suelo”*, desde el punto de vista conceptual la definición de residuo de construcción y demolición abarca: *“cualquier residuo que se genere en una obra de construcción y demolición, con excepción de:*

- *Las tierras y piedras no contaminadas por sustancias peligrosas,*

- *los residuos que se generen en obras de construcción y/o demolición regulados por una legislación específica, cuando no estén mezclados con otros residuos de construcción y demolición (residuos de aceites industriales usados, residuos peligrosos en general, residuos de envases, neumáticos fuera de uso, pilas y baterías o residuos de aparatos eléctricos y electrónicos), y*
- *los residuos regulados por la Directiva 2006/21/CE, del Parlamento Europeo y del Consejo, de 15 de marzo, sobre la gestión de los residuos de industrias extractivas”.*

En este sentido, y concretando, los RCD serían los residuos que aparecen codificados en la Lista Europea de Residuos, aprobada por Orden MAM/304/2002 (Orden MAM/304/2002 2002), básicamente, en el capítulo 17 (Residuos de la construcción y demolición), coincidentes con las actividades agrupadas en la Sección F de la Clasificación Nacional de Actividades Económicas (CNAE-93) bajo el epígrafe de “Construcción”, y que corresponderían a las siguientes familias:

- 17 01 Hormigón, ladrillos, tejas y materiales cerámicos
- 17 02 Madera, vidrio y plástico
- 17 03 Mezclas bituminosas, alquitrán de hulla y otros productos alquitranados
- 17 04 Metales (incluidas sus aleaciones)
- 17 05 Tierra (incluida la excavada de zonas contaminadas), piedras y lodos de drenaje
- 17 06 Materiales de aislamiento y materiales de construcción que contienen amianto
- 17 08 Materiales de construcción a partir de yeso
- 17 09 Otros residuos de construcción y demolición

Además hay que destacar, que aun presentando características muy similares, a efectos del Plan, no se pueden considerar RCD a los residuos generados por la industria de los productos de construcción, que serían objeto del Plan Nacional de Residuos Industriales No Peligrosos del Plan Nacional Integrado de Residuos para el periodo 2008-2015 (Resolución de 20 de enero de 2009 2009). Aunque sí se considerarían como RCD los residuos producidos en las instalaciones de prefabricación y montaje de elementos constructivos que se montan a pie de obra y den servicio exclusivamente a la misma.

Finalmente, dentro de esta valoración del concepto de residuo de construcción y demolición ha de tenerse en cuenta que los residuos peligrosos que se generen en las obras de construcción y demolición se regirán por el régimen general de dichos residuos, constituido por la ley 22/2011 (Jefatura del Estado 2011) y el Real Decreto 952/1997 (Real Decreto 952/1997 1997).

Hasta el momento de la incorporación del Real decreto a la jurisprudencia española no se ha tenido disponible una acepción del concepto de RCD, ya que ni en la legislación de la Comunidad Europea, ni en la nacional, como transposición de ésta, se había regulado este tipo de residuos aisladamente. En este sentido, la

Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados (Jefatura del Estado 2011) sólo transmite la definición general de residuo, que emana desde la década de los 70 con la Directiva 75/442/CEE (Directiva del Consejo 75/442/CEE 1975), como: *“cualquier sustancia u objeto que su poseedor deseche o tenga la intención o la obligación de desechar”*, indicando y acordando al momento actual, que quedan fuera de la ley los residuos de diversa procedencia, entre los que, por su vinculación con las obras de construcción y demolición, se considerarían:

- *“Los suelos no contaminados excavados y otros materiales naturales excavados durante las actividades de construcción, cuando se tenga la certeza de que estos materiales se utilizarán con fines de construcción en su estado natural en el lugar u obra donde fueron extraídos”*.
- *“Los residuos resultantes de la prospección, de la extracción, del tratamiento o del almacenamiento de recursos minerales, así como de la explotación de canteras cubiertos por el Real Decreto 975/2009, de 12 de junio, sobre gestión de los residuos de industrias extractivas y de protección y rehabilitación del espacio afectado por actividades mineras”*.

En una apreciación final, que puede servir más que para enmarcar a los residuos de construcción y demolición para confundir, aparece un concepto muy vinculado a ellos, de reciente acuño en la legislación europea por la Directiva 2008/98/CE (Directiva 2008/98/CE 2008) y de transposición a la actual Ley nacional. Es el concepto de subproducto o *“sustancia u objeto, resultante de un proceso de producción, cuya finalidad primaria no sea la producción de esa sustancia u objeto”*. De manera que puede ser considerada como subproducto y no como residuo aquella sustancia u objeto que cumpla las siguientes condiciones:

- *“se tenga la seguridad de que la sustancia u objeto va a ser utilizado ulteriormente,*
- *se pueda utilizar directamente sin tener que someterse a una transformación ulterior distinta de la práctica industrial habitual,*
- *se produzca como parte integrante de un proceso de producción, y*
- *el uso ulterior cumpla todos los requisitos pertinentes relativos a los productos así como a la protección de la salud humana y del medio ambiente, sin que produzca impactos generales adversos para la salud humana o el medio ambiente”*.

4.1.2. La gestión de los residuos de construcción y demolición

Ante la problemática que vienen sufriendo las sociedades con la creciente generación de residuos, en general, y de los de construcción y demolición, en particular, la Comunidad Europea y los Estados Miembros, a través del marco legislativo desarrollado al efecto, han pretendido regular los procesos en materia de gestión de los mismos.

Ya en la primera Directiva marco europea sobre residuos, la 75/442/CEE (Directiva del Consejo 75/442/CEE 1975), se plantea la necesidad de controlar y

tratar adecuadamente los residuos generados en el entorno de la Comunidad Económica Europea, solicitándoles a los Estados Miembros la adopción de medidas concretas de actuación. En estos momentos se habla de los principios de “sostenibilidad”, “de quien contamina paga” y “de las 3 erres” (reducción, reciclaje y reutilización).

Esta Directiva considera al “*principio de jerarquía*” como el que divide el proceso de gestión de los residuos en cinco niveles, con un rango de actuación de mayor a menor en la siguiente escala: prevención, reciclado, reutilización, valorización y eliminación.

Aunque muchas veces el principio de jerarquía no es completamente aplicable en la gestión de residuos, pues han de aplicarse criterios respetuosos con el medio ambiente, además de social y económicamente favorable, desde la primera promulgación de una Directiva europea en materia de residuos comentada, la prevención es el nivel de actuación prioritario, estableciendo la necesidad de que los Estados Miembros desarrollen su propia regulación en materia de residuos y programen las actuaciones necesarias a través de los correspondientes planes de actuación.

Las actuaciones preventivas dentro de la política de gestión de residuos consisten en racionalizar los procesos para evitar, fundamentalmente, que se generen mediante la reutilización o el alargamiento de la vida útil de los productos y, particularmente, que contengan componentes peligrosos y originen impactos sobre el medio ambiente y la salud humana, incluyendo el ahorro en el uso de materiales o energía. Este nivel necesariamente hay que tenerlo en cuenta durante la fase de concepción y diseño, la fabricación, la distribución y el consumo de los productos que con el tiempo serán residuos. Aunque hasta hace muy poco no se ha reparado en ello, actualmente se disponen de las herramientas necesarias para su estudio. Con el análisis del ciclo de vida (ACV) se puede cuantificar los costes que se derivan del proceso de producción, la vida útil, la transformación en residuo e incluso la recuperación y/o reciclaje de cualquier producto. De esta manera, además del productor de los residuos, el propio fabricante se responsabiliza de la buena gestión de los residuos que se producirán con la utilización de sus productos.

El segundo y tercer nivel en la jerarquía de residuos se diferencian en la condición de residuo o producto de la que se parte y en uso final. Mientras que el reciclaje se practica sobre residuos, para la reutilización la condición necesaria es que sea un producto. En el primer caso la transformación de los residuos en productos puede tener como finalidad la misma o distinta utilización que el original, no así en la reutilización de un producto, que siempre se hace con la misma finalidad. Además, las operaciones de reutilización requieren siempre una preparación previa, que consistirá en la comprobación, limpieza o reparación de productos, que se han convertido en residuos, y que mediante esas operaciones previas vuelven a considerarse productos destinados a la reutilización. En todo caso, con ambas operaciones, siempre y cuando sean viables desde el punto de vista medioambiental, se contribuye notablemente a evitar la producción de residuos.

La valorización, es el nivel más favorable en la jerarquía de residuos, cuando no es posible la prevención, reutilización o reciclaje en el sentido anteriormente comentado. Existen dos opciones de valorización posibles, la valorización energética y la de materiales. Con la primera se consigue una producción energética a través del tratamiento térmico del residuo, mientras que la segunda es la que interesa desde el punto de vista de los RCD. Precisamente desde este punto de vista, la propia definición puede llevar a confusión, ya que, considerándose valorización, según la Ley 22/2011 (Jefatura del Estado 2011), como *“cualquier operación cuyo resultado principal sea que el residuo sirva a una finalidad útil al sustituir a otros materiales, que de otro modo se habrían utilizado para cumplir una función particular, o que el residuo sea preparado para cumplir esa función en la instalación o en la economía en general”*, y contemplándose entre las operaciones de valorización recogidas la operación R5 de la Ley el reciclado o recuperación de otras materias inorgánicas, tales como los materiales de construcción, se puede entender que las actuaciones encaminadas a reciclar y reutilizar anteriormente descritas, son en sí, operaciones de valorización.

Las operaciones de valorización de los residuos no sólo proporcionan múltiples beneficios en el escalafón de la jerarquía de gestión de los mismos, por proporcionarle una nueva utilidad, sino que además aporta como valor añadido el desarrollo de nuevas oportunidades de negocio e innovación, al proveer los mercados de materias primas y crear puestos de trabajo específicos (EEA Report nº 8/2011 2011). No obstante, los RCD son un flujo que, debido básicamente a su elevada densidad y su bajo valor económico, exige la disponibilidad de plantas de tratamiento no muy alejadas de la fuente de generación. Se pueden emplear plantas de transferencia para ahorrar costes de transporte, pero aun así, los RCD no soportan económicamente mucha manipulación ni traslados a grandes distancias, algo que, por otra parte, está contraindicado desde el punto de vista ambiental por el consumo de combustibles fósiles y emisiones asociadas de gases de efecto invernadero (Ministerio de Medioambiente y Medio Rural y Marino 2008).

Finalmente la eliminación, como nivel más bajo y por tanto menos deseado en la escala de gestión de los residuos, en sus dos vertientes, la eliminación sin recuperación energética y el vertido de residuos, es una actividad que, desafortunadamente, fomenta la normativa vigente. En materia de residuos de construcción y demolición, desde el punto de vista legal y por las propias características de algunos residuos que permiten calificarlos como peligrosos, no se permiten en la mayoría de las ocasiones operaciones de reutilización y reciclado. Por otra parte, la normativa técnica con especificaciones demasiado limitantes impide la posible reutilización de los productos reciclados. Por lo que el propio Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición vigente (Ministerio de Medioambiente y Medio Rural y Marino 2008), según se observa en la Tabla 1 y en la Tabla 2, contempla muy pocos residuos con posibilidad de ser valorizados para obtener productos destinados a aplicaciones concretas. Se puede observar cómo residuos que estén mezclados o contengan sustancias peligrosas, tales como yeso o productos bituminosos, no tienen alternativas de valorización y por tanto han de ser evacuados a vertedero autorizado. Ante todo lo expuesto, el

productor de residuos se ha visto tradicionalmente tentado a elegir este sistema de gestión frente a la reutilización y reciclaje, favorecido normalmente por el menor coste de vertido respecto de los costes de gestión.

En la aplicación del principio de jerarquía, los Estados tienen mucho que hacer en cuanto a la aplicación de políticas y la elaboración de planes de actuación, que garanticen el equilibrio más favorable entre los beneficios medioambientales, en contraposición con la repercusión social y económica. Actualmente las políticas preventivas en materia de residuos de construcción y demolición son las más fomentadas, favoreciéndose las destinadas a la recuperación de materiales y productos destinados a su reciclaje y reutilización. Por una parte, la aplicación de instrumentos económicos, en forma de tasas e impuestos, obliga a los productores de los residuos a un estudio riguroso de los procesos que repercuten considerablemente en la adopción de modelos eficaces de gestión. Por otro lado, el impulso en educación y formación, que desde edades tempranas se está intentando inculcar a la población, fomenta que se tome conciencia de la necesidad de modificar los modelos de consumo encaminados a minimizar la generación de residuos y a racionalizar la gestión de los que se produzcan.

Estas actuaciones caerían en saco roto si no se desarrolla una normativa técnica que, particularmente en el caso de los residuos de construcción y demolición, fomente el uso de los materiales reciclados en aplicaciones de menos responsabilidad que las tradicionales, sin detrimento del mantenimiento de las características propias que se le exigen al producto que se elabore con ellos.

En este sentido, el trabajo experimental desarrollado en la presente Tesis Doctoral pretende poner de manifiesto cómo los residuos de construcción y demolición que no presentan unos parámetros de alta calidad pueden ser utilizados en aplicaciones de media o baja responsabilidad técnica, intentando resolver el conflicto entre lo medioambientalmente sostenible y lo social y económicamente viable.

4.2. Los residuos de construcción y demolición y el medio ambiente

Uno de los grandes problemas a los que se enfrentan las sociedades actuales es la gran cantidad de residuos que se generan y, por ende, su forma de gestión, provocando fuertes impactos medioambientales. Esta problemática no es nueva, pero sí crece a medida que aumenta el nivel de renta de los ciudadanos, de manera que se podría decir que una forma de medir el nivel de desarrollo de una sociedad es a través de la cantidad y tipos de residuos que genera.

La adecuada gestión de los residuos, por tanto, es una de las actividades que viene preocupando a los gobiernos nacionales, regionales y locales, desde que en la década de los 70 se comenzara a actuar a nivel comunitario en materia de sostenibilidad medioambiental. Consecuentemente, las distintas administraciones se han preocupado de establecer las directrices y medidas necesarias para lograr una correcta gestión medioambiental de los residuos generados en su territorio.

Tabla 1. Alternativas probables de valorización de los residuos sin mezclar según el II PNRC D 2007-15

CÓDIGO LER	DESCRIPCIÓN RESIDUO	OPERACIÓN DE VALORIZACIÓN (CÓDIGO R)	PRODUCTOS O RESIDUOS OBTENIDOS	POSIBLES DESTINOS DE LOS MATERIALES OBTENIDOS
17 01 01	Hormigón	Planta de reciclado de RCD (R 5)	Zahorras, arenas, gravas	Bases y subbases de carreteras, drenajes, camas de asiento de tuberías y suelos seleccionados. Hormigón en masa y armado, morteros. Fabricación de cemento. Fabricación de otros productos de construcción
17 01 02	Ladrillos	Planta de reciclado de RCD (R 5)	Áridos ligeros	Hormigones ligeros sin finos, y morteros. Hormigón no ligero en masa y armado, si el ladrillo de origen es suficientemente denso. Fabricación de productos de construcción, si el ladrillo de origen es suficientemente denso. Camas de asiento de tuberías. Relleno en firmes de infraestructura deportiva, paisajismo y jardinería
17 01 03	Tejas y materiales cerámicos	Planta de reciclado de RCD (R 5)	Áridos ligeros	Hormigones ligeros sin finos, y morteros. Camas de asiento de tuberías. Relleno en firmes de infraestructura deportiva, paisajismo y jardinería

Fuente: II PNRC D 2007-15

Tabla 2. Alternativas probables de valorización de los residuos sin mezclar según el II PNRC D 2007-15

CÓDIGO LER	DESCRIPCIÓN RESIDUO	OPERACIÓN DE VALORIZACIÓN (CÓDIGO R)	PRODUCTOS O RESIDUOS OBTENIDOS	POSIBLES DESTINOS DE LOS MATERIALES OBTENIDOS
17 01 06	Mezclas, o fracciones, de los anteriores, que contengan sustancias peligrosas	Tratamiento físicoquímico (D 9) Vertedero (D 5)	En general, no se obtendrán productos utilizables, salvo que el tratamiento físico-químico transforme el residuo en no peligroso y pueda someterse a una operación de reciclado (R 5)	Vertedero
17 01 07	Mezclas distintas de las especificadas en el código 17 01 06	Planta de valorización (R 5) Utilización de los residuos tras tratamiento (R 11)	Áridos y materiales para obras (Dependiendo del cumplimiento de los requisitos técnicos y ambientales en la obra de destino, los materiales obtenidos pueden conservar la consideración de residuo, en cuyo caso la operación de destino sería una operación de reciclado - R 11)	Explanaciones, rellenos, sellado de vertederos. Hormigón para rellenos en masa, hormigón de limpieza

Fuente: II PNRC D 2007-15

4.2.1. Impactos medioambientales generados por los residuos de construcción y demolición

El sector de la construcción genera una serie de impactos ambientales de gran trascendencia sobre el medio que se pueden considerar agrupados en dos. Por un lado, los derivados del consumo de materias primas y, por otro, los imputables al tipo de residuos producidos. Es por ello que recientemente se ha introducido el concepto de ciclo de vida como uno de los principios rectores de la gestión de los residuos, donde los impactos medioambientales generados por los productos y servicios son considerados dentro del ciclo de vida de los mismos, al objeto de minimizar, en la medida de lo posible, la carga ambiental que producen.

Los problemas ambientales asociados a la extracción de recursos naturales y al procesamiento de materiales aumentan considerablemente, siendo objeto prioritario en la política ambiental de la Unión Europea (EEA Report n°2/2008 2008). El consumo de materias primas destinado a la elaboración de productos de construcción produce un rápido agotamiento de los recursos naturales no renovables (Olorunsogo, Padayachee 2002, Debieb, Courard et al. 2009) con el consiguiente cambio sustancial de la fisonomía de la corteza terrestre, que aunque en España no está considerado como un problema fundamental, en muchos países del entorno de la Unión Europea de menores dimensiones sí, estando suficientemente regulado y limitado por sus gobiernos. Se puede afirmar que el hándicap de la escasa utilización de árido reciclado en España se debe fundamentalmente a la abundancia de árido natural, disponible en el mercado a muy buen precio, que compite con mucha ventaja con un árido reciclado de peor calidad y sin normativa específica promulgada, al que se le aplica la propia del árido natural, con un nivel de exigencia que difícilmente va a poder alcanzar.

En relación a la producción de residuos, el sector de la construcción está considerado como una importante fuente de producción (Martín-Morales, Zamorano et al. 2011), cuyo destacado volumen genera un impacto visual al ser depositados en vertederos incontrolados que, tradicional e indiscriminadamente, han minado la periferia de pueblos y ciudades, sin que las autoridades competentes, y a pesar de la legislación vigente, tomasen cartas en el asunto. Este impacto genera un coste medioambiental que ha sido denominado por algunos autores como eco-coste (Corinaldesi, Giuggiolini et al. 2002) y, aunque difícil de cuantificar, es necesario tenerlo en cuenta.

En este sentido, el II Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición 2007-2015 (Ministerio de Medioambiente y Medio Rural y Marino 2008) reconoce que, según el estudio que el Instituto para la Sostenibilidad de los Recursos (ISR) elabora para el Ministerio de Medio Ambiente en diciembre de 2004, en torno a 10 millones de toneladas anuales de RCD de los 35 millones de toneladas que estimaba se generaban en esa fecha, se eliminaron en vertederos de residuos inertes adaptados a la normativa vigente, siendo más del 60% de los mismo eliminados de forma incontrolada en escombreras, agujeros o vaguadas. Aunque la tarifa media de admisión en vertedero de RCD puede considerarse en torno a 2-3 €/t, si bien es cierto que ésta para un mismo vertedero se aplican en función del

tipo, limpieza y características de escombros, se considera que dicha tarifa media no cubre, en la práctica, el coste total de la operación de vertido, tal y como obliga el Real Decreto 1481/2001 sobre vertederos (REAL DECRETO 1481/2001 2001). Esta tasa resulta ridícula en comparación con la que se aplica en otros Estados Miembros de la Unión Europea, como Holanda, que oscila entre 13.8 y 22.8 €/tn, Dinamarca, donde el vertido general de residuos se grava con 45.2 €/tn, o Alemania, con una propuesta de impuesto de 75 a 96.3 €/tn (IHOBE 2004).

Desde que se comienzan a aplicar las políticas medioambientales ha cobrado especial importancia el impacto ecológico generado por los residuos procedentes de la construcción y demolición de edificios e infraestructuras. Aunque la mayoría de ellos se consideran inertes, y por tanto no peligrosos, pueden venir en algunas ocasiones acompañados de diferentes productos de diversa peligrosidad. Durante el periodo de exposición a los agentes atmosféricos que experimentan en los vertederos incontrolados pueden sufrir fenómenos de lixiviación, que se traducen en una fuerte contaminación, tanto los suelos como los acuíferos naturales, que afectará al desarrollo, no sólo de la flora y la fauna, sino de la población y sus infraestructuras (Collins, Atkinson 1994). Para Engelsen et al. (Engelsen, van der Sloot et al. 2010) la caracterización por lixiviación es una de las maneras más adecuadas de evaluar las propiedades medioambientales que presentan los materiales de construcción, a partir de la que se puede obtener el nivel de reciclabilidad de los residuos de construcción y demolición.

El uso irracional de materias primas en lugar de la utilización de productos de similares características obtenidos de la recuperación y reciclaje de residuos genera, así mismo, un impacto medioambiental acusado por el aumento del consumo energético, con la consiguiente generación de CO₂ y otras emisiones (Corinaldesi, Moriconi 2009). En 2008, según el informe de 2011 sobre energía, transportes e indicadores medioambientales (Eurostat 2011 2011), los impactos derivados de la emisión de CO₂ en la industria de la construcción, junto a la manufacturera, alcanzaron casi la cuarta parte de los totales en la Europa de los 27.

Considerando todo lo anterior, y siendo los residuos de construcción y demolición más de la mitad de los residuos generados (Tam, Gao et al. 2009), resulta necesario que sean convenientemente seleccionados, tratados y gestionados en las obras donde se producen, de manera que su gestión contribuya decisivamente en el desarrollo general de la obra (Blengini, Garbarino 2010). Así mismo, deben ser tratados adecuadamente en las instalaciones creadas al efecto al objeto de producir una serie de productos reciclados que se pueden presentar como alternativa de utilización frente a determinadas materias primas naturales, minorando, consecuentemente y en última instancia, los impactos medioambientales referidos.

Collins y Atkinson, ya en 1994 (Collins, Atkinson 1994), apostaban por mejorar la eficiencia de utilización del árido natural, promoviendo políticas gubernamentales de conservación y protección que minimicen los impactos ambientales, a la vez que se desarrollen las especificaciones normativas precisas para la utilización de

áridos reciclados, con el nivel de exigencia necesario según cada aplicación. Para ello abundan en la mejora en la coordinación de suministros de material y su control de calidad (Collins 1997).

El mercado general de los productos pétreos es muy importante en términos económicos y medioambientales, suponiendo el producto más usado en el sector de la construcción (González-Fonteboa, Martínez-Abella 2007), por lo que se hace necesaria la inmediata toma de medidas para evitar irreparables daños futuros.

Los beneficios que se conseguirían con la incorporación de los productos de construcción obtenidos a partir de RCD en el mercado tradicional fueron evaluados por Tam y sus colegas en un estudio llevado a cabo en 2010 (Tam, Tam et al. 2010), donde se discute el nivel de implementación del RCD en Japón, Australia y Hong Kong, con encuestados de todos los estamentos intervinientes en el proceso del reciclaje. Los resultados arrojados de dicho estudio mostraron que las inquietudes de productores, gestores y consumidores de productos reciclados se resumían dentro de aspectos como el ahorro económico y medioambiental, y el aumento de la concienciación ambiental que contribuye a una mayor ventaja competitiva de las empresas que utilizan productos reciclados.

No en vano, también se observaron en dicho estudio las dificultades ante las que se enfrenta el sector de reciclaje de residuos de construcción y demolición, así como las recomendaciones necesarias para poder llevarlo a cabo. Entre las primeras destacarían el coste económico que supone fabricar productos reciclados, en cuanto a selección de los residuos, tasas de reciclaje y costes de gestión, para obtener productos de calidad inferior a los convencionales, con una irregular oferta y demanda de los mismos, un deficiente soporte tecnológico, un bajo apoyo gubernamental y una destacada falta de regulación en cuanto a requisitos y limitaciones. En relación a las recomendaciones argumentadas, en el estudio se solicitaba una mejor definición de los procesos de reciclaje al objeto de mejorar la clasificación de los productos obtenidos, además de conseguir fomentar la gestión a través de la formación con el apoyo financiero y gubernamental.

El uso del árido reciclado, por tanto, abre una gama de posibilidades en la reutilización de materiales en construcción (Fonseca, de Brito et al. 2011) y resulta beneficioso desde el punto de vista de la protección medioambiental y la conservación de recursos, reduciéndose así el agotamiento de recursos naturales, al darle un destino alternativo respetuoso con el medioambiente. Si bien es cierto que las actuales especificaciones técnicas y las experiencias llevadas a cabo en muchos países no son capaces de apoyar y fomentar totalmente el reciclado de residuos de construcción y demolición (Kou, Poon et al. 2011).

4.2.2. Datos estimativos de la producción de residuos de construcción y demolición

Más de la mitad de los residuos generados mundialmente son residuos de construcción y demolición (Tam, Gao et al. 2009). Este tipo de residuos, al estar compuestos principalmente por hormigón, material cerámico, metales, madera,

yeso, vidrio, terrenos de excavación, en distintas proporciones, y otras sustancias minoritarias (Tam, Le 2007), resultan residuos con unas altas posibilidades de recuperación y reutilización en aplicaciones propias al ámbito del que se produjeron.

La producción de este tipo de residuos es un recurso económico potencial que debe tenerse en cuenta desde la fase de diseño de la obra o infraestructura, en cuya construcción y demolición se generarán dichos residuos. Este es, precisamente, uno de los problemas principales que se presentan en la gestión de los residuos: la cantidad de residuos generados en una obra se estima globalmente en el proyecto, en base a los datos orientativos que propone el II Plan de Residuos de Construcción y Demolición (Ministerio de Medioambiente y Medio Rural y Marino 2008) o los estudios consultados al respecto (ITeC 2000), lo que va a repercutir, por un lado, en la falta de datos fiables existentes en cuanto a la generación de residuos y, por otro, en que no se puedan alcanzar los objetivos propuestos por las directrices nacionales y europeas (Llatas 2011).

Hasta hace pocos años no existían datos reales estadísticos de la producción y gestión de estos residuos, ya que ni productores ni gestores estaban obligados a facilitar datos al respecto, ni hasta 2008 se había definido el marco de referencia (Ministerio de la Presidencia 2008). Los planes de gestión nacional, autonómicos o locales se han basado básicamente en estimaciones, que van desde los 520-760 kg/habitante.año del Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición 2001-2006 (Ministerio de Medioambiente 2001), a los 790 kg/habitante.año del II Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición 2007-15 (según datos de 2005) (Ministerio de Medioambiente y Medio Rural y Marino 2008), o los 2.2-5 Kg/hab.día (803-1825 kg/habitante.año) del Plan Director Territorial de Gestión de Residuos no Peligrosos de Andalucía 2010-2019 (Decreto 397/2010 2010).

En este sentido, el II PNRC (Ministerio de Medioambiente y Medio Rural y Marino 2008) estima los datos de residuos que se producen en el territorio español en base a la interrelación de los índices proporcionados por el Instituto de Tecnología de la Construcción de Cataluña (ITeC) (ITeC 2000), los Colegios Oficiales de Arquitectos y las estadísticas del Ministerio de Fomento sobre Visados de Dirección de Obra en Edificación, en función de que el edificio sea de nueva construcción (120 kg/m² construido), de rehabilitación (338.7 kg/m² construido) o de demolición total (1129 kg/m² construido) o parcial (903.2 kg/m² construido).

Con la aprobación del Reglamento 2150/2002, del Parlamento Europeo y del Consejo, de 25 de noviembre de 2002, relativo a las estadísticas sobre residuos (REGLAMENTO (CE) N° 2150/2002 2002), y con el fin de supervisar la aplicación de la política de residuos, particularmente respecto de los principios de la recuperación y eliminación segura, se ratificó la creación del marco necesario para la elaboración y publicación de las estadísticas comunitarias armonizadas fiables sobre la producción y gestión de los residuos procedentes de empresas y hogares.

A partir del 2004, el Reglamento establece la obligatoriedad de que los Estados Miembros de la UE proporcionen datos sobre la generación, recuperación y

eliminación de residuos cada dos años. Se encuentran disponibles por tanto los datos para los años de referencia 2004, 2006, 2008 y 2010. No obstante, como se indica en los informes desarrollados por la Comisión Europea de Estadística Eurostat, se observan importantes diferencias en la estructura económica y los patrones de consumo de los Estados Miembros, así como diferentes grados de implementación de las políticas preventivas. Estas diferencias, son atribuidas en parte a las diferentes metodologías empleadas en la toma de datos, que más que en estadísticas reales, se basan en las propias estimaciones de los planes elaborados por los diferentes entes territoriales (Llatas 2011).

En este sentido el II Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición 2007-2015 (II PNRCD) (Ministerio de Medioambiente y Medio Rural y Marino 2008) no ofrece resultados reales aportados a través de la medición de las medidas impuestas por el anterior (Ministerio de Medioambiente 2001), sino que adopta unos ratios de producción de residuos según el tipo de construcción y obra civil, considerando un total producido que va desde los 24 millones de toneladas estimadas en el 2001, a 34 en 2005. Estas estimaciones contravienen a la nueva Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados (Jefatura del Estado 2011), que prevé en el artículo 10, que se dispongan de datos anuales recabados por las administraciones públicas en cuanto a la situación de la producción y gestión de los residuos, incluyendo datos de recogida y tratamiento desglosados por fracciones y procedencia, debiendo ser pública la información según lo previsto en el artículo 39 de la citada ley.

Los datos más recientes son los ofrecidos por Eurostat, que en su informe de 2010 (Eurostat 2010 02010) proporciona los datos estadísticos recopilados hasta 2006. Según este informe, en la Europa de los 27, se produjeron 3 billones de toneladas de residuos, lo que correspondía a 6 toneladas per cápita, de los cuales el 68% generado, o sea aproximadamente 2 billones de toneladas, correspondió a minerales y residuos sólidos procedentes de las actividades mineras y de los residuos de construcción y demolición. Sólo a esto últimos representarían 2 toneladas per cápita. Según el reporte n°2 de 2008 de la Agencia Europea de Medioambiente (EEA) (EEA Report n°2/2008 2008) estos sectores juegan un papel fundamental contribuyendo ostensiblemente a la economía de la Unión Europea.

En el informe se advierte que los principales flujos de residuos generados varían según la estructura económica de los países. En este sentido, los residuos minerales y los procedentes de construcción y demolición alcanzaron cotas de generación mayores en los países de tradición minera. Así, el flujo de estos residuos en España fue, en este periodo, de casi el 60% de las 4 toneladas per cápita generadas, correspondiéndole sólo a los RCD, 1081 kg per cápita.

En torno al 3% de los residuos generados en la EU-27, o sea 88 millones de toneladas, fueron residuos peligrosos, de ellos el 42% eran residuos minerales y RCD que pueden contener sustancias peligrosas como los asbestos. En España aproximadamente el 2.5% del flujo de residuos se consideró como peligroso.

En cuanto a la generación de residuos por sectores económicos, el sector de la construcción con un 33%, lo que equivale a 970 millones de toneladas, fue la mayor fuente de residuos de Europa, cifra similar a la española. El 22% de los residuos peligrosos generados por sectores económicos se atribuyeron al sector de la construcción, correspondiendo el total de los residuos generados por este sector el 2% del total del flujo de residuos europeo.

En el informe de 44/2011 (Schrör 2011), Eurostat publica los correspondientes datos de 2008, según los cuales, en la Europa de los 27 se generaron 2.62 billones de toneladas de residuos, correspondientes a 5.2 toneladas per cápita, de los que el 58% aproximadamente procedían de la minería y de las actividades de construcción y demolición. Los residuos peligrosos ocuparon el 3.7% de los residuos totales, cuantificados en aproximadamente 98 millones de toneladas. Comparando estos datos respecto de los del año de referencia anterior, la producción de residuos descendió un 23%, siendo el descenso en el caso de los residuos de construcción y demolición más acentuado cifrado en un 25%. No así en el caso de los residuos peligrosos, que claramente aumentó en más de un 11%.

Por sectores productivos, el sector de la construcción contabilizó 859 millones de toneladas de residuos, lo que supuso un 32.9% del total del flujo de residuos, mientras que la minería alcanzó los 727 millones de toneladas, un 27.8% del flujo de residuos. Entre ambas actividades se alcanzó el 61% de los residuos totales producidos.

Observando las cifras bianuales relativas a la producción de residuos de construcción y demolición por países desde 2004 a 2010 (ver Tabla 3), se encuentran considerables diferencias, impulsadas principalmente por las variaciones sociales y las condiciones económicas de cada nivel territorial. Así mismo, se puede comprobar la desaceleración de la actividad económica datada a partir de 2007 y reflejada en la menor generación de RCD en 2010 con respecto de 2008 en gran parte de los países del norte y este de Europa, así como en España, Malta e Italia.

4.2.3. Datos estimativos del reciclado de residuos de construcción y demolición

La práctica del reciclado de residuos de construcción y demolición tiene mayor incidencia en los países del norte de Europa (Alemania, Dinamarca, Finlandia, Holanda) respecto de los del sur (España, Francia e Italia). Los primeros, en general, siempre se han caracterizado por una parte, de un mayor respeto medioambiental, lo que se traduce en la puesta en marcha de prácticas sostenibles, reforzado, de otra parte, por la disponibilidad de materias primas en el sector extractivo destinadas a la construcción, tanto en cantidad como en asequibilidad económica.

Tabla 3. Residuos de construcción y demolición generados en la Unión Europea (1000 toneladas) según Eurostat

ÁMBITO GEOGRÁFICO	PERIODO			
	2004	2006	2008	2010
Islandia	18500	-	-	-
Croacia	646282	-	129223	2409
Turquía	-	-	0	0
Letonia	8243	19339	12040	21551
Rumania	91397	33740	318097	237502
Chipre	488499	298346	431231	1068282
Lituania	357380	348967	412045	356773
Estonia	488537	717105	1099100	436289
Eslovaquia	1403965	916228	1301760	1786430
Eslovenia	907963	994886	1376225	1509476
Bulgaria	2998621	1023303	1828761	78880
Noruega	1101407	1252051	1498376	1542803
Malta	2810774	2492522	2027517	988788
Hungría	1735609 (e)	3045335 (e)	3240063 (e)	3072214
Portugal	2625939 (e)	3607449 (e)	8084709	11070556
Dinamarca	4273801	5802368	5674326	2104086
Luxemburgo	6979984	6774547	8282055	8731351
Grecia	3324000	6829161	6828051	2086080
República Checa	8130735	8379849	10650635	9353673
Suecia	10271183	8943363	3310326	9381226
Bélgica	11037080 (e)	13089651 (e)	15441861	18164920
Polonia	1993409	14141031	6929510	20818234
Irlanda	11286882	16599466	0	1609762
Finlandia	20842637	23145712	24455231	24645393
Austria	27935266	31321626	31389803	9010097
España	46319660	47323392	44926463	37946523
Italia	49150771	52315620	69731942	57839752
Holanda	49611801	56624437	59476831	78063887
Reino Unido	99234124	109545987	100999493	105560291
Alemania	191562719	196536165	197207425	190990217
Francia	216452867 (s)	233440249 (s)	252979840	260225886
Unión Europea de los 15	750910000	811900000	828790000	817430000 (s)
Unión Europea de los 27	772320000	844310000	858420000	857160000 (s)
(e) estimado				
(s) estimado por Eurostat				

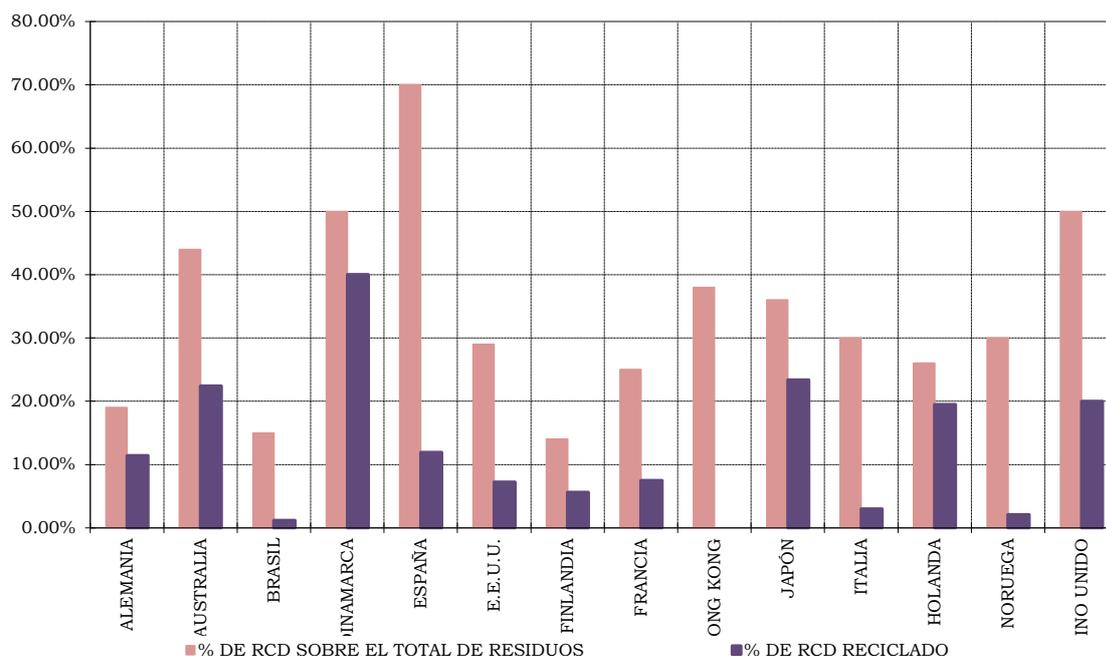
Fuente: <http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/submitViewTableAction.do>

En este sentido, las entidades destinadas a la producción de árido reciclado procedente de los residuos de construcción y demolición han avanzado igualmente en sentidos contrarios. Mientras que los países del norte de Europa consideran el

RCD como un residuo perfectamente seleccionado en origen, que da lugar a un producto de calidad una vez procesado, en España lo que llega a las plantas gestoras se podría considerar más bien basura, pues resulta una mezcla indiscriminada de todo tipo de residuos producidos en la obra, sin clasificación alguna, y cuyo procesamiento, para obtener un producto de calidad medianamente aceptable, resultaría totalmente inviable desde el punto de vista económico.

Según los estudios consultados, a nivel mundial se estima que el 35% de los residuos que se producen son residuos de construcción y demolición (Llatas 2011). En el entorno de la Unión Europea la producción de residuos de construcción y demolición ha alcanzado la cifra de los 180 millones de toneladas al año aunque, a pesar de su gran potencial de reciclaje, aproximadamente el 75% de ellos son depositados en vertedero (Corinaldesi, Moriconi 2009). Los datos que se conocen, arrojan resultados bastante dispares en cuanto a tasas de reciclado, de lo que se deduce la diferencia legal, técnica y sociocultural en cada territorio.

Figura 1. Porcentaje de RCD reciclado sobre el porcentaje de RCD producido



Fuente: Elaboración propia

Según los datos recogidos en la Figura 1 (Tam, Wang et al. 2008, Hendriks, Pietersen 2000, <http://www.cdrecycling.org/> 2005, <http://www.info.gov.hk/epd> 2005, Poon 2000), la proporción de residuos de construcción y demolición respecto del total de los residuos generados en distintos países se ha situado en la última década en torno al 30-40%, destacando España que, con un 70% de RCD producidos, indica el nivel de desarrollo que ha alcanzado la construcción en nuestro país, provocando una de las mayores burbujas inmobiliarias del mundo. Por otra parte, este dato de producción se contrapone a una de las más bajas tasas de reciclado de los residuos de construcción y demolición producidos, sólo

un 17% de los mismos es sometido a los procesos necesarios para darle una nueva puesta en valor, lo que indica claramente la falta de concienciación medioambiental del sector, y la deficiente aplicación de las medidas y objetivos planteados en la legislación y en los planes de gestión de residuos de construcción y demolición.

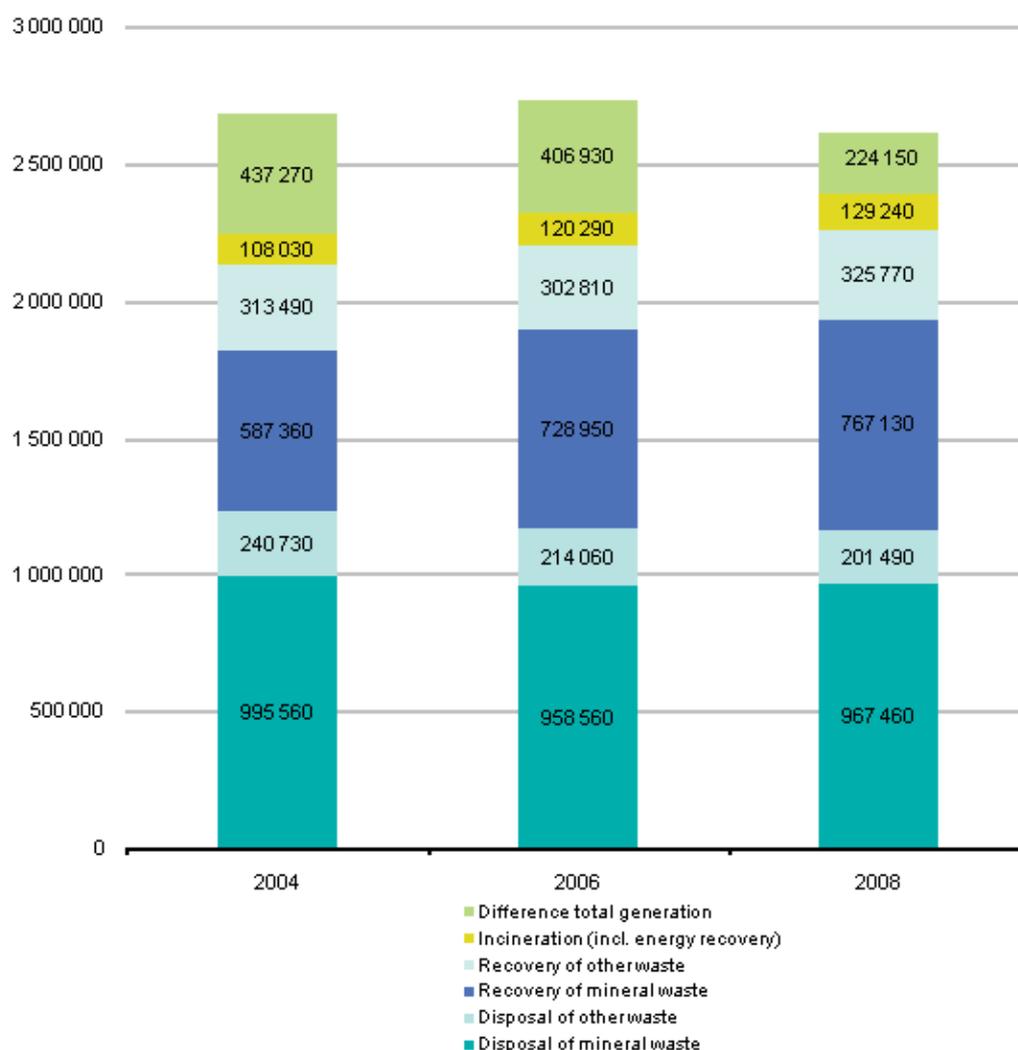
Destacan significativamente países como Australia o Japón con ratios del 51 y 65% de RCD reciclados sobre el porcentaje de producidos respectivamente (Tam, Gao et al. 2005). En cuanto a los países que alcanzan niveles de reciclado excelentes, se encuentra Holanda y Dinamarca reciclan entre 80-90% (Symonds Group 1999), lo que viene a corroborar la inquietud de sus gobiernos en materia de gestión de residuos ampliamente asesorados por la labor técnica y científica que se desarrolla en el seno de sus universidades (Tam, Tam 2006, Tam, Le 2007, Tam, Wang et al. 2008, Tam, Tam 2008, Tam 2009, Tam, Tam et al. 2010). Así mismo las tasas de reciclado más bajas son las encontradas en países como Brasil, Italia o Noruega, con tasas de reciclado inferiores al 10%.

El II PNRCD (Ministerio de Medioambiente y Medio Rural y Marino 2008), consciente de la dificultad de recopilar información al respecto de la gestión de los RCD, recoge los datos facilitados “*por algunos gestores y organismos públicos*” en cuanto a la gestión llevada a cabo durante los años 2002 a 2006 (ver Tabla 4), sobre la base de las contestaciones a un cuestionario. A resultados de la irregular participación, se observa por una parte, que 7 Comunidades Autónomas ni siquiera han facilitado los datos, y los pocos que se disponen no están completos, en unos casos son resultados de los RCD reciclados y en otros de los eliminados en vertedero. Las Comunidades Autónomas de Cantabria y Cataluña son las únicas que aportan datos en cuanto al reciclado y eliminación en vertedero de los residuos de construcción y demolición en el periodo estudiado. Trabajando con el número gordo, la evolución en la gestión de los RCD en España se traduce en unas cotas de reciclaje de en torno al 5% en 2002, 4% en 2003, 9% en 2004 y 15% en 2005. No se han podido obtener datos estimativos de 2007 al no disponer de ningún dato de residuos eliminados en vertedero. Estas estimaciones coinciden con lo reflejado en el informe Symonds de febrero de 1999 (Symonds Group 1999), según el cual, en la Europa de los 15 se alcanzaba tan solo un porcentaje de reutilización del 28% de los mismos, encontrándose España con las tasas más bajas al reciclar menos del 5% de los RCD.

Respecto del tratamiento de los residuos generados en el entorno de la Unión Europea, los datos disponibles de 2010, recogidos en el informe 31/2011 de Eurostat (Blumenthal 2011), muestran que unos 2366 millones de toneladas de residuos fueron tratados en la UE-27, de los cuales casi la mitad (48.2%) fueron objeto de operaciones de eliminación distintas de la incineración, predominantemente en vertederos, y otro 46.3% fue enviado a operaciones de recuperación (excluyendo la recuperación de energía). El restante 5.4% de los residuos tratados de destinó a la incineración (con o sin recuperación de energía). La cuota de eliminación en vertedero de los residuos totales generados en Europa se redujo en un 54.0% en 2004 y en un 48.2% en 2010.

La Figura 2 muestra la evolución del tratamiento de residuos en las categorías principales de tratamiento en el período de 2004 a 2008 según el informe 44/2011 de Eurostat (Schrör 2011). En la eliminación de residuos minerales se produjo un descenso, mayor en 2006 que en 2008, mientras que las operaciones de valorización crecían significativamente en cada periodo, en gran parte como resultado de los mayores niveles de tratamiento de residuos de la industria extractiva. Por su parte, la cantidad de residuos recuperados (excluida la recuperación de energía) creció de manera constante en 893 millones de toneladas en 2004 a 1096 millones de toneladas en 2010, lo que supone un aumento del 41.1% y 46.3% respectivamente, aunque la tasa de crecimiento fue más lenta entre 2008 y 2010.

Figura 2. Evolución del tratamiento de los residuos en la EU-27 (1000 toneladas) según Eurostat



Fuente: Eurostat

Tabla 4. Datos de gestión de RCD en España desde 2002 a 2006 según II PNRC

COMUNIDAD AUTÓNOMA	2002		2003		2004		2005		2006 (HASTA JUNIO)	
	Reciclado	Vertedero	Reciclado	Vertedero	Reciclado	Vertedero	Reciclado	Vertedero	Reciclado	Vertedero
Andalucía					26078		83070		86399	
Aragón										
Asturias		76243		212767		258838		250439		
Baleares										
Canarias										
Cantabria	8422	125081	10050	297484	7705	145579	7579	104533		
Castilla-La Mancha										
Castilla-León			81100		87120		194120		134630	
Cataluña	346098	5475377	150832	6164451		3675861	465124	7248881		
Comunidad Valenciana					46744		353874		71314	
Extremadura		825727		845053		855255	3750	868730		
Galicia							12285			
Madrid					244134		436616		493598	
Murcia										
Navarra										
País Vasco	20586		91658		107589		195645		90472	
La Rioja						23691	2390	52233		
Ceuta						19186		19762		
Melilla										
Total nacional	375106	6502428	333640	7519755	519370	4978410	1769836	8544578	922771	0

Fuente: II PNRC 2007-15

En 2008, la valorización de residuos no peligrosos minerales procedentes principalmente de la construcción y las actividades mineras, ascendió a 754 millones de toneladas, que representaron el 69% del total de los residuos recuperados. La valorización de este tipo de residuos ha mostrado un fuerte crecimiento en los últimos años, habiendo aumentado desde 2004 a 2008 en 177 millones de toneladas, es decir en un 31%.

Un análisis de los últimos datos de 2010 muestra que 193 millones de toneladas de residuos recuperados se utilizaron para la ejecución de rellenos en obras de ingeniería o jardinería.

En definitiva, los datos estadísticos demuestran que la aplicación de medidas comunitarias en materia de residuos, están dando fruto. Por un lado, se observa como resultado positivo que la producción de residuos, en general, y de los de construcción y demolición, en particular, así como su eliminación mediante depósito en vertedero, descienden paulatinamente a la vez que se activan el resto de procesos de gestión. Por otro lado, queda patente también la grave situación socioeconómica que está afectando considerablemente al sector de la construcción, en el que la producción y gestión de residuos sigue un patrón distinto al de los residuos en general.

4.2.4. Composición de los residuos de construcción y demolición

El hormigón es el más voluminoso de los residuos que se generan en cualquier tipo de obra de edificación, demolición y de ingeniería civil, cifrándose, en general, en torno al 40 y el 75% del residuo generado en las obras de construcción y demolición (Tam, Gao et al. 2008, Tam, Tam 2008).

La valoración cuantitativa de la composición de los residuos de construcción y demolición resulta de total necesidad en la elaboración de los estudios y planes de gestión de los mismos en las obras de construcción y demolición. Conocer de antemano las cantidades de RCD y cuando van a ser generados, permite planificar y adecuar la gestión de los RCD a la obra en concreto, así como, establecer medidas preventivas y controladoras, para conseguir un modelo de gestión de RCD cuyo principal objetivo sea la generación de residuos cero (Villoria Saez, Rio Merino et al.). A tal efecto se han publicado diversos estudios estimativos (Bergsdal H., Bohne et al. 2007, Bossink B. A. G., Brouwers 1996, Chandrakanthi M., Hettiaratchi et al. 2002, Cochran K., Townsend et al. 2007, Gómez-Soberón J. Manuel, Arredondo-Rea S. Paola et al. 2011, Hsiao T., Yu, Y., Wernick, I. 2002, Kofoworola O.F., Gheewala 2009, Müller D.B. 2006, Wang J. Y., Touran et al. 2004, Yost, Halstead 1996), e incluso se han diseñado herramientas informáticas (CONSTRUBIT, UrbiCAD, ITeC) que ayudan considerablemente a solucionar el problema.

Tabla 5. Distribución de los constituyentes de los RCD según el ITeC

	CIMENTACIÓN/ESTRUCTURA		CERRAMIENTOS	ACABADOS	
	ENCOFRADO DE MADERA	ENCOFRADO METÁLICO		TRADICIONALES	CARTÓN-YESO
Hormigón (%)	15	37			
Cerámica, mortero, hormigón (%)			84	40	10
Metales (%)	8	22	1	4	4
Madera (%)	60	5	3	7	15
Papel y cartón (%)	5	5	7	15	15
Plásticos (%)	12	31	4	13	30
Yeso (%)				20	25
Otros (%)			1	1	1

Fuente: Elaboración propia según el ITeC

Tabla 6. Evaluación del volumen de RCD generados de acuerdo con la tipología de la construcción según el ITeC

MATERIALES	EDIFICIOS DE VIVIENDAS DE OBRA DE FÁBRICA (m ³ /m ² construidos)	NAVES INDUSTRIALES DE OBRA DE FÁBRICA (m ³ /m ² construidos)	EDIFICIOS DE VIVIENDAS DE ESTRUCTURA DE HORMIGÓN(m ³ /m ² cons.)
Obra de fábrica	0.5120	0.5270	0.3825
Hormigón y mortero	0.0620	0.2550	0.5253
Pétreos	0.0820	0.0240	0.0347
Metales	0.0009	0.0017	0.0036
Maderas	0.0663	0.0644	0.0047
Vidrio	0.0004	0.0005	0.0010
Plásticos	0.0004	0.0004	0.0007
Betunes			0.0012
Otros (%)	0.0080	0.0010	0.0153
Total	0.7320	0.8740	0.9690

Fuente: Elaboración propia según el ITeC

En este sentido, como se ha constatado en el apartado anterior, el II PNRC (Ministerio de Medioambiente y Medio Rural y Marino 2008) sólo estima los datos brutos de RCD generados por metro cuadrado según sean las obras de nueva construcción, de rehabilitación o, de demolición total o parcial, sin llegar a concretar la composición de los mismos.

El Instituto de Tecnología de la Construcción de Cataluña (ITeC) (ITeC 2000), por su parte, ha publicado un manual, con su correspondiente herramienta informática, para cuantificar la composición de los RCD que, desde el año 2000, viene siendo el referente a la hora de la realización de los estudios y planes de gestión en las obras españolas. Para ello, parten de un ratio medio de producción de RCD en las obras de construcción convencionales en torno a 0.1200 m^3 de volumen aparente cada m^2 construido, obtenido de sumar lo producido en las fases de estructura ($0.0150 \text{ m}^3/\text{m}^2$ construido, si es con encofrado de madera, o $0.00825 \text{ m}^3/\text{m}^2$ construido, si es metálico), cerramientos ($0.0550 \text{ m}^3/\text{m}^2$ construido) o acabados ($0.0500 \text{ m}^3/\text{m}^2$ construido), y cuya distribución se puede estimar según los porcentajes recogidos en la Tabla 5. Incluso, consideran que si no fuese posible una medición detallada, se puede precisar la cantidad de RCD generados en función de la tipología constructiva del edificio empleando los ratios medios según los volúmenes recogidos en la Tabla 6.

Son pocos los estudios que contabilizan la composición de los RCD. Así, Oikonomou (Oikonomou 2005) la estimó en unos porcentajes aproximados de: 40% en hormigón, 30% en material cerámico, 10% en madera, 5% en metal, 5% en plásticos y 10% en otros varios. Katz y Baum (Katz, Baum 2011) realizaron un exhaustivo estudio para contabilizar la composición de los residuos de construcción y demolición producidos en las obras, de cara a establecer un modelo de cuantificación de los mismos. Para ello establecieron los trabajos de construcción en sólo tres fases: trabajos estructurales, de albañilería y acabados. Las actividades de movimiento de tierras y cimentación, a pesar de la gran cantidad de residuos generados, no se tuvieron en cuenta. Estos autores estiman que en los trabajos estructurales se generan las menores cantidades de residuos, estando compuestos principalmente por acero, hormigón y madera, mientras que en los trabajos de albañilería se producen grandes cantidades de residuos cerámicos, morteros de cemento y productos a base de yeso, que requieren su separación para ser reciclados. Pero la mayor cantidad y variedad de residuos se produce en la fase de acabados, lo que resulta de mayor dificultad para ser reciclados. La cantidad de residuos que se producen en cada una de las fases se presenta en la

Tabla 7 donde la mayor reciclabilidad se alcanza en la fase de estructura (80%) reduciéndose a la mitad en la de acabados.

No obstante, aún no se disponen de estudios científicos que analicen conjuntamente todas las variables que inciden en la tipología y magnitud de los residuos generados por cada unidad de obra (Martínez Bertrand, Tomé Trujillo 2008).

Tabla 7. Distribución de los constituyentes de los RCD según Katz y Baum

	ESTRUCTURA	ALBAÑILERÍA	ACABADOS
Material granular reciclable (*) (%)	49	36	21
Acero reciclable (%)	28	10	6
Papel reciclable (%)	5	9	14
Materiales no reciclables (**) (%)	18	46	60
(*) hormigón y residuos cerámicos			
(**) plástico, madera, yeso y suelos			

Fuente: Elaboración propia según Katz y Baum

4.2.5. Utilización de los residuos de construcción y demolición

La utilización de residuos industriales en el mundo de la construcción no es reciente. En la época del Imperio Romano se utilizaban escombros cerámicos y escorias procedentes de fundición en la construcción de edificios y carreteras (Lidelow 2004). La recuperación de la piedra que conformaba el adoquinado de los antiguos caminos que se encontraban en mal estado para ejecutar otros nuevos, también era una práctica habitual (Tabsh, Abdelfatah 2009). Aunque, según Hansen (Hansen 1992), el primer uso de escombros triturados y mezclados con cemento portland para la manufactura de productos de hormigón, data de 1860 en Alemania, cuando tras la II Guerra Mundial (Rao, Jha et al. 2007, Senthamarai, Manoharan et al. 2011), la gran cantidad de escombros generados durante los bombardeos se convirtieron en un problema de gestión.

Hasta la década de los 70 y 80 el reciclado de RCD no comenzó a ser objeto de investigación, obteniéndose desde entonces un conocimiento variado acerca del comportamiento de los productos obtenidos a partir de estos residuos y su utilización (Li 2008). La actividad investigadora en esta materia se ha visto altamente favorecida por el rápido desarrollo urbanístico y las exigencias en materia de sostenibilidad que se vienen produciendo desde entonces, y son numerosos los grupos de investigación que están contribuyendo a ello desde las propias universidades y centros tecnológicos, con la intención de obtener el suficiente número de resultados experimentales que consigan determinar los usos más adecuados de estos materiales, de manera que los haga rentables medioambiental, técnica y económicamente.

No obstante, es destacable que, a pesar de los considerables esfuerzos realizados y de haber invertido más de medio siglo en la experimentación con los residuos de construcción y demolición, la gran lacra a la que se enfrentan los productos que se obtienen de ellos es que no se han llegado a definir prescriptivamente las posibilidades de uso. En el caso de los áridos reciclados que se obtienen del procesamiento de este tipo de residuos, y que son el objeto de la investigación que se va a desarrollar en el presente documento de Tesis Doctoral, esta lacra se puede justificar en la concurrencia de dos importantes aspectos, tanto de la deficiente calidad que presentan, como de la carencia de normalización

armonizada que establezca los posibles y diferentes niveles de usos en función del tipo y exigencias técnicas que presentan los materiales granulares reciclados.

Cuando se considera que un residuo es susceptible de ser reciclado, además de los impactos medioambientales, hay que tener en consideración tres aspectos: el económico, la compatibilidad que pueda presentar con otros materiales y las propiedades que lo caracterizan (Tam, Tam 2008).

Desde el punto de vista puramente económico, el reciclado de residuos de construcción y demolición se presenta atractivo cuando el producto reciclado que se obtenga de ellos sea competitivo en coste y calidad con respecto del obtenido a partir de recursos naturales. Así mismo, los productos reciclados serán más competitivos en aquellas zonas donde coexistan tanto los recursos naturales, como las instalaciones propias de reciclaje y vertederos autorizados, que dinamicen el mercado de la construcción, mediante un equilibrio en los precios de ambos tipos de productos naturales y reciclados.

Aunque también es cierto, por otra parte, que las mayores tasas de reciclado se dan en los países del norte de Europa, donde a la escasez de materia prima natural, se une un elevado precio de coste de vertido de los residuos de construcción y demolición, que se estima entre 10 y 15 veces superior al coste de vertido en España. Es por ello que, en estas zonas geográficas, la industria del reciclado realiza tratamientos más intensivos sobre los RCD, para obtener productos más eficientes, y resulta una industria mucho mejor implementada que en los países del sur de Europa. No obstante, en España el nivel de sensibilización social en esta materia es cada vez mayor, aunque también es cierto que viene sucediendo más por la propia convicción individual y de los colectivos empresariales e industriales por la preocupación ante el futuro de las generaciones venideras, que por las obligaciones legales.

En cuanto a la compatibilidad que pueden presentar los productos reciclados con otros materiales se puede considerar que está garantizada en la mayoría de los casos, en tanto que al verse el residuo de construcción y demolición sometido simplemente a una selección manual y, en algunos casos a un tratamiento mecánico y/o a un lavado con agua, es decir sin incluir productos o tratamientos que incorporen sustancias nocivas, la compatibilidad va a ser la misma que mostraba el producto original en la construcción de la que proviene. Cosa distinta, es que algunas de las propiedades que van a presentar los nuevos productos reciclados, que los harán viables técnicamente, alcancen los requisitos que se exigen para cada aplicación.

Como queda patente a lo largo del documento de Tesis Doctoral, en el caso de los áridos reciclados procedentes de los residuos de construcción y demolición, son abundantes los estudios donde queda reflejado que, pese a la variable calidad del árido reciclado, la mayoría de sus características físicas, mecánicas y químicas lo hacen viable para una serie de aplicaciones de baja o media responsabilidad (Khatib 2005), tanto en obra civil como en edificación. Incluso, los autores consideran que se podría utilizar en aquellas aplicaciones de alta responsabilidad,

siempre y cuando el árido reciclado provenga bien de un hormigón de alta resistencia (Ajdukiewicz, Kliszczewicz 2002), o bien sea tratado adecuadamente para mejorar sus características más limitantes (Corinaldesi, Giuggiolini et al. 2002, Akbarnezhad, Ong et al. 2011), o incluso se mezcle en distintos porcentajes con árido natural, para contrarrestar las deficiencias de aquel y de esa manera alcanzar el cumplimiento de las limitaciones establecidas en las normas.

A continuación, a modo de resumen, se presenta una puesta en común de la información recopilada al respecto de la utilización de los áridos reciclados procedentes de los residuos de construcción y demolición, tanto en la elaboración de hormigón estructural, como en obras de ingeniería civil, con lo que va a quedar patente que el hándicap que realmente presentan los materiales reciclados, y en concreto el árido reciclado, no radica tanto en su calidad como en la falta de normativa técnica específica que asegure un nivel de confianza en base a aplicaciones concretas.

4.2.5.1. Utilización de los residuos de construcción y demolición en la elaboración de hormigón estructural

La fabricación de hormigón estructural elaborado con árido reciclado es una de las aplicaciones que se encuentran más estudiadas en la documentación consultada (Ajdukiewicz, Kliszczewicz 2002, Amnon 2003, Asociación Científico Técnica del Hormigón Estructural 2006, Bairagi, Ravande et al. 1993, Barra de Oliveira, Vazquez 1996, Berndt 2009, Cabral, Schalch et al. 2010, Cachim 2009, Corinaldesi 2010, Corinaldesi, Letelier et al. 2011, de Brito, Pereira et al. 2005, Sánchez de Juan 2004, Debieb, Courard et al. 2010, Evangelista, de Brito 2007, González-Fonteboa, Martínez-Abella 2008, Khaldoun 2007, Paulo B. 2009, Sim, Park 2011, Tabsh, Abdelfatah 2009, Xiao, Li et al. 2005). No por ello se ha conseguido encontrar el árido reciclado con el suficiente nivel de fiabilidad como para ser utilizado en esta aplicación (Limbachiya, Meddah et al. 2012).

En la mayoría de los estudios consultados se muestra que el árido reciclado no presenta unas características que lo definan con carácter de uniformidad, de manera que tanto la procedencia de los RCD (Katz 2003), como la cantidad y calidad de los áridos reciclados (Breccolotti, Materazzi 2010) van a repercutir considerablemente en las propiedades que presente el hormigón que se elabore con ellos. No obstante, los hormigones fabricados con sustituciones parciales de árido natural por reciclado, siempre que éste presente unos requisitos mínimos conforme a la normativa técnica, pueden proporcionar el suficiente nivel de confianza estructural (Ajdukiewicz, Kliszczewicz 2002, Breccolotti, Materazzi 2010, Corinaldesi, Letelier et al. 2011, González-Fonteboa, Martínez-Abella 2007).

Ante la numerosa información encontrada en relación a la utilización de árido reciclado en la elaboración de hormigón estructural, a continuación se resumen algunos de los aspectos que más van a condicionar la viabilidad de utilización de este tipo de materiales granulares para esta aplicación. Por lo que el comportamiento final del hormigón estructural va a estar determinado tanto por

la cantidad y calidad de los áridos reciclados empleados, como por la composición de los mismos.

4.2.5.1.1. Influencia de la cantidad de árido reciclado en el comportamiento del hormigón estructural

Los estudios conducentes a establecer la viabilidad del árido reciclado en la elaboración de hormigón estructural se centran fundamentalmente en la comprobación de las características mecánicas del mismo, y en todo caso en su durabilidad. Desde este punto de vista, existe una gran cantidad de estudios que prueban que el hormigón elaborado con árido grueso procedente de residuos de construcción y demolición puede alcanzar unas propiedades mecánicas similares al fabricado con árido convencional, llegándose incluso a obtener hormigones de alta resistencia mecánica (Ajdukiewicz, Kliszczewicz 2002, Evangelista, de Brito 2007, Khatib 2005).

A este respecto, algunos autores han estudiado las distintas proporciones en las que entraría a formar parte el árido reciclado (Mas, Cladera et al. 2011, Tam, Tam et al. 2007, Tam, Tam 2008) en sustitución del natural, con el objetivo de elaborar mezclas que mejoren los aspectos más negativos de aquel. Blengini y Garbarino (Blengini, Garbarino 2010) tienen la opinión de que árido reciclado y el natural no pueden competir en la industria de la construcción, no obstante, defienden que su utilización conjunta resultaría estratégica en este sector.

En este sentido, hay autores que se atreven a establecer unos porcentajes fijos de sustitución de árido natural por el correspondiente reciclado, necesarios para que el comportamiento mecánico del hormigón no se vea comprometido (Barra de Oliveira, Vazquez 1996, González-Fonteboá, Martínez-Abella 2008, Khatib 2005). Además, la mayoría de ellos consideran, sólo y exclusivamente, la utilización de árido grueso reciclado, pues está ampliamente contrastada la negativa influencia que tiene la arena reciclada en el comportamiento del hormigón tanto fresco como endurecido, debido a su alta capacidad de absorción de agua y a la cohesión que presentan los finos reciclados, que dificultan el cumplimiento del control de calidad del hormigón (Marinković, Radonjanin et al. 2010), a lo que se añade el peligro de reaccionar con áridos potencialmente reactivos por su alto contenido en álcalis (Sánchez de Juan, Alaejos Gutiérrez 2005). De ahí la prohibición expresa de su uso que hace la mayoría de la normativa técnica (Collins 2003, DIN 4226-100 2002, EHE-08 2008, Padmini, Ramamurthy et al. 2009, RILEM, Technical Committee TC 121 1994, Shanghai Construction Standard Society (SCSS) 2007).

Generalmente se admite que las características físicas y mecánicas y la durabilidad de un hormigón confeccionado con árido reciclado empeoran según aumente el porcentaje de sustitución del árido natural (Li 2008). Aunque por otra parte, hay quienes siguiendo a Fonseca y sus discípulos (Fonseca, de Brito et al. 2011) consideran que el hormigón elaborado con áridos reciclados experimenta un cierto aumento de la resistencia mecánica. Cuando este aumento en la resistencia se produce, es justificado de una parte por la incorporación a la mezcla una mayor cantidad de productos hidratados del cemento, tanto en el mortero nuevo

como en el viejo (Katz 2003), así como por la mayor rugosidad y superficie específica con que cuenta el árido reciclado, de manera que contribuye a una mejor interconexión entre el árido reciclado y la nueva pasta de cemento (Hansen 1986).

Parece que una de las cosas en las que está de acuerdo casi toda la normativa técnica en referencia a la utilización de árido reciclado en la elaboración de hormigón estructural, es no superar el porcentaje de sustitución del 20% de árido grueso natural por la correspondiente fracción reciclada (BS 8500-2:2006 2006, CUR 1984, CUR 1986, CUR 1994, EHE-08 2008, LNEC E 471 2009, NEN 5905 2010, WBTC 12/2002 2002). Algunas normas permiten un porcentaje de sustitución mayor (Ministero delle Infrastrutture 2008), admitiendo la norma italiana hasta un 30% de sustitución, siempre que se consigan hormigones de resistencia entre 30 y 37 MPa (Ministero delle Infrastrutture 2008).

No obstante este valor límite de sustitución del 20% máximo de árido grueso reciclado se ha demostrado en numerosos estudios que puede ser superado con amplitud sin verse afectadas las propiedades del hormigón elaborado. Así lo constata los estudios llevados a cabo por Chakradhara et al. (Chakradhara Rao, Bhattacharyya et al. 2011) que concluyen que con un porcentaje de sustitución del 25-30% las propiedades mecánicas del hormigón no disminuyen. Limbachiya et al. (Limbachiya, Marrocchino et al. 2007), en el estudio para la caracterización químico-mineralógica del árido reciclado de hormigón, encontraron que la limitación del 30% de árido grueso reciclado propuesto por la normativa británica BS 8500 (BS 8500-2:2006 2006) se debe a que a partir de ese porcentaje aumenta la cantidad de cemento. A mayor cantidad de cemento, mayor es la presencia de los diferentes óxidos en el hormigón, lo que convierte al árido reciclado en un producto con alto riesgo de lixiviación (Sri Ravindrarajah, Tam 1987).

González-Fonteboa y Martínez-Abella (González-Fonteboa, Martínez-Abella 2007) admiten hasta un 50% de sustitución por árido grueso reciclado para lograr la misma resistencia que el hormigón convencional. Para ello, hubieron de subir la cantidad de cemento en un 6.2%, a pesar del riesgo de tener que admitir un diferente comportamiento estructural que se tradujo en la aparición de fisuras prematuras.

En caso de sustituciones totales también se ha contabilizado la merma de resistencia que se produce en el hormigón reciclado. Mientras Li (Li 2008) admite una merma de la resistencia de entre el 12-25%, Etxeberria et al. (Etxeberria, Vázquez et al. 2007) han alcanzado una reducción en la resistencia a compresión en torno a un 20-25%. Los estudios de Tam et al. (Tam, Tam et al. 2007) son los que recogen datos más dispares, con una variabilidad en la merma de la resistencia a compresión del hormigón elaborado con una sustitución del 100% de árido grueso reciclado que oscila entre una bajada del 4% al 86.4%. Por lo que, además de la cantidad de árido reciclado empleado, la calidad del mismo parece también decisiva en el comportamiento del hormigón elaborado (Breccolotti, Materazzi 2010).

El porcentaje de sustitución resulta, por tanto, de una importancia tal que autores como Tam y sus colegas han dedicado gran parte de su trayectoria investigadora en el desarrollo de experiencias conducentes a la mejorar la calidad del árido (Tam 2009, Tam 2008, Tam, Gao et al. 2005, Tam, Gao et al. 2008, Tam, Gao et al. 2009, Tam, Le 2007, Tam, Tam 2008, Tam, Tam 2006, Tam, Tam et al. 2007, Tam, Tam et al. 2010, Tam, Wang et al. 2008). Cuando han estudiado la forma de optimizar la proporción de árido reciclado en la elaboración de hormigón, usando su método de mezclado en dos etapas (TSMA: two-stage mixing approach) (Tam, Tam et al. 2007), concluyen que la cantidad óptima de árido grueso reciclado en la elaboración de hormigón debe de encontrarse entre el 25 y 45%, pudiéndose alcanzar niveles de sustitución de hasta 50-70%, en caso de adoptarse su sistema de mezclado TSMA. No obstante, se inclinan hacia el lado de la seguridad reafirmando en la recomendación conservativa del 20% de sustitución propuesta por distintos autores y normativas.

Algunos autores han elaborado modelos estructurales a escala para comprobar in situ el comportamiento mecánico del hormigón reciclado. Así Corinaldesi et al. (Corinaldesi, Letelier et al. 2011), en su estudio sobre el comportamiento de la unión viga-pilar elaborada con hormigón armado sustituyó el 30% de árido grueso natural por reciclado sin verse afectada la capacidad mecánica de la misma.

La sustitución de arena natural por reciclada, aun estando prohibida por gran parte de la normativa, al menos para aplicaciones de hormigón estructural, ha sido también objeto de estudio. Ciertamente son pocos los autores cuya experimentación al respecto ha conducido a la obtención de datos positivos. En este sentido Marmash y Elliott (Marmash, Elliott 2000) emplearon áridos reciclados procedentes de la trituración de placas alveolares pretensadas concluyendo que usando un 20% de grava y un 10% de arena se consigue obtener un hormigón con prácticamente las mismas características que el elaborado con árido convencional. Collins (Collins 2003) admite idénticos porcentajes de sustitución en la elaboración de prefabricados de hormigón estructural, siempre que dicho árido provenga de la trituración de las piezas prefabricadas que han resultado defectuosas en el proceso industrial.

Otras investigaciones han conseguidos porcentajes de sustitución de arena mayores con resultados aceptables. Corinaldesi y Moriconi (Corinaldesi, Moriconi 2009) elevaron el contenido en árido fino reciclado de sus mezclas de hormigón hasta un 26%, sin que las propiedades mecánicas del hormigón se vieran comprometidas. Sim y Park (Sim, Park 2011) mostraron que la pérdida de resistencia se hace significativa cuando la cantidad de árido fino reciclado alcanza el 60%, experimentando una bajada del 33% de la resistencia mecánica en hormigones elaborados con el 100% de arena reciclada.

Estos estudios están de acuerdo con Evangelista y De Brito (Evangelista, de Brito 2007) que indican, por razones de durabilidad, el valor de 30% como el máximo ratio de sustitución. Estos defienden el aporte de árido fino reciclado en consonancia con Katz (Katz 2003) que afirma que la razón por la que la resistencia a compresión de un hormigón reciclado se mantiene a pesar de incrementarse los

finos, radica en que el árido reciclado aporta un mayor contenido en cemento, tanto hidratado como no hidratado, que puede encontrarse en una proporción entre 20-30% de su peso (Li 2008), incrementándose por tanto el contenido en cemento total de la mezcla. En este sentido, Sri Ravindrarajah y Tam (Sri Ravindrarajah, Tam 1987) afirman que los finos procedentes de árido reciclado presentan una alta solubilidad en contacto con agua, lo que se demuestra porque el contenido en álcalis del agua comienza a aumentar debido a la solubilidad que experimenta el hidróxido cálcico presente en el mortero adherido.

El efecto que los finos del árido reciclado produce en morteros y hormigones también ha sido estudiado. En este sentido Miranda y Selmo (Miranda, Selmo 2006, Miranda, Selmo 2006) analizan el comportamiento de los finos de menos de 75µm en los morteros de enlucido, en cuanto a la influencia que provocan en la retracción por secado. Su experimentación condujo a comprobar que, con un 18% de finos reciclados, los morteros experimentan la misma retracción que los elaborados con finos de procedencia natural, disparándose este parámetro cuando se dosifican en cantidad superior al 25%.

Corinaldesi y Moriconi (Corinaldesi, Moriconi 2011) han utilizado incluso el árido reciclado en la elaboración de hormigón autocompactante. Los resultados obtenidos demuestran que se puede conseguir una optimización del hormigón autocompactante mediante el uso simultáneo de polvo y árido grueso reciclados, desarrollando un buen comportamiento en estado fresco, con ausencia de segregación, aportándole una mayor tixotropía y viscosidad, y sin alteración de sus resistencias mecánicas una vez endurecido.

4.2.5.1.2. Influencia de la calidad del árido reciclado en el comportamiento del hormigón estructural

Los estudios experimentales consultados han puesto de manifiesto que en la calidad del árido reciclado influye considerablemente el contenido en yeso, el material cerámico y la cantidad de mortero adherido (Agrela, Sánchez de Juan et al. 2011, Akbarnezhad, Ong et al. 2011, Cachim 2009), que contribuirán a que el árido presente un aumento en su capacidad de absorción de agua, lo que repercutirá notablemente en la resistencia mecánica y durabilidad en el hormigón estructural (Sim, Park 2011).

Asociado a la presencia de estos componentes, los áridos reciclados desarrollan otra serie de problemas de índole técnica (Sánchez de Juan, Alaejos Gutiérrez 2005) dificulta su aplicación, especialmente en el caso de hormigones estructurales (Kou, Poon et al. 2011, Olorunsogo, Padayachee 2002). Entre ellos se incluyen la falta de información sobre la zona de transición pasta-árido reciclado, el incremento de la porosidad y la fisuración interna, el alto contenido en sulfatos, cloruros (Tam, Le 2007) y álcalis (Sani, Moriconi et al. 2005), la presencia de impurezas y el cemento adherido al árido reciclado (Sim, Park 2011), la deficiente granulometría y variable calidad que presenta.

En todo caso, la calidad final que va a presentar el árido reciclado va a depender de factores como: (i) la calidad del hormigón original del que procede (Marinković, Radonjanin et al. 2010, Padmini, Ramamurthy et al. 2009, Rahal 2007, Tabsh, Abdelfatah 2009), casi siempre desconocida, así como los datos correspondientes a su dosificación, su historial físico y mecánico, y el ambiente al que ha estado expuesto durante su vida (Oikonomou 2005); (ii) la variabilidad de material que a diario entra en las plantas de reciclado (Mas, Cladera et al. 2011); (iii) de las técnicas de procesamiento empleadas en la planta de reciclaje (Sánchez de Juan, Alaejos Gutiérrez 2005). Como consecuencia de ello, se puede afirmar que el árido reciclado no va a presentar una homogeneidad y uniformidad en sus características, lo que indica que se debe conseguir un nivel de control más intenso durante la fase de producción.

De los diferentes estudios consultados, algunos se han centrado en el estudio de las características químicas que presenta el árido reciclado (Sánchez de Juan, Alaejos Gutiérrez 2005, Sánchez de Juan, Gutiérrez Alaejos 2009, Sim, Park 2011), que se muestran como las más limitantes a la hora de verificar la idoneidad del mismo. Aunque en la mayoría de los casos las investigaciones hacen referencia a las características físicas y mecánicas (Agrela, Sánchez de Juan et al. 2011, Chakradhara Rao, Bhattacharyya et al. 2011, Chen, Yen et al. 2003, Corres Peiretti 1997, González-Fontebao, Martínez-Abella et al. 2012, Martín-Morales, Zamorano et al. 2011, Oikonomou 2005, Rahal 2007, Sagoe-Crentsil, Brown 1998, Sánchez de Juan, Alaejos Gutiérrez 2006, Sani, Moriconi et al. 2005, Tabsh, Abdelfatah 2009, Tam, Gao et al. 2009, Topçu, Şengel 2004, Xiao, Li et al. 2005) y, en menor medida, a la propia durabilidad del árido reciclado (Debieb, Courard et al. 2010, Evangelista, de Brito 2010, Levy, Helene 2004, Richardson, Coventry et al. 2011, Senthamarai, Manoharan et al. 2011).

Algunos autores atribuyen la menor calidad del árido reciclado a la debilidad que presenta en la zona de transición pasta-árido (Tam, Gao et al. 2005), pues si en un hormigón convencional esta zona es donde más atención se debe de prestar, para garantizar las mejores condiciones físicas, mecánicas y químicas del hormigón, en un hormigón elaborado con árido reciclado el nivel de exigencia debe ser aún más elevado, ya que esta zona realmente está formada por dos (Tam, Tam 2008): la que formaba el antiguo árido con su pasta de mortero y la que conforma el árido reciclado con la nueva pasta de cemento, por lo que la estructura del hormigón reciclado es mucho más complicada que la de un hormigón convencional. Esa debilidad se atribuye a que el mortero de cemento remanente en el árido reciclado presenta pequeños poros y grietas que absorberán el agua de amasado, en detrimento de la que necesita el nuevo mortero para conformar la nueva zona de transición pasta-árido, afectando decisivamente a la resistencia del hormigón que se elabore con ellos. Es por lo que estos investigadores proponen un método de premojado del árido reciclado en dos pasos (Tam, Tam 2008, Tam, Gao et al. 2005, Tam, Tam et al. 2007). En el primer escalón del mezclado de los componentes se emplea la mitad del agua necesaria para conformar la mezcla, de manera que se permite la formación de una delgada capa de lechada de cemento en la superficie del árido reciclado, que penetra en los poros del antiguo mortero rellenando todos los poros y fisuras (Este fenómeno se ha visto corroborado por el

estudio realizado en probetas examinadas a microscopio electrónico SEM). En un segundo estadio del proceso de mezclado se añade el resto del agua de mezclado hasta completar el proceso. En consecuencia se consigue mejorar notablemente la nueva zona de transición pasta-árido y por tanto su comportamiento mecánico.

Contrariamente a la opinión de la mayoría de los investigadores en la materia, existen algunos estudios que indican que la calidad del árido reciclado mejora con la presencia del mortero adherido. Cuestión que se ha demostrado mediante diversas técnicas de evaluación microestructurales, que van más allá de la normativa específica para áridos, como la microscopía de fluorescencia o el análisis de imagen, que indican que el procesamiento del árido reciclado alteraría microestructuralmente su estado superficial provocando una mejora de sus propiedades (Nagataki, Gokce et al. 2004). Esta opinión resulta en total consonancia con lo aportado por distintos autores (Corinaldesi, Moriconi 2009, Corinaldesi, Moriconi 2009, Evangelista, de Brito 2007, Katz 2003) que defienden la contribución resistente que aporta el cemento presente en el mortero adherido a la nueva pasta de cemento.

Por otra parte, una de las grandes deficiencias en cuanto a la calidad de los áridos reciclados defendida unánimemente por todos los investigadores en la materia, es el contenido en sustancias químicas perjudiciales, de entre los que destaca ampliamente, por su grado incumplimiento y peligrosidad para el hormigón endurecido, el contenido en compuestos de azufre, cuya presencia se debe a la gran cantidad de productos a base de yeso que se utilizan en la construcción de edificios (Tam 2008). Al objeto de evitar las posibles reacciones expansivas que pueden provocar estos compuestos al contacto con ciertos componentes del cemento, se prohíbe la utilización de la fracción fina en los áridos reciclados, ya que en ella las partículas de yeso no se aprecian como en la gruesa. No obstante, algunos autores recomiendan la limpieza manual (Collins 2003, Corinaldesi, Giuggiolini et al. 2002, Tam, Le 2007) y el tamizado previo a la trituración de los RCD (Jiménez, Agrela et al. 2011), que aunque no consigan la eliminación total de estos compuestos, al menos la minoran considerablemente. Por lo que, según lo intensivo del tratamiento previo de selección que se le administre al residuo de construcción y demolición, el producto que se obtendrá contará con unas características más o menos depuradas y su aplicación podrá ser de mayor o menor responsabilidad.

Desde el punto de vista físico, una de los parámetros que más afectan a la calidad del árido reciclado es su capacidad de absorción al agua. Siendo este parámetro uno de los mayores inconvenientes que presenta a la hora de la elaboración de morteros y hormigones, llegando a provocar un descenso considerable de su resistencia (Tam, Le 2007). En algunos casos este problema de la mayor capacidad de absorción se ha conseguido aminorar con el empleo de aditivos superplastificantes que reducen considerablemente la relación agua/cemento, alcanzándose resistencias mecánicas en el hormigón similares a las obtenidas con los elaborados con árido natural (Richardson, Coventry et al. 2009, Zaharieva, Buyle-Bodin et al. 2004). Sin embargo, en la mayoría de las ocasiones los autores han planteado la necesidad de mojarlo en un proceso previo a su utilización

(Richardson, Coventry et al. 2011), consiguiendo que, al encontrarse parcial o totalmente saturados los áridos, no les resten el agua de amasado al cemento y se obtengan hormigones de mayor resistencia mecánica y durabilidad (Barra de Oliveira, Vazquez 1996, González-Fonteboa, Martínez-Abella et al. 2012).

Corinaldesi y Moriconi encontraron que los hormigones elaborados con áridos reciclados premojados sufrían una retracción por secado a 90 días menor que en los elaborados con árido natural. La razón que expusieron, en consonancia con la de otros autores (Bentur, Igarashi et al. 2001, Lura, Bisschop 2004, Zhutovsky, Kovler et al. 2004), radica en el curado interno que se va produciendo en tanto que el árido reciclado va liberando poco a poco el agua necesaria para producir ese autocurado. Efectivamente otros autores han corroborado que a la edad de 90 días la retracción del hormigón reciclado es menor, pero a cortas edades puede llegar a ser hasta 6 veces superior a la de un hormigón convencional (Debieb, Kenai 2008) y se producirá más retracción cuanto mayor sea la absorción del árido reciclado y más elevada sea su presencia en el hormigón (Domingo-Cabo, Lázaro et al. 2009).

4.2.5.1.3. Influencia de la composición del árido reciclado en el comportamiento del hormigón estructural

En la elaboración de hormigón reciclado con fines estructurales, prácticamente ninguna normativa técnica admite el uso de un árido reciclado de procedencia distinta a la trituración de residuos de hormigón. Alguna excepción se puede encontrar en las normas alemana, italiana, noruega y suiza (DIN 4226-100 2002, NB 26 2003, Ministero delle Infrastrutture 2008, OT 70085 2000, SIA bulletin MB 2030 2010) que podrían considerar el empleo de áridos mixtos, casi siempre controlando escrupulosamente la cuantía en la dosificación de este tipo de materiales granulares. En otros casos, áridos reciclados mixtos y cerámicos podrían ser utilizados en la confección de hormigones sin misión estructural, condicionando la cantidad adoptada, más que a las limitaciones normativas, a las buenas prácticas del productor en función de los elementos no estructurales que desee obtener.

En este sentido han avanzado los estudios de destacados investigadores, encontrándose resultados muy favorables para el uso de materiales granulares reciclados de procedencia distinta al hormigón.

Cuando se sustituye el árido natural por árido cerámico se observa un aumento en la resistencia del hormigón reciclado respecto del convencional. Algunos autores lo atribuyen a la capacidad de autocurado del material cerámico, que por su alta absorción de agua al mojarlo previamente a su dosificación, no sólo no le resta humedad a la pasta de cemento, sino que la que posee la va cediendo conforme a las necesidades de hidratación y curado que experimenta el cemento en las primeras edades. En este sentido, Sentharamai y Manoharan (Senthamarai, Devadas Manoharan 2005) han estudiado la posibilidad de utilización de los residuos procedentes de los rechazos de la industria dedicada a la fabricación de productos cerámicos de arcilla cocida en la elaboración de hormigón, convenientemente triturados en forma de árido grueso. Como resultado de este

estudio se ha podido comprobar que las propiedades que le confiere al hormigón, en relación a su capacidad mecánica, son comparables a las obtenidas con un hormigón convencional, además de mejorar notablemente la trabajabilidad y cohesión del mismo en estado fresco. Estos autores lo justifican en la superficie del árido obtenido que al ser más lisa y porosa que la del árido convencional, mejora notablemente la unión con el mortero que lo rodea.

La bondad del material cerámico en la fabricación de hormigón como sustituto ya no sólo del árido, sino del cemento, ha sido estudiada recientemente por Pacheco-Torgal y Jalali (Pacheco-Torgal, Jalali 2010). Estos autores han demostrado la capacidad puzolánica que presentan los finos procedentes de la arcilla de los materiales cerámicos, consiguiendo que con un 20% de sustitución del cemento por árido reciclado cerámico, y a pesar de la pérdida de resistencia mecánica, cifrada en algo menos del 10%, se produzca un aumento notable en la durabilidad del hormigón endurecido.

Esta capacidad puzolánica atribuida a los finos cerámicos, queda patente también en la investigación de Ay y Unal (Ay, Ünal 2000) que admiten hasta un 35% de sustitución de material cerámico por cemento, así como en el trabajo de Silva et al. (Silva, Brito et al. 2009), en el que se incorporaron los finos cerámico para mejorar el rendimiento de morteros. La mejora resultó considerable en tanto que todas las características de los morteros se vieron favorecidas. Mientras que el efecto filler queda patente sobre todo en el estado fresco, el carácter puzolánico se manifiesta en mayor medida en el endurecido. Por su efecto filler se mejoró la trabajabilidad y cohesión del mortero fresco con una densidad inferior al convencional, pero aumentando la del mortero endurecido, y por tanto su compacidad y resistencias mecánicas, mejorando la absorción y la permeabilidad al agua y al vapor de agua.

Corinaldesi et al. (Corinaldesi, Giuggiolini et al. 2002), en su trabajo sobre la elaboración de morteros con material procedente de demolición de edificios sin seleccionar, limpiar y cribar, admite la presencia de triturados de material cerámico aunque aporten una menor resistencia y durabilidad, con la confianza de que el polvo cerámico puede sustituir a parte del cemento aportando sus propiedades puzolánicas. En investigaciones posteriores estudiaron el comportamiento resistente y reológico de morteros de cemento elaborados con tres tipos distintos de áridos reciclados, procedentes de la trituración de prefabricados de hormigón, de ladrillos cerámicos y de residuos de construcción y demolición (Corinaldesi, Moriconi 2009). Los resultados arrojados mostraron que la resistencia mecánica de los morteros reciclados era menor que la de los preparados con arena natural, pero la resistencia de la interfase pasta árido reciclado resultó mayor, particularmente en los morteros elaborados con árido reciclado procedente de residuos de construcción y demolición. Abundando en ello, la autora utiliza la arena reciclada para estudiar su bondad en morteros de albañilería, observando que la fuerza de adhesión y la resistencia cortante de la unión con la fábrica es mayor que en morteros elaborados con arena natural. En base a estos estudios concluye que los morteros reciclados, por sus características

mecánicas y elasticidad, resultan de particular interés en el caso de zonas de actividad sísmica (Corinaldesi 2009).

Otra de las bondades que presenta el material cerámico utilizado como árido reciclado en la elaboración de hormigón, es que se ha encontrado su efectividad en minimizar la expansión debida a la reacción árido-álcalis (Turanli, Bektas et al. 2003).

Una propuesta interesante es la realizada por Medina et al. (Medina, Sánchez de Rojas et al. 2011) que emplearon residuos de cerámica sanitaria como árido grueso reciclado en hormigones ecoeficientes. Este tipo de material granular difiere considerablemente en su comportamiento respecto del material cerámico tradicional. Es un material que presenta una alta compacidad y por lo tanto, por su casi nula capacidad de retener agua, se asimila más bien al árido natural que a cualquiera de los áridos reciclados estudiados. El resultado conseguido fue un hormigón con comportamiento mecánico mejorado atribuido a una zona de transición pasta-árido más compacta que en el hormigón convencional.

En consecuencia el árido reciclado procedente de material cerámico se perfila como un posible sustituto del árido natural en la elaboración de hormigones y morteros, aportándoles unas características tanto en estado fresco como en el endurecido similares, e incluso en algunos casos, mejores que las que le confiere el árido natural tradicional. Por lo que se puede afirmar que el material cerámico no compromete ni la resistencia ni la durabilidad del hormigón. Según Jones et al. (Jones, Soutsos et al. 2004) es posible incluso conseguir hormigón con una resistencia de al menos 7MPa usando un porcentaje de sustitución del 100% de ladrillos triturados.

El árido reciclado obtenido de la trituración de los residuos de canteras de mármol también se ha utilizado en la fabricación de hormigón como sustituto de las fracciones arena, grava o del total del árido empleado en la formulación con resultados en cuanto a resistencias mecánicas conforme a las estandarizadas (Hebhoub, Aoun et al. 2011).

Binici et al. (Binici, Shah et al. 2008) encontraron una mejora notable en la durabilidad así como en las propiedades físico-mecánicas del hormigón reciclado en comparación con las de un hormigón convencional, cuando utilizaron árido grueso procedente de mármol y granito en la fabricación del mismo.

El mármol, triturado a tamaño de polvo, ha verificado su viabilidad como sustituto del filler para la obtención de mezclas de hormigón autocompactante, resultando en algunos casos de resistencias mecánicas mejoradas (Alyamaç, Ince 2009, Corinaldesi, Moriconi et al. 2010) y en otros disminuidas (Topçu, Bilir et al. 2009) sin que en ninguno de ellos se vea afectada la trabajabilidad, que es uno de los parámetros fundamentales que se pretenden conseguir en este tipo de hormigones. En estado de polvo, se ha estudiado como sustituto parcial del cemento, llegándose a mejorar las propiedades mecánicas del hormigón reciclado (Ergün 2011).

Finalmente, y ante la dificultad de que el árido reciclado alcance la suficiente calidad como para sustituir completamente al natural y obtener hormigones que cumplan los requisitos físicos, mecánicos y de durabilidad exigidos, algunos autores han considerado la incorporación de otros componentes con el objetivo de mejorar la calidad de los mismos. En unos casos se han utilizado productos que tradicionalmente se han adicionado como material suplementario al cemento portland en el hormigón o incluso en la propia fabricación de cemento (Atiş 2003).

En este sentido se pueden localizar bibliográficamente diversos trabajos al respecto de la incorporación de adiciones convencionales con el objetivo de mejorar la calidad del hormigón reciclado conseguido.

Con la incorporación de metakaolin y escoria granulada se ha conseguido una notable mejora en las resistencias y durabilidad, atribuida a sus conocidas capacidades puzolánicas (Khatib, Wild 1996, Khatib, Wild 1998, Wild, Khatib et al. 1996, Wild, Khatib 1997).

La escoria granulada y la ceniza volante actúan en estado fresco aumentando la trabajabilidad y reduciendo la permeabilidad y porosidad del hormigón en el endurecido, por lo que se consigue una mejor protección frente a la reacción árido-álcali y a la difusión de ion cloro (Sim, Park 2011) y aunque, ciertamente, bajan las resistencias iniciales, las mejoran a largo plazo (Aldea, Young et al. 2000, Berndt 2009, Bijen 1996, Limbachiya, Meddah et al. 2012, Park, Noh et al. 2005, Song, Saraswathy 2006).

La sustitución de los finos que contiene el árido reciclado por cenizas volantes es una solución que aporta Sri Ravindrarajah y Tam (Sri Ravindrarajah, Tam 1987) para mejorar el comportamiento mecánico del hormigón reciclado a largo plazo. Esta alternativa de dosificación propuesta conseguiría mitigar el efecto de los finos reciclados, en cuanto al hecho constatado de su influencia en el descenso en el módulo elástico o el aumento de la fluencia y retracción que se produce en el hormigón fabricado con ellos.

Se ha comprobado que, como en el caso del hormigón convencional, la adición que más resistencias mecánicas aporta al hormigón reciclado, sola o en combinación con la ceniza volante, es el humo de sílice (Corinaldesi, Moriconi 2009, González-Fonteboa, Martínez-Abella 2008, González-Fonteboa, Martínez-Abella et al. 2009, Tam, Tam 2008). Este producto granulado a base de microesferas actúa, además de por sus propiedades puzolánicas, como filler, sirviendo de elemento de relleno de los poros y grietas que presenta el árido reciclado (Tam, Tam 2008), mejorando notablemente la débil zona de transición entre el árido reciclado con el nuevo mortero de cemento (Xuan, Shui et al. 2009).

Finalmente, en otros casos se ha conseguido una mejora en el comportamiento físico-mecánico y en la durabilidad de las pastas de hormigón con la adición de fibras. Mesbah y Buyle-Bodin (Mesbah, Buyle-Bodin 1999), en este sentido, experimentaron el control de la retracción por secado y la fisuración producida en

morteros elaborados con árido reciclado que absorbe una gran cantidad de agua durante en amasado, mediante la adición de fibras de polipropileno y metálicas.

4.2.5.2. Utilización de los residuos de construcción y demolición en ingeniería civil

El árido reciclado procedente de residuos de construcción y demolición también se viene utilizando en trabajos de ingeniería civil, más concretamente en el área de carreteras. Este producto se ofrece como un material granular alternativo atractivo para la ejecución de bases y subbases de carreteras, pues los estudios consultados han demostrado el buen comportamiento mecánico que se consigue en las capas compactadas, favorecido, a diferencia de ciertos materiales naturales, por su carácter no expansivo (Melbouci 2009). A pesar de la variable calidad que presentan los áridos reciclados, que dificulta considerablemente el control de la obra ejecutada (Leite, Motta et al. 2011), el comportamiento mostrado es mejor incluso que en el caso de mezclas convencionales (Wong, Sun et al. 2007). En este sentido, Shen y Du (Shen, Du 2004) abundan además en la baja deformación permanente que aporta el árido grueso reciclado en estas aplicaciones, atribuida al aumento de la fricción interna entre las partículas que presentan numerosas caras de fractura.

Uno de los condicionantes principales que presentan 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. Engelsen et al. (Engelsen, van der Sloot et al. 2009, Engelsen, van der Sloot et al. 2010, Engelsen, Wibetoe et al. 2012) han estudiado este parámetro encontrando que en el árido reciclado es mayor que en el natural por la cantidad de mortero adherido de alta alcalinidad (Limbachilla, Marrochino et al. 2007). Barbudo et al. (Barbudo, Agrela et al. 2012) lo atribuyen a los sulfatos presentes en el árido reciclado asociado a los productos a base de yeso que acompañan al material de albañilería, cuya limitación vendría impuesta en la regulación técnica, más que por el respeto medioambiental, por los problemas estructurales que conlleva su lixiviación. A pesar de ello, en dos de sus investigaciones (Galvín, Ayuso et al. 2012, Galvín, Ayuso et al. 2012) concluyen que la mayor parte del árido reciclado se puede clasificar según la Decisión del Consejo 2003/33/EC (Decisión del Consejo 2003/33/EC de 19 de diciembre de 2002 2003) como inerte o, en algún caso, como no peligroso.

En el campo de los trabajos de ingeniería civil, a diferencia de lo estudiado para los hormigones estructurales, cuya experimentación prácticamente no ha salido de los ensayos de laboratorio, se ha llegado más allá, diseñando y ejecutando tramos de prueba reales con este material granular. Este es el caso de los trabajos elaborados por un grupo de investigación del Departamento de Ingeniería de Construcción de la Universidad de Córdoba (Galvín, Ayuso et al. 2012, Jiménez, Agrela et al. 2011, Jiménez, Ayuso et al. 2012) que vienen desarrollando su investigación en la utilización de árido reciclado procedente de residuos de construcción y demolición seleccionados. En su estudio sobre el comportamiento de este material en la ejecución de caminos rurales sin pavimentar, llegaron a la conclusión de que el árido reciclado es un aceptable material para estos fines,

teniendo especial consideración con los problemas de lixiviación debido al contenido en algunos metales, y fundamentalmente por la cantidad de sulfatos que aporta el material cerámico debido a los yesos provenientes de estucos, enlucidos o paneles de yeso laminado (Barbudo, Galvín et al. 2012).

Estos mismos autores (Barbudo, Agrela et al. 2012, Jiménez, Agrela et al. 2011, Jiménez, Ayuso et al. 2012) han estudiado el comportamiento del árido reciclado como subbase en carreteras, destacando su viabilidad de uso, excepto en algunos casos en los que el árido reciclado presenta sus puntos débiles con más vehemencia. Junto al consabido problema en cuanto a los sulfatos que aporta el árido reciclado, la menor resistencia a la fragmentación los hace más vulnerables ante las aplicaciones específicas para obras de carreteras contempladas en el Pliego PG-3, para lo cual debería mejorarse el tratamiento en planta y la selección en origen. Con sus trabajos en esta aplicación, llegan a la conclusión de que se puede utilizar un árido reciclado mixto en la ejecución de subbases de carreteras cuando el árido total no alcance un porcentaje en material cerámico superior al 25%. Es precisamente este material cerámico el que mejora la capacidad portante del sustrato, manifestándose en índices CBR muy por encima de los materiales naturales tradicionales. Su actividad mejoradora del comportamiento de las capas granulares se manifiesta en el propio proceso de compactación, que modifica notablemente la granulometría del material, confiriéndole una nueva trituración, lo que conduce a una mayor densificación de la capa compactada (Leite, Motta et al. 2011).

Así mismo, estudian el comportamiento del árido reciclado como bases y subbases en carreteras tratándolos con cemento en laboratorio (Agrela, Barbudo et al. 2012), corroborándolo con la ejecución de un tramo de prueba en la rampa de acceso a una autovía en la provincia de Málaga. De esta investigación se deduce que el árido reciclado tratado con cemento en la ejecución de subbases de carreteras es totalmente factible debido, fundamentalmente, a la densidad que alcanza durante su compactación por la presencia de material cerámico.

En otras investigaciones también se han realizado tramos de prueba. Así Herrador et al. (Herrador, Pérez et al. 2011) ejecutaron un acceso de la autovía A-367 a la A-357 en la provincia de Málaga cuya capa de base se ejecutó íntegramente con árido reciclado, en una proporción de 75% de hormigón, 20% de asfalto y 5% de material cerámico. En este caso se concluyó que el árido reciclado, a pesar de su mayor requerimiento en agua y su contenido en impurezas, consiguió la suficiente compactación como para alcanzar la adecuada capacidad portante requerida.

Portas (Portas 2004) experimentó con la utilización de árido reciclado como capa de subrasante en una carretera en Cerdeña (Italia), obteniendo igualmente resultados bastante aceptables para carreteras de tráfico bajo y medio.

La ejecución de tramos de prueba en las aplicaciones de obra civil está incluso constatada en los estudios prenormativos. Así, el estudio conducente a la investigación prenormativa elaborada por la sociedad Pública de Gestión Ambiental IHOBE (IHOBE 2011) ejecutó sendos tramos de prueba para comprobar

a escala real algunas características del árido reciclado relacionadas con su puesta en obra, su comportamiento mecánico y el riesgo asociado a su potencial lixiviación. Uno en un barrio, para estudiar la lixiviación, y otro en un vial de tráfico intenso. En la reciente Guía Española de Áridos Reciclados procedentes de RCD elaborada dentro del Proyecto GEAR (Proyecto GEAR 2012), se exponen como recomendaciones técnicas en obras de carreteras cuatro de las seis recomendaciones propuestas (ver apartado 4.5.7.1.), habiéndose realizado en todos los casos los correspondientes tramos de prueba que corroboran la viabilidad de aplicación de los áridos reciclados en dichas aplicaciones recomendadas.

Por su parte, Khaled y Krizek (Khaled, Krizek 1996) han demostrado que el árido reciclado se puede utilizar como capa de base en pavimentos de carreteras, si se estabiliza con un 4% de cemento y un 4% de cenizas volantes. Estos autores consideran que los buenos resultados se complican cuando el árido reciclado es usado sólo como material de base o subbase. La alta solubilidad en agua que poseen algunas de sus impurezas produce un alto impacto ambiental, que se traduce en el aumento del pH de las aguas subterráneas afectando a la vegetación de las zonas circundantes a la carretera ejecutada (Robinson, Menzie et al. 2004). Por lo que es factible el uso de este material en obras civiles no estructurales sin riesgo potencial para el medioambiente, siempre que el árido reciclado contenga menos de un 4.4% de yeso y menos de un 30% de material cerámico (Barbudo, Agrela et al. 2012, Barbudo, Galvín et al. 2012).

La capacidad portante de las capas compactadas, utilizando incluso el 100% de árido reciclado según Poon y Chan (Poon, Chan 2006, Poon, Qiao et al. 2006) está garantizada. A pesar de que con el grado de sustitución máximo se aumenta considerablemente la cantidad de humedad óptima, produciendo un descenso en la densidad máxima seca, el índice CBR de estos materiales granulares empleados en subbases de carreteras, aunque pueda resultar en algunos casos más bajo que el del material natural convencional, presenta valores por encima de 30, que es el mínimo de resistencia que se le exige por normativa en su país (Hong Hong).

Leite et al. (Leite, Motta et al. 2011) también han demostrado que el árido grueso reciclado se puede utilizar en la ejecución de bases y subbases de carreteras de bajo volumen de tráfico. No obstante, ha de prestarse especial atención a la deformación permanente que experimenta este material bajo cargas que, aunque menor que la que sufre el material tradicional, va a depender del nivel de esfuerzo. Por lo que, sobre todo cuando la capa asfáltica es delgada, el esfuerzo se transfiere a la base de material compactado provocando deformaciones mayores en las zonas donde es más intenso el tráfico rodado.

No sólo el árido reciclado es un material granular adecuado en la ejecución de capas compactadas. También se ha estudiado el efecto que tiene en mezclas asfálticas.

En este sentido estudios como los de Arabani y Azarhoosh (Arabani, Azarhoosh 2012) ponen de manifiesto cómo la composición del árido reciclado es totalmente

relevante en la calidad de las capas asfaltadas, ya que durante su mezclado y compactación se desprende el mortero adherido, que finalmente va a ser el responsable del empeoramiento de las características físicas y mecánicas que se le demandan a esta aplicación.

Paranavithana y Mohajerani (Paranavithana, Mohajerani 2006) por su parte, demostraron que las mezclas asfálticas que contienen árido reciclado poseen un módulo elástico y una fluencia inferior a las elaboradas con áridos naturales, creciendo ambos cuando el árido reciclado se emplea como filler (Wong, Sun et al. 2007). En este sentido Mills-Beale y You (Mills-Beale, You 2010) midieron el efecto de la sustitución del 25%, 35%, 50% y 75% de árido reciclado en mezclas bituminosas y comprobaron que ambos parámetros decrecían conforme aumentaba el porcentaje de sustitución, habiendo por tanto más posibilidad de fallo por roderas de la capa asfaltada. De acuerdo con estos autores, estos resultados se deben a la mayor absorción de agua y a la mayor facilidad de separación del mortero adherido que presenta el árido reciclado.

En cambio Pérez et al. (Pérez, Pasandín et al. 2012) al estudiar el uso de árido grueso reciclado exclusivamente en mezclas asfálticas en caliente en porcentajes de sustitución del natural del 20%, 40% y 60%, han encontrado que se cumplen las especificaciones de la técnica Marshall para carreteras de bajo volumen de tráfico, ofreciendo buena resistencia, incluso a la deformación permanente, con la desventaja de que presentan una insuficiente durabilidad por su susceptibilidad a la acción del agua.

Finalmente, la viabilidad de utilización del árido reciclado en la ejecución de hormigón compactado con rodillo ha sido estudiada por Debieb et al. (Debieb, Courard et al. 2009) que en su investigación sobre hormigón compactado con rodillo con áridos reciclados contaminados, mostraron que la cantidad de contaminantes de tipo cloruros o sulfatos en el árido reciclado no resultaría un condicionante en las propiedades físicas del hormigón para esta aplicación. Como en la mayoría de los casos no se requiere armadura, los cloruros no presentarían ningún inconveniente, no así en el caso de la presencia de sulfatos que podrían provocar expansiones adicionales por la formación de ettringita secundaria.

Se han encontrado estudios puntuales sobre la utilización de residuos industriales diferentes de los residuos de construcción y demolición en obras de carreteras. Así se ha constatado con el empleo del residuo de mármol en la fabricación de pavimentos flexibles y rígidos en aplicaciones comerciales, municipales e industriales como parkings, caminos pedestres y carreteras (Gencil, Ozel et al. 2012) y como filler en mezclas asfálticas (Karaşahin, Terzi 2007).

Interesante resulta la reutilización de residuos procedentes de la industria de SILESTONE en la fabricación de mezclas bituminosas para capas de rodadura en firmes de carretera (Rubio, Menéndez et al. 2011, Belmonte Sánchez 2009). Tanto en los trabajos de laboratorio como en el tramo de prueba ejecutado, se produjeron resultados en total consonancia con la normativa vigente,

encontrándose ventajas respecto de las mezclas bituminosas convencionales. Así, al sustituir la fracción gruesa natural por residuos de SILESTONE, se consigue un ahorro económico considerable en la producción, transporte y puesta en obra, ya que el material reciclado muestra una densidad menor al convencional, además de resultar más estables a las variaciones de betún y mejorar su comportamiento frente al agua. Como punto débil se encontró una menor resistencia mecánica de las capas de rodadura

4.3. Los residuos de construcción y demolición y la prefabricación

La prefabricación o fabricación antes de la puesta en obra (Revel, Jacobson et al. 1973), se entiende como la industrialización de la construcción (Aguilo Alonso, Fernández Ordóñez 1974), aplicando las técnicas de producción en instalaciones fijas de alto rendimiento, con elevados niveles de control y calidad, necesarios para conseguir excelentes acabados en las piezas y precios competitivos (Vaquero, Castro et al. 1996).

La prefabricación es un método industrial de producción de elementos en un recinto fabril para su posterior instalación o montaje en la obra. Esta técnica, que ha tenido un enorme desarrollo a nivel mundial, presenta claras ventajas cuando se requiere utilizar elementos repetitivos e industrializar las faenas de construcción, mejorando consecuentemente su productividad. Entre ellas destacarían la rapidez en la puesta en obra de los elementos prefabricados, la notable reducción en la producción de residuos y el ahorro de material en obra.

La industrialización de la producción fabril se ha visto condicionada, en su recorrido histórico, por la potencia de trabajo disponible. La potencia física del trabajador, ayudado por los animales de carga y tiro, y por la fuerza del agua, es la constante de trabajo durante la Edad Media, y hasta prácticamente la revolución industrial. En este momento la fuerza bruta queda sustituida por la mecánica de las máquinas de vapor y los engranajes, y recientemente se ha complementado con la potencia computacional, los dispositivos electrónicos y microchips desarrollados desde mediados del s. XX, en la que ha supuesto la segunda revolución industrial (Schey 2002). Estos avances históricos, no cabe duda, que han ido facilitado la consecución de unas mayores cotas de rendimiento y un menor coste de producción en los productos prefabricados, posibilitando, con la introducción de nuevos métodos tecnológicos, el desarrollo y la simplificación de los procesos constructivos (Mokk, Urcelay 1969).

Aunque al inicio de los procesos industriales de prefabricación las piezas obtenidas se podrían considerar de mediana calidad en cuanto a su capacidad portante, una vez estudiados la granulometría apropiada del árido, la correcta dosificación del cemento y el método de compactación adecuado, hoy en día se obtiene la prefabricación de productos de alta calidad (Revel, Jacobson et al. 1973), a los que al criterio de resistencia se le suma el de durabilidad (Roca, Aguado 1994).

A los beneficios técnicos de la prefabricación hay que sumarle dos beneficios económicos: por un lado el bajo precio de producción en la fabricación en serie y, por otro, los menores tiempos de ejecución de las obras con piezas prefabricadas, que se adaptan a unas determinadas modulaciones.

4.3.1. Recorrido histórico de la técnica de la prefabricación

Aunque el término de prefabricación se comenzó a utilizar a partir de la II Guerra Mundial fundamentalmente aplicado a los elementos fabricados a base de hormigón armado (Revel, Jacobson et al. 1973), desde la antigüedad el hombre ha resuelto constructivamente los lugares donde habitaba con elementos manufacturados mediante la aplicación de técnicas rudimentarias de premoldeo, que le permitían modular y racionalizar la tarea constructiva (Aguilo Alonso, Fernández Ordóñez 1974).

Haciendo un breve repaso histórico, según Aguiló Alonso et al (Aguilo Alonso, Fernández Ordóñez 1974), se podría decir que la prefabricación comienza en el año 3000 a.C. después del diluvio universal. A raíz del cambio climático se produjo la revolución neolítica, con el consecuente asentamiento de los pueblos en las regiones fértiles, haciéndose sedentarias y contemplando la importancia del levantamiento de elementos arquitectónicos dedicados a vivienda, defensa, culto y enterramiento. Debido a la escasez de piedra y madera, sobre todo en Egipto y Mesopotamia, se comenzó a construir con adobe, adoptándose un proceso de racionalización, en cuanto a materiales y métodos constructivos, para poder construir de manera más sólida, alcanzar mayor altura, más rápido y fácilmente. Las técnicas empleadas fueron desarrollándose hasta llegar a la fabricación del ladrillo conformado en moldes y cocido en hornos, lo que posibilitó su producción en serie, en factoría fija y a un coste bajo.

En la Grecia clásica del s.V, se introduce la modulación en la producción de piezas en serie que viene a resolver la problemática de la construcción, en cuanto a cálculo de los elementos, el proyecto y la perfección de montaje, que queda patente en todas las ruinas de sus templos que hoy en día conocemos. La mayor parte de los elementos que formaban los templos eran fabricados siguiendo procesos industrializados, lo que les permitió realizar infinidad de piezas iguales.

Durante la época del Imperio Romano, guiados por la practicidad y la eficacia organizadora y teniendo un amplio sentido de la utilidad y un gran conocimiento científico de la arquitectura, se creó la unificación de elementos constructivos, la estandarización de sus dimensiones y la producción en serie siguiendo un proceso protoindustrial. Su perfección les llevó a utilizar nuevos materiales, métodos y procesos. Crearon un hormigón mezclando agua, arena, guijarros y una especie de cemento para construir bóvedas aligeradas y morteros, como material de agarre de las piezas fabricadas en serie. El esplendor imperial sentó por tanto las bases de la prefabricación, tal y como la conocemos actualmente.

En la Edad Media las logias se organizaron como comunidades de artistas y artesanos empleados en la construcción de grandes iglesias y catedrales que, con

su sistema de jerarquización, consiguieron una especialización máxima y una perfecta coordinación en los trabajos. Las logias derivaron en gremios, cuando a finales del s. XIV los artesanos se asientan en las ciudades y se unen en asociaciones igualitarias de artesanos independientes. En el s. XV, con el Renacimiento, se produce una nueva revolución en la prefabricación, reconocida por el carácter racional y metódico que queda patente en todas las manifestaciones arquitectónicas. Este momento es el paso decisivo que supone el asentamiento de todas las bases ideológicas y la nueva concepción del mundo, que hace posible la futura revolución industrial.

Leonardo da Vinci fue uno de los precursores de la prefabricación cuando Francisco I de Francia le encargó la planificación de nuevas ciudades en la región de Loire, para lo cual proyectó un tipo básico de casa de vecindad, de gran simplicidad, pero flexible y susceptible de ser variada.

A finales del s. XIX la construcción de las “balloon frame”, o estructuras basadas en listones de madera ensamblada con las que se construían las casas rurales en Norteamérica, son también un claro ejemplo de la prefabricación.

La revolución industrial, con la introducción del trabajo organizado y la mecanización, saca a la palestra la noción de industrializar la construcción. En esos momentos, los arquitectos, ante el boom demográfico en las urbes, donde había una mayor concentración de fábricas, necesitaban llevar a la práctica sus ideas en cuanto a la nueva concepción del modelo de ciudad.

Desde los romanos no se volvió a utilizar el hormigón como material de construcción, hasta que en 1774 John Smeaton construyó el faro de Eddystone con una mezcla formada por cal viva, arcilla, arena y escoria de hierro en polvo, que utilizó para ejecutar los cerramientos y como mortero de agarre de otros materiales. Posteriormente se empleó en el relleno de forjados, recubriendo las armaduras de acero. No obstante, su primera utilización como material de prefabricación fue en 1867, cuando Monnier lo empleó para recubrir el entramado de alambres en la fabricación de maceteros.

A partir de este momento el hormigón surge como producto industrial en la prefabricación. En 1891 se prefabrican vigas de hormigón armado para la construcción del casino de Biarritz. En 1900 en EE.UU. se ejecutaron placas de gran tamaño para la ejecución de cubiertas. En estos momentos, arquitectos ingleses y americanos crearon viviendas totalmente prefabricadas para paliar el gran déficit de alojamiento, aunque no se llegaron a aprovechar como hubiese sido deseable.

Con el invento de Thomas A. Edison en 1908, de un sistema de cintas transportadoras que elevaban el hormigón a grandes moldes deslizantes, se comienzan a ejecutar viviendas prefabricadas en poco tiempo, no sin pocas dificultades prácticas por el elevado peso y el coste económico de su transporte. Grosvenor Atterbury fue mucho más pertinaz y, a tal efecto, creó paneles aligerados.

El desarrollo de la prefabricación en hormigón tuvo lugar como sustituto de la clásica y pesada piedra, e igualmente auspiciado por la carencia de otras materias primas tradicionales como la madera (Mokk, Urcelay 1969).

A principios del s. XX las primeras piezas que se fabricaron en serie en taller fueron los bloques de hormigón, utilizando bloqueras en las que la masa se compactaba a mano, cuya modulación atendía a los espesores tradicionales de pared realizados con el ladrillo cerámico tradicional. A partir de los años 20 se comenzaron a fabricar viguetas de hormigón armado y bovedillas en las que se utilizaron las primeras moldeadoras que compactaban por apisonado mecánico, suponiendo un avance notable en la ejecución de forjados de edificios, permitiéndose la prefabricación de grandes piezas como postes para líneas eléctricas, tubos de hormigón comprimido, cerchas o traviesas de ferrocarril (Vilagut 1975).

En los años 20 Albert F. Bemis, un industrial de Boston, motivado por su inquietud de racionalizar la construcción, llegó a investigar sobre 22 sistemas de elementos prefabricados conformados en madera, yeso y hormigón, estableciendo un método de modulación tridimensional, que fue recogido por la American Standards Association como base para la coordinación modular en la construcción. Actualmente el sistema de prefabricación americano, aunque no ha alcanzado el nivel tecnológico de los países nórdicos, cuenta con un abanico prestacional que ha dado lugar a una amplia utilización por parte de los proyectistas, incluso en edificios de gran altura y en zonas de alto riesgo sísmico (Roca, Aguado 1994).

En Europa fue la crisis de viviendas que se produjo tras la II Guerra Mundial la que llevó a adoptar soluciones prefabricadas con hormigón armado y sin armar. En Inglaterra la prefabricación surtió poco efecto, pues la sociedad demandaba viviendas ejecutadas al estilo tradicional. En los países nórdicos por el contrario, la transición de una sociedad eminentemente rural a urbana, aupada por el empeño del gobierno en reglamentar y dotar de calidad el proceso constructivo de viviendas prefabricadas, hizo que el sector de la prefabricación evolucionara rápidamente, de manera que hoy en día Dinamarca es uno de los países exportadores de tecnología de prefabricación (Roca, Aguado 1994). En Alemania, por la difícil situación económica, la prefabricación comenzó más tarde pero con mayores avances tecnológicos que posibilitaron mejores resultados. En Francia, arquitectos como Le Corbusier, con su estructura DOM-INO, Perret, Prouvé, Sauvage, Lods y Beaudoin experimentan, ya antes de la II Guerra Mundial, las posibilidades de la prefabricación en la construcción de viviendas. Pero fue en Rusia donde se produjo la verdadera revolución en adoptar soluciones encaminadas a la ejecución de viviendas prefabricadas en el menor tiempo posible, llegándose a levantar más de 200 grandes ciudades nuevas.

En el caso de España, en la década de los 60 se empiezan a introducir nuevas tendencias constructivas incorporando nuevos materiales, métodos y una mayor preocupación por el diseño arquitectónico, viéndose plasmada también en la

prefabricación que incorpora nuevos productos, como los bloques prefabricados, como alternativa a los cerámicos tradicionales (Bustarviejo Rodríguez 1994), o las primeras tejas de hormigón de fabricación española (Tascón Bayón, Marín Andrés 1994).

Según Roca y Aguado (Roca, Aguado 1994) este tipo de prefabricación resultaba excesivamente pesada y con la crisis de la construcción de los 70, unido a la aparición de nueva normativa, muy rigurosa con el aislamiento térmico, el sector de la prefabricación sufrió el cierre de muchas factorías. La nueva forma de prefabricación exigía que los fabricantes compitiesen en variedad y capacidad para satisfacer demandas pequeñas y diferenciadas, interesándose más por el material, desde el punto de vista de su calidad en forma de una mayor durabilidad, resistencia, perfección de acabados y estética, que únicamente en su deseable economía. (Roca, Aguado 1994)

El proceso prefabricatorio, por tanto, tal y como lo entendemos hoy día, responde a dos momentos clave: la II Guerra Mundial y la técnica del pretensado y postensado, pero siempre buscando la racionalización y la modulación en el proceso constructivo.

La II Guerra Mundial marcó el inicio de la industrialización en la prefabricación, tanto por las necesidades marcadas al finalizar la guerra, ante la urgente reconstrucción de los edificios e infraestructuras destruidas, como por el perfeccionamiento en la maquinaria, ante la escasez de mano de obra. Lo que fue facilitado por los efectos coadyuvantes del avance en la tecnología del hormigón y las técnicas empleadas, y la competitividad en precio con respecto de los sistemas tradicionales, tanto por el coste de las piezas, como por la necesidad de emplear menos mano de obra (Vilagut 1975). La industrialización en la prefabricación no sólo lo supuso un gran avance a nivel de fabricación, sino que también contribuyó, en buena medida, en la utilización de los medios mecánicos necesarios para la puesta en obra de las piezas prefabricadas.

Con la aparición de las técnicas de pretensado y postensado, cuya primera patente data de 1920 por el ingeniero francés Eugène Freyssinet, se permitió una notable reducción en el peso propio de los elementos prefabricados que comenzaron a ser utilizados en la construcción, lo que supuso otro notable avance en el sector de la prefabricación.

Finalmente, la prefabricación no podría haber tenido lugar sin el aporte del material que conforma los elementos prefabricados: el hormigón, que por sus características reológicas, es el adecuado para conformar piezas que demanden una estética, ya que se puede conformar en diferentes formas, dimensiones, acabados, texturas y colores. A ello se le suman las ventajas que presenta en cuanto a la resistencia mecánica, permitiendo incluso introducir elementos metálicos y fibras que la mejoren, además de la resistencia al fuego, el aislamiento térmico y acústico y la durabilidad. La prefabricación permite obtener estructuras tan monolíticas e indeformables como las hormigonadas in situ (Bustillo Revuelta

2008), que van desde piezas de tamaño reducido a grandes elementos que pueden conformar las estructuras de complejos edificios e infraestructuras.

4.3.2. Prefabricación con residuos de construcción y demolición

La industria española de prefabricación de elementos de hormigón, tanto en masa, como armado y pretensado, es una de las más desarrolladas del mundo, lo que se refleja, además de en la cantidad y diversidad de obras en las que se emplean todo tipo de elementos prefabricados de hormigón, en la participación de los empresarios españoles del sector en distintos foros internacionales. Esta actividad ha trascendido incluso a los comités europeos de normalización sobre prefabricación de hormigón, que haciéndose eco de las aportaciones de los fabricantes, han publicado una cantidad considerable de normas armonizadas (EN) relativas a productos prefabricados de hormigón (Vaquero, Castro et al. 1996).

La incorporación del árido reciclado a la industria de la prefabricación ha permitido el desarrollo de productos específicos con una razonable viabilidad técnica y económica.

La primera vez que introdujo árido reciclado procedente de residuos de construcción y demolición en la fabricación de productos prefabricados de hormigón fue en Alemania en 1860, donde se empleó el triturado de ladrillo, pero realmente su primer uso importante en forma de árido fue durante la reconstrucción tras la II Guerra Mundial (Debieb, Kenai 2008).

La utilización de árido reciclado en la elaboración de prefabricados de hormigón con fines no estructurales, aunque mucho menos que en otras aplicaciones, ha sido estudiada recientemente (Poon, Kou et al. 2002, Poon, Chan 2006, Poon, Lam 2008, Poon, Chan 2007, Poon, Chan 2007, Poon, Kou et al. 2009, Xiao, Ling et al. 2011, Xiao, Li et al. 2005). En la mayoría de los estudios consultados se observa que este material granular afecta a la capacidad resistente de los elementos fabricados, y a pesar de ello, los autores consideran que es viable su incorporación en cantidades controladas. Una de las prácticas habituales llevadas a cabo para suplir la merma resistente que se produce es aumentar el contenido en cemento del hormigón destinado a la elaboración de los prefabricados (Tam, Le 2007), aunque Soutos et al. (Soutsos, Tang et al. 2011) no son partidarios de ello, pues no haría competitivo el árido reciclado en el mercado de los prefabricados.

En este sentido, los estudios consultados se han desarrollado en la línea de establecer el porcentaje de sustitución de árido reciclado necesario para que fundamentalmente el comportamiento mecánico de los elementos prefabricados no se vea comprometido, dejando en un segundo plano la incidencia que química y físicamente pueda tener este material granular en este tipo de elemento prefabricados.

Así, Collins (Collins 2003) contempla la utilización de hasta un 75% de árido reciclado en la fabricación de bloques macizos de hormigón, tal y como se

desarrolló según el proyecto llevado a cabo en el Reino Unido por el grupo BRE. En dicho estudio se llegó a la conclusión de que la arena reciclada se debía sustituir por natural, pues los finos reciclados obstruían el proceso industrial. Por el contrario Soutos et al. (Soutsos, Tang et al. 2011) en su trabajo sobre bloques de hormigón fabricados con árido reciclado, concluyen que el nivel máximo de sustitución puede alcanzar el 60% en el árido grueso y el 20% del fino, sin detrimento de las resistencias mecánicas. Este porcentaje se puede incluso elevar hasta el 60% de sustitución para ambos tipos de áridos, cuando las piezas prefabricadas sean adoquines (Soutsos, Tang et al. 2011). La diferencia entre ambos tipos de piezas prefabricadas estriba en que los adoquines requieren de un mayor contenido en árido fino para conseguir un mejor acabado superficial.

Poon y Chan estudiaron el efecto de los contaminantes (Poon, Chan 2007) en las propiedades de los adoquines de hormigón preparados con árido reciclado (Poon, Chan 2006), concluyendo que aunque reducen sustancialmente la calidad del producto resultante, y por tanto limitan su utilización, se puede admitir hasta un 10% de contaminantes del tipo cerámicos, vidrio o incluso madera, en la fabricación de adoquines.

En otra propuesta de trabajo, Poon y Lam (Poon, Kou et al. 2002) admiten que con un porcentaje de sustitución entre el 25 y el 50% de árido natural por árido reciclado en la elaboración de bloques y adoquines de hormigón, la resistencia mecánica se ve poco afectada. Por ello defienden la postura de que una de las mejores formas de utilizar grandes cantidades de árido reciclado es en la elaboración de prefabricados no estructurales, ya que argumentan que el sistema de curado utilizado con vapor de agua en los primeros momentos contribuye a mejorar los aspectos resistentes negativos que aporta este tipo de árido (Poon, Lam 2008).

Mas et al. (Mas, Cladera et al. 2011) en su estudio sobre la influencia de la cantidad de árido reciclado en las propiedades del hormigón para uso no estructural concluyeron que es posible alcanzar el 40% de sustitución del árido grueso reciclado para que el conjunto del árido total cumpla con los requerimientos exigidos por la normativa.

En relación al tipo de árido reciclado, varios autores han comprobado las prestaciones del árido procedente de la trituración de material cerámico. Así, Cachim (Cachim 2009) incorporó material cerámico procedente de ladrillos triturados en el hormigón, afirmando que es posible su utilización en la elaboración de prefabricados de hormigón. Los trabajos se desarrollaron en el estudio de las propiedades en estado fresco y endurecido de un hormigón sustituyendo un 15% y un 30% de árido natural por árido reciclado cerámico y empleando relaciones agua/cemento de 0.45 y 0.5.

Debieb y Kenai (Debieb, Kenai 2008), por su parte, han fabricado hormigón con ladrillos triturados al objeto de estudiar su comportamiento físico y mecánico, llegando a la conclusión de que con unos porcentajes de sustitución de como máximo un 25% de árido grueso y un 50% de árido fino, se obtiene un hormigón

de calidad mínima que puede ser utilizado en aplicaciones de bajo nivel de compromiso, tales como hormigón no estructural, adoquines para pavimentos y prefabricados no estructurales.

En la industria de la prefabricación incluso se ha llegado a emplear árido reciclado obtenido de la trituración de elementos prefabricados de rechazo en fábrica. Así en la investigación llevada a cabo por Marmash y Elliott (Marmash, Elliott 2000) se emplearon áridos reciclados de placas alveolares pretensadas que se trituraron en machacadoras de cono, impacto y mandíbulas, al objeto de comprobar la repercusión del sistema de trituración, y se dosificaron al hormigón reciclado en distintas proporciones. Como resultado se consideró que con hasta un 20% de sustitución de áridos fino y grueso reciclados se conseguían hormigones con mayor trabajabilidad que los elaborados con un árido convencional, alcanzándose similares resistencias y trabajabilidad cuando se llegaba hasta el 50% de sustitución.

El rechazo de la industria extractiva del mármol también se ha utilizado como árido reciclado en la elaboración de prefabricados no estructurales de hormigón. Gencil et al (Gencil, Ozel et al. 2012) han estudiado su uso en sustitución parcial del árido convencional para la fabricación de adoquines de hormigón, para lo cual emplearon dos tipos distintos de cemento. Como resultado observaron que la resistencia mecánica de los productos prefabricados decrecía considerablemente al aumentar el porcentaje de sustitución, por el contrario, la resistencia al hielo-deshielo y a la abrasión aumentaban.

En la fabricación de bloques de hormigón prefabricado también resultó menor la resistencia mecánica a medida que aumentaba el porcentaje de sustitución de arena convencional por arena de mármol (Uygunoğlu, Topcu et al. 2012).

El polvo de mármol se ha empleado recientemente como aditivo en la obtención de distintas mezclas para la elaboración de ladrillos industriales, con un efecto muy positivo en las resistencias físicas, químicas y mecánicas (Bilgin, Yeprem et al. 2012).

El campo de aplicación del árido reciclado, por tanto, queda aún supeditado a aplicaciones de media o baja responsabilidad, sobre todo en España donde a las plantas de reciclaje llega un residuo escasamente clasificado y se produce un árido reciclado de baja calidad cuyo precio, a pesar de ser bajo, es muy similar al que ofertan las canteras de áridos naturales. Por lo que, en tanto no se consiga un producto más competitivo técnica y económicamente, las posibles aplicaciones se reducen a aquellas de bajo nivel de compromiso como la fabricación de elementos prefabricados no estructurales (Debieb, Kenai 2008).

4.4. Marco legislativo de los residuos de construcción y demolición

La correcta gestión y utilización de los residuos de construcción y demolición ha de regirse por el marco normativo que previamente han debido establecer las administraciones, asesoradas por los entes implicados. En este sentido y ante la

problemática que suscita la producción de residuos, en los últimos años se ha venido desarrollando un proceso, tanto de legislación como de normalización técnica, que ha conformado el actual panorama sobre los residuos.

Antes de introducir el marco legal de los residuos de construcción y demolición, y para facilitar la comprensión de los objetivos que se contemplan en esta amplia normativa, se hace necesario poner de manifiesto los aspectos más significativos encontrados de la lectura de los documentos consultados.

Principalmente destaca que a nivel europeo no existe un marco legislativo específico en cuanto a los residuos de construcción y demolición, si bien es cierto que la regulación históricamente se ha venido refiriendo a los mismos como a uno de los existentes dentro de la tipología general establecida.

Resulta destacable igualmente que la actuación legislativa en materia de residuos ha evolucionado notablemente desde las primeras políticas, en las que el tratamiento concedido a los residuos basado exclusivamente en su eliminación, era el modelo de gestión de los mismos, hasta que, con la aparición del concepto de desarrollo sostenible, se comenzó a apostar por el estudio de los costes medioambientales y a exigir una mayor eficacia en los procesos productivos. Por tanto, desde que se promulga la primera Directiva en materia de residuos, 75/442/CEE (Directiva del Consejo 75/442/CEE 1975), hasta la última 2008/98/CE (Directiva 2008/98/CE 2008) y las correspondientes transposiciones a la legislación española, Ley 10/98 (Jefatura del Estado 1998) y Ley 22/2011 (Jefatura del Estado 2011), el sentir de la jurisprudencia ha pasado por tres estadios diferentes.

En un primer momento, durante la década de los 70 y 80 la prioridad de las Directivas se centraba en establecer el marco jurídico inicial que definiese el control y tratamiento de los residuos producidos en el entorno de la Comunidad Europea, indicándose la necesidad de desarrollar y ejecutar planes de acción territoriales. Durante este periodo en la Comunidad Europea no se hizo más que establecer el marco jurídico de los residuos.

Posteriormente, desde los años 90, y como ya se tenía claro cuál era la peligrosidad de los distintos tipos de residuos enmarcados en las Directivas promulgadas anteriormente, y por tanto se encontraban perfectamente clasificados, la prioridad era establecer las medidas encaminadas al fomento de la prevención en su generación, promoviendo las actividades de recuperación y reciclaje, y procurando la minimización de la eliminación en vertedero. En este sentido, aparece en la jurisprudencia española la primera Ley Marco de residuos, la Ley 10/98 (Jefatura del Estado 1998), como transposición de la Directiva Europea 91/156/CEE, y se comienzan a elaborar los primeros planes de gestión residuos de construcción y demolición, como el Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición 2001-2006 (Resolución 14 de junio de 2001). Estas mismas medidas preventivas son objeto de las actuaciones legislativas desarrolladas en las Comunidades Autónomas, destacando entre las que se encuentran en posiciones más aventajadas, Cataluña y Navarra, que en 1994

comienzan su andadura reguladora en materia de residuos de construcción y demolición, así como Galicia y Madrid, que lo hacen en 2002.

Actualmente, las políticas comunitarias en materia de residuos, y una vez que se encuentran perfectamente definidos los tipos y procesos de gestión de los mismos, con la Directiva 2008/98/CE (Directiva 2008/98/CE 2008), y su transposición a la jurisprudencia española, la Ley 22/2011 de residuos y suelos contaminados (Jefatura del Estado 2011), han tornado hacia el establecimiento de las medidas encaminadas a la prevención en su generación de cara a conseguir la protección del medio ambiente y la salud humana, y a contribuir a la lucha contra el cambio climático. Para ello, introducen como novedad, junto a los planes de gestión de residuos tradicionales, los novedosos programas de prevención de residuos. En este sentido se aprueba el actual plan de gestión, el II Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición 2007-2015 (Resolución 20 de enero de 2009), así como las actuaciones reguladoras en esta materia en el resto de Comunidades Autónomas. Destaca que hasta la fecha, no han desarrollado ni aprobado ningún tipo de regulación al respecto de los residuos de construcción y demolición las Comunidades Autónomas de Asturias, Murcia y La Rioja, y la Ciudad Autónoma de Ceuta.

A continuación se presenta una recopilación histórica de los principales textos legislativos que afectan a los residuos, con especial atención a los residuos de construcción y demolición objeto de esta Tesis Doctoral, por lo que sólo y exclusivamente se comentarán las aportaciones que los diferentes textos jurídicos hagan sobre este tipo de residuos. Así mismo, se enumeran la regulación existente en materia de vertederos e impacto ambiental sobre los que especialmente repercuten los residuos. Todo ello se realizará desde la perspectiva de los diferentes ámbitos de aplicación: europeo, nacional y el correspondiente a las Comunidades Autónomas.

4.4.1. Marco legislativo de residuos de construcción y demolición en la Unión Europea

La **Directiva 75/442/CEE** del Consejo, de 15 de julio de 1975, relativa a los residuos, establecía el marco inicial dentro del cual se ubicarán los residuos. Esta Directiva surgía por la necesidad existente de control y tratamiento de residuos generados en la Comunidad Económica Europea a partir de medidas concretas de actuación por parte de los Estados Miembros, en base al residuo de que se trate. Aunque la Directiva no definía los residuos de construcción y demolición, los categorizaba en su anexo I dentro del grupo Q16, que representaba el cajón desastre donde se incluían los que no se habían podido categorizar en las 15 categorías anteriores. Así mismo, la Directiva establecía las categorías correspondientes en las que se enmarcaban las operaciones de eliminación y valorización de residuos.

Desde el primer momento la política comunitaria en materia de residuos establece el "*principio de jerarquía*" en el proceso de gestión de los mismos con los cinco niveles característicos: la prevención, el reciclado, la reutilización, la valorización

y, excepcionalmente, la eliminación. Niveles que se han ido repitiendo a lo largo de este tiempo, en todas y cada una de las decisiones legisladoras que se han ido aconteciendo.

Otro de los puntos a destacar en esta primera Directiva es su empeño por instar a las autoridades competentes a establecer planes de gestión de residuos que se refieran a tipos, cantidades y origen de los residuos que deben valorizarse o, finalmente, eliminarse, basándose en el principio de “*quien contamina paga*”.

La **Directiva 78/319/CEE** del Consejo, de 20 de marzo de 1978, relativa a los residuos tóxicos y peligrosos, definía el concepto de “*residuo tóxico o peligroso*” como el “*residuo contenido o contaminado por las sustancias o materias que figuran en el anexo de la Directiva, de naturaleza, en cantidades o concentraciones tales que presenten un riesgo para la salud o para el medio ambiente*”. En la presente Directiva se insta a todos los Estado Miembros a tomar las medidas necesarias para asegurar que este tipo de residuos sean gestionados sin poner en peligro la salud humana ni perjudicar al medio ambiente. Además, la Directiva establecía que los residuos tóxicos o peligrosos serían gestionados por empresas autorizadas, que serán controladas consecuentemente por las autoridades competentes. En su único anexo figura una lista de 27 residuos tóxicos o peligrosos, algunos de los cuales, como el amianto, pueden estar presentes en los residuos de construcción y demolición.

En virtud de la Directiva 78/319/CEE y para establecer las medidas necesarias para vigilar y controlar los traslados transfronterizos, atendiendo a la protección de la salud humana y el medio ambiente, se adoptan la **Directiva 84/631/CEE** del Consejo, de 6 de diciembre de 1984, relativa al seguimiento y al control en la Comunidad de los traslados transfronterizos de residuos peligrosos, que es modificada en última instancia por la **Directiva 86/279/CEE**, del Consejo de 12 de junio de 1986 y por la **Resolución del Consejo, de 21 de diciembre 1988**, sobre traslados transfronterizos de residuos peligrosos hacia países terceros.

La **Directiva 85/337/CEE** del Consejo, de 27 de junio de 1985, relativa a la evaluación de las repercusiones de determinados proyectos públicos y privados sobre el medio ambiente. Esta Directiva, precursora de las actuaciones sobre el impacto ambiental, contempla como proyectos a la realización de trabajos de construcción o de otras instalaciones y obras.

La **Resolución del Consejo, de 7 de mayo de 1990**, sobre la política en materia de residuos de la Unión Europea, vista la comunicación de la Comisión sobre la Estrategia Comunitaria para la Gestión de los Residuos y las Directivas anteriormente mencionadas, considera que, ya que las medidas encaminadas a evitar la producción de residuos, el fomento del reciclaje y recuperación de los mismos y su eliminación segura no son suficientes, se hace necesario un sistema eficaz de gestión de los residuos que debiera promover la armonización de las medidas a escala comunitaria. Para ello reconoce la necesidad de crear un banco de datos comunitario sobre el volumen y tipo de residuos producidos, la

disponibilidad e instalaciones aprobadas de eliminación de vertidos y los métodos de tratamiento y eliminación final.

Considera que debe fomentarse el reciclaje y la reutilización de los residuos, siempre y cuando se lleve a cabo en condiciones aceptables, teniéndose en cuenta todas las implicaciones económicas, sociales y medioambientales, para lo cual considera la necesidad de establecer los planes de acción relativos a tipos de residuos específicos que proponía la Directiva 75/442/CEE relativa a los residuos.

Esta Estrategia Comunitaria se convierte, por tanto, en el motor que impulsará la generación de una serie de normativas y planes de actuación en materia de residuos, que a partir de ese momento se implementará en los distintos ámbitos nacionales, autonómicos, provinciales y locales.

La **Directiva 91/156/CEE** del Consejo, de 18 de marzo de 1991, por la que se modifica la Directiva 75/442/CEE relativa a los residuos, se promulga para establecer las modificaciones puntuales en los artículos 1 al 12.

La **Directiva 91/689/CEE** del Consejo, de 12 de diciembre de 1991, relativa a los residuos peligrosos, que deroga a la Directiva 78/319/CEE, consideraba que la normativa general aplicable a la gestión de los residuos contenida en la Directiva 75/442/CEE, modificada por la Directiva 91/156/CEE, también es de aplicación a la gestión de residuos peligrosos, y así lo hace constar en gran parte de su articulado. Así mismo, clasificaba los residuos peligrosos según su naturaleza o actividad que los genera, en 40 tipos diferentes, además de categorizar los constituyentes de los residuos en 51 clases (C1 a C51), y establecer la calificación de los residuos peligrosos en 14 niveles (H1 a H14).

La **Decisión 94/3/CE** de la Comisión, de 20 de diciembre de 1993, por la que se establece una lista de residuos de conformidad con la Directiva 75/442/CEE. Esta lista se conoce comúnmente como el Catálogo Europeo de Residuos (CER) y cubre todos los residuos, aunque no se destinen a operaciones de eliminación o recuperación.

La **Decisión 94/904/CE** del Consejo, de 22 de diciembre de 1994, por la que se establece una lista de residuos peligrosos de conformidad con la Directiva 91/689/CEE. Los distintos tipos de residuos contenidos en la lista están definidos por un código de 6 dígitos correspondiente a los residuos y por los títulos de los capítulos y subcapítulos de 2 y 4 dígitos, respectivamente.

La **Directiva 96/61/CE** del Consejo, de 24 de septiembre de 1996, relativa a la prevención y al control integrado de la contaminación. Establecía las medidas necesarias para prevenir y reducir la contaminación en las actividades industriales contempladas en su anexo I, entre las que se encuentra la gestión de residuos.

La **Decisión 96/350/CE** de la Comisión, de 24 de mayo de 1996, por la que se adaptan los Anexos IIA y IIB de la Directiva 75/442/CEE del Consejo relativa a los residuos.

La Estrategia Comunitaria sobre Residuos fue revisada en 1997 mediante la **Resolución de Consejo, de 24 de febrero de 1997**, sobre una Estrategia Comunitaria de Gestión de Residuos. En este momento se reconoce la creciente preocupación por el aumento de la producción de residuos, a pesar de los esfuerzos realizados, instando a los Estados Miembros a que se garantice la aplicación de la legislación vigente en aras de minimizar la eliminación de residuos y fomentar las operaciones de valorización de los mismos. Para ello destaca la necesidad de la producción periódica de datos y la mejora de la dimensión medioambiental de las normas técnicas.

Esta Estrategia Comunitaria aportó como novedad la introducción, junto al principio de “*quien contamina paga*”, el de “*responsabilidad compartida*”. Además se incita a profundizar en el Análisis del Ciclo de Vida (ACV) de los productos que con el tiempo serán residuos y a implementar los Sistemas de Gestión Medio Ambiental que favorezcan la prevención, recogida selectiva y aprovechamiento de los mismos.

La **Directiva 1999/31/CE** del Consejo, de 26 de abril 1999, relativa al vertido de residuos, que tiene por objeto prevenir o reducir los efectos ambientales negativos del vertido de residuos, establece los tipos de vertederos en función de los residuos que se admitirán, así como los procedimientos de autorización, admisión y coste de vertido de residuos, de explotación y cierre del vertedero. Aunque la Directiva no lo nombra expresamente, en ella se identifican los residuos de construcción y demolición como “*no peligrosos e inertes*” desde el punto de vista en el que no se encuentran entre los recogidos en el Anexo I de la Directiva 91/689/CEE, ni cumplen los requisitos de peligrosidad del Anexo III de la misma.

La **Decisión 2000/532/CE** de la Comisión, de 3 de mayo de 2000, que sustituye a la Decisión 94/3/CE y a la Decisión 94/904/CE, establece la lista armonizada de residuos. Esta lista europea de residuos deberá ser revisada periódicamente conforme a la Directiva 75/442/CEE. En esta lista los diferentes tipos de residuos se clasificarán mediante códigos de seis cifras para los residuos, y de cuatro y dos cifras para los subcapítulos y capítulos respectivamente. En el listado, conformado por 20 capítulos, aparecen los residuos de construcción y demolición, incluida la tierra excavada de zonas contaminadas, clasificados en el capítulo 17.

La **Decisión 2000/738/CE** de la Comisión, de 17 de noviembre de 2000, sobre el cuestionario para los Estados Miembros acerca de la aplicación de la Directiva 1999/31/CE relativa al vertido de residuos. El cuestionario constaba de 11 preguntas que debían cumplimentar los Estados miembros que servirían para la redacción del informe trianual que ha de elaborar la Comisión, según lo establecido en el artículo 15 de la Directiva 1999/31/CE.

La **Decisión 2001/118/CE** de la Comisión, de 16 de enero de 2001, por la que se modifica la Decisión 2000/532/CE en lo que se refiere a la lista de residuos, estableció una serie de modificaciones puntuales en los artículos 1 a 3 y en el anexo e índice de capítulos.

La **Decisión 2001/119/CE** de la Comisión, de 22 de enero, que modifica a la Decisión 2000/532/CE, por su parte, realiza análogas modificaciones puntuales en los artículos 1 a 3.

La **Decisión 1600/2002/CE** del Parlamento Europeo y del Consejo, de 22 de julio de 2002, por la que se establece el 6º Programa de Acción Comunitario en Materia de Medio Ambiente 2002-2012, plantea las directrices comunitarias en las que los Estados miembros han de basarse para configurar el marco normativo futuro.

El Programa establecía una serie de objetivos y metas medioambientales, entre los que destaca una mayor eficiencia en los recursos y una gestión de los mismos y de los residuos. Entre los objetivos prioritarios de actuación sobre el uso y la gestión sostenibles de los recursos naturales y los residuos, cabe destacar: la reducción global del volumen de residuos generados, la disminución de la cantidad de residuos destinados a su eliminación, el fomento de la reutilización y el reciclaje. Su consecución quedaría supeditada al desarrollo de una estrategia temática sobre el reciclado de residuos, a la revisión y desarrollo de la legislación sobre residuos, incluyendo expresamente a los residuos de construcción y demolición, así como al fomento de su cumplimiento.

El **Reglamento (CE) nº 2150/2002** del Parlamento Europeo y del Consejo, de 25 de noviembre, relativo a las estadísticas sobre residuos. Ante la necesidad de conseguir estadísticas comunitarias periódicas sobre la producción y gestión de los residuos procedentes de las empresas y hogares, para llevar a cabo un seguimiento de la aplicación de la política de residuos, se establece un marco para la elaboración de estadísticas comunitarias sobre la generación, recuperación y eliminación de residuos. Serán los Estados miembros y la Comisión los encargados de elaborar dicha estadística mediante encuestas, fuentes administrativas y procedimientos de estimación estadística.

A los 5 años de la entrada en vigor del Reglamento y posteriormente cada 3 años, estaba prevista la presentación del correspondiente informe al Parlamento Europeo y al Consejo sobre las estadísticas recopiladas y los datos se transmitirían a la Comisión Europea de Estadística Eurostat.

La **Decisión 2003/33/CE** del Consejo, 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 al anexo II de la Directiva 1999/31/CE.

La **Directiva 2006/12/CE** del Parlamento Europeo y del Consejo, de 5 de abril de 2006, relativa a los residuos, deroga a la Directiva 75/442/CEE. Tras las diversas modificaciones sufridas y para hacer más eficaz la gestión de los residuos en la Comunidad, se procede a unificar con ella la terminología sobre los residuos.

El **Reglamento (CE) No 1907/2006 del Parlamento Europeo y del Consejo de 18 de diciembre de 2006**, relativo al registro, la evaluación, la autorización y la restricción de las sustancias y preparados químicos (REACH), por el que se crea la Agencia Europea de Sustancias y Preparados Químicos, se modifica la Directiva 1999/45/CE y se derogan el Reglamento (CEE) n° 793/93 del Consejo y el Reglamento (CE) n° 1488/94 de la Comisión, así como la Directiva 76/769/CEE del Consejo y las Directivas 91/155/CEE, 93/67/CEE, 93/105/CE y 2000/21/CE de la Comisión.

El objeto de este Reglamento es el de garantizar un alto nivel de protección de la salud humana y del medio ambiente, incluido el fomento de métodos alternativos para evaluar los peligros que plantean las sustancias definidas en el Reglamento, entre las que se encuentran los residuos.

La **Directiva 2008/98/CE** del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de noviembre de 2008, sobre residuos y por la que se derogan las Directivas 2006/12/CE, 75/439/CEE, 91/689/CEE, establece las medidas destinadas a proteger el medio ambiente y la salud humana, mediante la prevención o la reducción de los impactos adversos de la generación y gestión de los residuos, la reducción de los impactos globales del uso de los recursos y la mejora de la eficacia de dicho uso.

La actual Directiva Marco de Residuos incorpora sustanciales novedades en materia de gestión de residuos, que marcarán el desarrollo legislativo en los Estados Miembros. Introduce un enfoque que tiene en cuenta no sólo la fase de residuo sino todo el ciclo de vida de los productos y materiales, y centra los esfuerzos en disminuir el impacto de la generación y gestión de residuos en el medio ambiente, reforzando así el valor económico de los residuos. Considera además que es importante favorecer la valorización de los residuos y la utilización de materiales valorizados a fin de preservar los recursos naturales.

En primer lugar, es importante tomar en consideración el art. 2 de esta Directiva, que establece una serie de exclusiones del ámbito de aplicación, entre la que cabe destacar por su directa relación con los RCD *“b) la tierra (in situ) incluido el suelo no excavado contaminado y los edificios en contacto permanente con la tierra”*; además de *“c) el suelo no contaminado y demás materiales en estado natural excavado durante las actividades de construcción cuando se tiene la certeza de que el material se utilizará a efectos de construcción en su estado natural en el sitio del que se extrajo”*.

En el terreno conceptual introduce y aclara una serie de conceptos fundamentales. Concretamente en el caso de los residuos de construcción y demolición, además de redefinir los conceptos que comprenden el nuevo principio de jerarquía: prevención, preparación para la reutilización, reciclado, valorización y eliminación, introduce por primera vez el término de subproducto como *“una sustancia u objeto, resultante de un proceso de producción, cuya finalidad primaria no sea la producción de esa sustancia u objeto”*, cuando vaya a ser utilizado

posteriormente sin necesidad de ser sometido a un proceso de transformación y su uso sea legal. En este sentido contempla la posibilidad de que un residuo deje su condición de residuo, por lo que los residuos de construcción y demolición, a efectos de esta Directiva podrían no tratarse como residuos sino como subproductos.

En cuanto a la actualización periódica de la lista de residuos establecida en la Decisión 2000/532/CE, de 3 de mayo de 2000, establece las medidas necesarias destinadas al efecto, incluyendo en la misma a los “residuos peligrosos”, y teniéndose en cuenta el origen y la composición de los residuos.

En materia de prevención de residuos contempla la elaboración de una serie de informes, acompañados de las correspondientes medidas necesarias, que presenten la evolución de la generación de residuos, el desarrollo de un plan de acción y el establecimiento de objetivos encaminados a la prevención para 2020. La Directiva introduce uno de los puntos fundamentales que la diferencian de las anteriores derogadas, y es el establecimiento, junto a los planes de gestión de residuos, el de los programas de prevención de residuos.

En cuanto a la reutilización y el reciclado establece como objetivo el aumento de hasta un 50% global de su peso, de la preparación para la reutilización y el reciclado de residuos cuyos flujos sean similares a los domésticos y, particularmente, de un 70% para los residuos de construcción y demolición.

En el capítulo de gestión de residuos se introducen los “*principios de autosuficiencia y proximidad*”, se prohíbe la mezcla de residuos peligrosos que deben ser etiquetados durante su recogida, transporte y almacenamiento temporal. Así mismo, se protocoliza el procedimiento de autorizaciones y registros que debe llevar a cabo las empresas gestoras de los residuos.

4.4.2. Marco legislativo de residuos de construcción y demolición en España

A nivel nacional, el ordenamiento jurídico español ha ido resolviendo diligentemente la transposición de las Directrices y Decisiones europeas en materia de residuos, e incluso se han promulgado regulaciones específicas, en cuanto a los residuos de construcción y demolición objeto de estudio, plasmadas en el desarrollo de los diferentes planes de gestión de los RCD, tanto nacionales como autonómicos. Son estos últimos los encargados de proveer de datos para dotar de contenido a los correspondientes planes nacionales, no obstante, en el sentir general de los agentes intervinientes, se expresa la falta de datos estadísticos reales que se han conseguido en cuanto a la producción y gestión de este tipo de residuos, a pesar del enorme tiempo y esfuerzo dedicado.

A continuación se expone, cronológicamente, el amplio listado histórico de los documentos reguladores en materia de residuos, vertederos e impacto ambiental en España, haciendo una breve descripción de aquellos que hacen especial alusión o tratan específicamente a los residuos de construcción y demolición.

Ley 42/1975, de 19 de noviembre, de recogida y tratamiento de residuos sólidos urbanos. En esta primera ley española de residuos se contemplaba la existencia de los residuos de construcción y obras menores de reparación domiciliaria.

Ley 20/1986, de 14 de mayo, básica de residuos tóxicos y peligrosos

Real Decreto Legislativo 1302/1986, de 28 de junio, de evaluación de impacto ambiental, en virtud de la Directiva 85/337/CEE del Consejo, por el que se regula el proceso administrativo de evaluación de impacto ambiental de los proyectos contemplados en los anexos I y II, como instrumento para la preservación de los recursos naturales y la defensa del medio ambiente. El Real Decreto además establece las medidas sancionadoras a aplicar según las infracciones cometidas.

Real Decreto 833/1988, de 20 de julio, por el que se aprueba el Reglamento para la ejecución de la Ley 20/1986, básica de residuos tóxicos y peligrosos. En este Real Decreto se contemplan las actividades que pueden generar residuos tóxicos y peligrosos, entre las que se encuentran la extracción de determinadas materias primas y la fabricación de productos de construcción.

Real Decreto 108/1991, de 1 de febrero, sobre prevención y reducción de la contaminación del medio ambiente producida por el amianto.

Resolución de 28 de abril de 1995, de la Secretaría de Estado de Medio Ambiente y Vivienda por el que se dispone la publicación del Acuerdo del Consejo de Ministros de 17 de febrero de 1995, por el que se aprueba el Plan Nacional de Residuos Peligrosos (1995-2000).

Real Decreto 952/1997, de 20 de junio, por el que se modifica el Reglamento para la ejecución de la Ley 20/1986, de 14 de mayo, básica de residuos tóxicos y peligrosos, aprobado mediante Real Decreto 833/1988, de 20 de julio, y que se promulga para incorporar la Directiva 91/689/CEE al ordenamiento jurídico español.

Ley 10/1998, de 21 de abril, de residuos, que transpone la Directiva 91/156/CEE del Consejo, fue realmente la primera Ley Marco española aplicable a todo tipo de residuos, con excepción de las emisiones a la atmósfera, los residuos radiactivos y los vertidos a las aguas, y surge para adecuar nuestro derecho al comunitario. Esta Ley deroga a la Ley 42/1975, de 19 de noviembre, de recogida y tratamiento de residuos sólidos urbanos.

En la Ley se indicaba la necesidad de promulgar regulaciones complementarias a los diferentes tipos de residuos, con la finalidad de establecer disposiciones particulares sobre su producción o gestión. Para ello preveía la elaboración de planes nacionales de residuos, que resultarán de la integración de los respectivos planes autonómicos de gestión, admitiendo la posibilidad de que las Entidades Locales pudiesen elaborar sus propios planes de gestión de residuos urbanos.

Actuando desde la prevención, planteaba como objetivo el establecimiento del régimen jurídico de la producción y gestión de los residuos, fomentando, por este orden, la reducción, reutilización, reciclado y valorización, con la finalidad de proteger el medio ambiente y la salud de las personas. Para ello, determinaba las obligaciones de los agentes intervinientes en el procesos de la producción y gestión de los residuos, así como las medidas económicas, financieras y fiscales adecuadas para conseguir fomentar la prevención, reutilización, reciclaje y valorización, y promover las tecnologías menos contaminantes para la eliminación de los residuos. Además, incluía los procesos de seguimiento, inspección y vigilancia, estableciendo la responsabilidad administrativa de los entes intervinientes y el régimen sancionador en caso de infracciones.

Resolución de 17 de noviembre de 1998 de la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental por la que se dispone la publicación del Catálogo Europeo de Residuos (CER) aprobado mediante la decisión 94/3/CE de la Comisión de 20/12/93.

Resolución de 13 de enero de 2000 de la Secretaria General de Medio Ambiente por la que se dispone la publicación del Acuerdo del Consejo de Ministro de 7 de enero de 2000, por el que se aprueba el Plan Nacional de Residuos Urbanos (PNRU) (2000-2006). Inspirado en los principios recogidos en la Ley 10/98, el PNRU tenía por objeto prevenir la producción de residuos, establecer su sistema de gestión y promover, por este orden, su reducción, reutilización, reciclado y otras formas de valorización. Sin contemplarlos expresamente, este Plan daba una consideración especial a ciertos residuos, como los RCD, que no considerándolos urbanos en sentido estricto, sí que reconocía que requieren de soluciones específicas por su propia peculiaridad.

Real Decreto Legislativo 9/2000, de 6 de octubre, que modifica el Real Decreto 952/1997, de 20 de junio, por el que se modifica el Reglamento para la ejecución de la Ley 20/1986, de 14 de mayo, básica de residuos tóxicos y peligrosos.

Ley 6/2001, de 8 de mayo, de modificación del Real Decreto Legislativo 1302/1986, de 28 de junio, de evaluación de impacto ambiental, transpone al ordenamiento jurídico español la Directiva 97/11/CE, de 3 de marzo de 1997 y a la Directiva 85/337/CEE, de 27 de junio.

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 2001-2006 (PNRCD), y se publica en el Boletín Oficial del Estado del 12 de julio de 2001.

Este Plan se elabora por indicación de la Ley 10/1998, de 21 de Abril, de residuos, y de la Directiva 75/442/CEE del Consejo, de 15 de julio de 1975, relativa a los residuos, derogada en última instancia por la Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de noviembre de 2008. Aunque no se trata de un documento normativo, resultó el primer paso dado por la

Administración del Estado para establecer una regulación en la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición.

En aquel momento se barajaban unas cifras de producción de RCD en España bastante altas. Las estimaciones en función de los pocos datos cuantitativos disponibles la situaban entre 520 y 760 kg/habitante.año, de los cuales el 75% serían escombros (material cerámico, hormigón, piedra y áridos) y el 25% restante, lo conformarían distintas proporciones de madera, vidrio, plástico, metales, asfalto, yeso, papel, basura y otros.

El Plan proponía actuar según el principio de jerarquía contemplado en la Ley 10/1998 de residuos, procediendo a primar, por este orden, la prevención, reutilización, reciclado, valorización energética y, finalmente, cuando no fuesen posibles los anteriores, el depósito en vertedero. Para ello establecía unos objetivos ecológicos, demasiado ambiciosos a tenor de los resultados del Plan, apoyados en unas medidas instrumentales que favoreciesen su consecución. Además, se contemplaban los principios de “*proximidad en el flujo de residuos*” y el de “*quien contamina paga*”.

El PNRCD proponía una dotación presupuestaria con fondos públicos y privados, al objeto de dotar de plantas de reciclaje, vertederos y centros de transferencia, así como para restaurar las zonas degradadas y los vertederos incontrolados, incluyéndose inversiones en investigación, desarrollo e innovación (I+D+I).

Finalmente, el Plan conminaba a las Administraciones públicas al seguimiento y cumplimiento de los objetivos del mismo, contemplándose revisiones cada dos años.

Como resultado de la aplicación del PNRCD se puede concluir que, si bien no se alcanzaron los objetivos fijados en cuanto a gestión de los RCD, sí que cabe resaltar el incremento de la iniciativa pública y privada en cuanto a la implantación de infraestructuras de tratamiento de RCD, tanto en plantas fijas y móviles, como de vertederos controlados.

Otro aspecto importante resultante de la aplicación del Plan, es que la implantación de tasas desincentivadoras del vertido han tenido un resultado muy heterogéneo, con tasas de vertido que varían sustancialmente incluso en zonas geográficas próximas y que evidencian un criterio desigual a la hora de establecer los cánones de depósito en vertedero, que en última instancia, no han favorecido las buenas prácticas del productor.

Real Decreto 1481/2001, de 27 de diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero, que transpone a la Directiva 1999/31/CE del Consejo de 26 de abril de 1999 relativa al vertido de residuos. En el Real Decreto se diferencian los distintos tipos de vertederos según los tipos de residuos, así como el procedimiento de autorización y admisión de los residuos en los mismos, contemplándose la implementación de un coste de vertido.

Orden MAM/304/2002, de 8 de febrero, y la corrección de errores de la orden MAM/304/2002, de 8 de febrero de 2002, por la que se publican las operaciones de valorización y eliminación de residuos y la Lista Europea de Residuos, aprobados, respectivamente, por las Decisiones comunitarias 94/3/CE, de la Comisión, de 20 de diciembre, y 94/904/CE, del Consejo, de 22 de diciembre.

Ley 16/2002, de 1 de julio, de prevención y control integrados de la contaminación, que realiza la transposición de la Directiva 96/61/CE del Consejo, de 24 de septiembre de 1996.

Ley 62/2003, de 30 de diciembre, de medidas fiscales, administrativas y del orden social, que modifica la Ley 10/1998, de 21 de abril, de residuos.

Real Decreto 9/2005, de 14 de enero, por el que se establece la relación de actividades potencialmente contaminantes del suelo y los criterios y estándares para la declaración de suelos contaminados.

Ley 9/2006, de 28 de abril, sobre evaluación de los efectos de determinados planes y programas en el medio ambiente.

Ley 26/2007, de 23 de octubre, de responsabilidad medioambiental, que regula la responsabilidad de los operadores de prevenir, evitar y reparar los daños medioambientales.

Ley 34/2007, de 15 de noviembre de 2007, de calidad del aire y protección de la atmósfera. Modifica la Ley 10/1998, de 21 de abril, de residuos de manera que obliga al poseedor de los RCD a separarlos por tipos de materiales. Esta Ley incluye en su anexo IV un catálogo de actividades potencialmente contaminadoras de la atmósfera, entre las que participan las actividades relacionadas con la gestión de los residuos.

Real Decreto 509/2007, de 20 de abril, por el que se aprueba el Reglamento para el desarrollo y ejecución de la Ley 16/2002, de 1 de julio, de prevención y control integrados de la contaminación.

Real Decreto Legislativo 1/2008, de 11 de enero, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de evaluación de impacto ambiental de proyectos. Deroga al Real Decreto Legislativo 1302/1986, de 28 de junio, de evaluación de impacto ambiental; el Real Decreto-ley 9/2000, de 6 de octubre, por el que se modifica el Real Decreto Legislativo 1302/1986, de 28 de junio, de evaluación de impacto ambiental; la Ley 6/2001, de 8 de mayo, por la que se modifica el Real Decreto Legislativo 1302/1986, de 28 de junio, de evaluación de impacto ambiental; el artículo 127 de la Ley 62/2003, de 30 de diciembre, de medidas fiscales, administrativas y del orden social; la disposición final primera de la Ley 9/2006, de 28 de abril, sobre evaluación de los efectos de determinados planes y programas en el medio ambiente.

Real Decreto 105/2008, de 1 de febrero de 2008, por el que se regula la producción y gestión de los residuos de la construcción y demolición, modifica al Real Decreto 1481/2001, de 27 de diciembre por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero.

Éste es realmente el primer texto que establece el ordenamiento jurídico, sólo y exclusivamente, de los residuos de construcción y demolición en España y lo hace desde el punto de vista del principio de prevención, dentro de la jerarquía de gestión de residuos, que emana de las Directrices europeas. El Real Decreto se aprueba después de los resultados fallidos de la aplicación del Plan de Residuos de Construcción y Demolición 2001-2006, en cumplimiento de la Ley 10/1998, de 21 de abril, de residuos, y ante el consenso general de todos los sectores afectados de la producción y gestión de residuos de construcción y demolición. Éste se promulga, fundamentalmente, por la necesidad perentoria de disponer de una normativa básica y específica que establezca el régimen jurídico para este tipo de residuos, con objeto de promover su prevención, reutilización, reciclado, valorización y el adecuado tratamiento de los destinados a eliminación.

Como sustanciales novedades aporta las definiciones fundamentales que van a marcar el ritmo de la norma, entre las que se pueden destacar:

- residuo de construcción y demolición, definido como *“cualquier sustancia u objeto que, cumpliendo la definición de «Residuo» incluida en el artículo 3.a) de la Ley 10/1998, de 21 de abril, se genere en una obra de construcción o demolición”*.
- residuo inerte como el *“residuo no peligroso que no experimenta transformaciones físicas, químicas o biológicas significativas, no es soluble ni combustible, ni reacciona física ni químicamente ni de ninguna otra manera, no es biodegradable, no afecta negativamente a otras materias con las cuales entra en contacto de forma que pueda dar lugar a contaminación del medio ambiente o perjudicar a la salud humana”*.
- obra de construcción y demolición es la *“actividad consistente en, la construcción, rehabilitación, reparación, reforma o demolición de un bien inmueble,..., así como cualquier otro análogo de ingeniería civil, o en la realización de trabajos que modifiquen la forma o sustancia del terreno o del subsuelo, tales como excavaciones, inyecciones, urbanizaciones u otros análogos”*.
- Productor de residuos de construcción y demolición, que será *“1.º La persona física o jurídica titular de la licencia urbanística en una obra de construcción o demolición; en aquellas obras que no precisen de licencia urbanística,..., la persona física o jurídica titular del bien inmueble objeto de una obra de construcción o demolición. La persona física o jurídica que efectúe operaciones de tratamiento, de mezcla o de otro tipo, que ocasionen un cambio de naturaleza o de composición de los residuos”*.

- Poseedor de residuos de construcción y demolición, como *“la persona física o jurídica que tenga en su poder los residuos de construcción y demolición y que no ostente la condición de gestor de residuos,..., la persona física o jurídica que ejecute la obra de construcción o demolición, tales como el constructor, los subcontratistas o los trabajadores autónomos”*.
- Tratamiento previo que es el *“proceso físico, térmico, químico o biológico, incluida la clasificación, que cambia las características de los residuos de construcción y demolición reduciendo su volumen o su peligrosidad, facilitando su manipulación, incrementando su potencial de valorización o mejorando su comportamiento en el vertedero”*.

En su sencilla estructura, el Real Decreto da total cobertura a la producción y gestión de los RCD. Para ello establece las obligaciones del poseedor, productor y gestor de los residuos de construcción y demolición, y el régimen de control de la producción, posesión y gestión de los mismos, basado en la constitución de una fianza u otra garantía financiera equivalente vinculada al otorgamiento de la licencia municipal. Asociadas a dichas obligaciones, contempla también las actividades de valorización, recogida, transporte y almacenamiento de los residuos que se generen en las obras de construcción y demolición, así como su eliminación mediante depósito en vertedero.

Es necesario subrayar cuáles son esas obligaciones impuestas. Entre las vinculadas al productor, se encuentra la redacción de un estudio de gestión de los residuos de construcción y demolición que se producirán en la obra, como documento del propio proyecto, que deberá incluir, entre otros, una estimación de su cantidad, las medidas genéricas de prevención que se adoptarán, el destino previsto para los residuos, así como una valoración de los costes derivados de su gestión que deberán formar parte del presupuesto del proyecto.

El poseedor, por su parte debe redactar un plan de la gestión de los residuos que se van a producir en la obra, que refleje cómo se va a llevar a cabo las actividades de gestión contempladas en el estudio de gestión de residuos. Además, está obligado a mantenerlos en adecuadas condiciones de higiene y seguridad, mientras estén a su cargo, a separarlos en fracciones, siempre que se superen unas determinadas cantidades de las diferentes fracciones y, en última instancia, a entregarlos a un gestor autorizado.

Finalmente el gestor debe llevar un registro en el que figuren, entre otras, el tipo de residuos codificados conforme a la lista europea de residuos, la cantidad en peso y volumen, los datos de los entes intervinientes en el proceso y de la obra, y los destinos finales de los residuos de construcción y demolición.

Real Decreto 1802/2008, de 3 de noviembre, por el que se modifica el Reglamento sobre notificación de sustancias nuevas y clasificación, envasado y etiquetado de sustancias peligrosas, aprobado por el Real Decreto 363/1995, de 10 de marzo, con la finalidad de adaptar sus disposiciones al Reglamento (CE) n° 1907/2006 del Parlamento Europeo y del Consejo (Reglamento REACH).

Real Decreto 2090/2008, de 22 de diciembre, por la que se aprueba el Reglamento de desarrollo parcial de la Ley 26/2007, de 23 de octubre, de responsabilidad medioambiental.

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 periodo 2008-2015 (PNIR), que incluye el II Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición (II PNRCD) 2007-2015, publicado en el Boletín Oficial del Estado de 26 de febrero de 2009.

La finalidad de este segundo Plan, ante el elevado grado de incumplimiento del anterior, es la de promover una política adecuada en la gestión de los residuos, disminuyendo su generación e impulsando un correcto tratamiento de los mismos, mediante la actuación sobre la prevención, principalmente, la reutilización, el reciclaje, la valoración y, dejando en último lugar a la eliminación.

Vistos los desiguales resultados obtenidos en el territorio español con la aplicación del anterior PNRCD, el actualmente vigente incide en tres puntos fundamentales: la erradicación de los vertederos incontrolados, los precios de vertido en los vertederos controlados y el fomento de la demanda de productos del reciclado de RCD, especialmente de áridos reciclados.

Este Plan toma como base principal los planes de las Comunidades Autónomas y de las Entidades Locales relativos a los RCD, así como el resultado del “Estudio sobre la generación y gestión de los residuos de construcción y demolición en España” publicado por el Ministerio de Medio Ambiente en 2006. Uno de los escollos a los que se enfrenta este Plan es que, al nacer cuando el sector de la construcción comienza su fase de decrecimiento, no prevé un dato cierto en la generación de RCD a medio y largo plazo. No obstante, se plantean una serie de objetivos, que en este Plan resultan ya más alcanzables, en cuanto al calado que la legislación ha venido produciendo en los entes participantes del proceso de gestión de los residuos, ya que ante la menor producción efectiva que se está produciendo, existen más recursos materiales y humanos dedicados a hacerlo bien.

El II PNRCD contempla la aplicación de instrumentos económicos, tanto fiscales como de mercado, aunque éstos últimos tienen poca adaptación al flujo de residuos. Los instrumentos fiscales, a través del establecimiento de cánones o impuestos, se pretenden utilizar para la orientación de los residuos hacia opciones prioritarias de gestión, por su capacidad para prevenir la generación de los mismos, aunque se entiende que son más eficaces las medidas conducentes a primar las conductas ambientales positivas. Por su parte, los instrumentos de mercado se orientan hacia la consecución de acuerdos voluntarios encaminados a la autorregulación.

Cualitativamente el Plan contempla como objetivos:

- La inclusión en los proyectos de obra de un estudio de gestión de RCD.
- La separación en origen de los RCD peligrosos generados en obra y su gestión de acuerdo a la legislación de residuos.
- La separación en planta de tratamiento de los residuos peligrosos contenidos en los RCD recibidos y su gestión de acuerdo a la legislación de residuos.
- La separación de los RCD en obra, por materiales, a partir de los umbrales establecidos en el Real Decreto 105/2008.
- El cumplimiento del artículo 13 del Real Decreto 105/2008, en cuanto a la utilización (valorización) de residuos inertes procedentes de actividades de construcción y demolición en la restauración de espacios degradados, en obras de acondicionamiento o relleno.
- La erradicación del vertido incontrolado de RCD. El 16 de julio de 2009 todos los vertederos en operación en España deberíann cumplir con los requisitos que les sea de aplicación del Real Decreto 1481/2001.
- El tratamiento de los RCD por gestor autorizado en los términos establecidos en la legislación.

De la misma manera los objetivos cuantitativos se centran en:

- La separación y gestión de forma ambientalmente correcta del 100% de los residuos peligrosos procedentes de los RCD en 2010.
- El reciclado del 15% de RCD en 2010, el 25% para 2012 y llegar al 35% al final del periodo de aplicación del plan.
- Alcanzar el 10%, 15% y 20% de RCD respectivamente en 2010, 2012 y 2015, objeto de otras operaciones de valorización, incluidas las operaciones de relleno.
- La eliminación de RCD en vertedero controlado del 75% para 2010, el 60% en 2012 y el 45% en 2015.

Como medidas para lograr los objetivos del Plan se proponen entre otras:

- La obligación de incluir en los proyectos de obra un estudio de gestión de los RCD que concrete medidas prácticas sobre prevención, reciclado, valorización y eliminación de RCD, y que incluya un inventario de residuos peligrosos y la previsión de su retirada selectiva.
- La creación de mecanismos de oferta y demanda de residuos y otros materiales reutilizables o valorizables en construcción, en particular bolsas de excedentes de tierra y piedras limpias no contaminadas.
- La aplicación de tarifas de admisión de RCD en vertedero que incentiven la prevención y el reciclaje de RCD.
- El fomento de la elaboración y contratación de proyectos públicos que tengan en cuenta alternativas de diseño y construcción que generen menos residuos, así como que favorezcan la utilización de productos procedentes de la valorización de residuos, siempre que cumplan las especificaciones técnicas.
- En este sentido, se propone la modificación de los requisitos técnicos que deben de cumplir los áridos reciclados utilizados en las obras de

construcción, particularmente del Pliego General de Prescripciones Técnicas para Obras de Carreteras PG-3 y de la Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08.

- El diseño y empleo de elementos de almacenamiento de RCD en la vía pública que impidan el depósito en ellos de residuos distintos de a los que van dirigidos.

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 depósito en vertedero, para subsanar algunas deficiencias encontradas en la transposición que hizo el Real Decreto 1481/2001 de la Directiva 1999/31/CE

Ley 6/2010, de 24 de marzo, de modificación del texto refundido de la Ley de evaluación de impacto ambiental de proyectos, aprobado por el Real Decreto Legislativo 1/2008, de 11 de enero.

Real Decreto 367/2010, de 26 de marzo, de modificación de diversos reglamentos del área de medio ambiente para su adaptación a la Ley 17/2009, de 23 de noviembre, sobre el libre acceso a las actividades de servicios y su ejercicio, y a la Ley 25/2009, de 22 de diciembre, de modificación de diversas leyes para su adaptación a la Ley de libre acceso a actividades de servicios y su ejercicio. Modifica al Real Decreto 509/2007, de 20 de abril, por el que se aprueba el Reglamento para el desarrollo y ejecución de la Ley 16/2002, de 1 de julio, de prevención y control integrados de la contaminación.

Real Decreto 717/2010, de 28 de mayo, por el que se modifican el Real Decreto 363/1995, de 10 de marzo, por el que se aprueba el Reglamento sobre clasificación, envasado y etiquetado de sustancias peligrosas y el Real Decreto 255/2003, de 28 de febrero, por el que se aprueba el Reglamento sobre clasificación, envasado y etiquetado de preparados peligrosos. Modifica, entre otros, a los siguientes:

- Reglamento de residuos tóxicos y peligrosos aprobado por el Real Decreto 833/1988, de 20 de julio.
- Real Decreto 1481/2001, de 27 de diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero.
- Real Decreto 509/2007, de 20 de abril, por el que se aprueba el Reglamento para el desarrollo y ejecución de la Ley 16/2002, de 1 de julio, de prevención y control integrados de la contaminación.

Real Decreto 100/2011, de 28 de enero, por el que se actualiza el catálogo de actividades potencialmente contaminadoras de la atmósfera y se establecen las disposiciones básicas para su aplicación. Este Real Decreto actualiza el catálogo incluido en el anexo IV de la Ley 34/2007, de 15 de noviembre, de calidad del aire y protección de la atmósfera.

Real Decreto 102/2011, de 28 de enero, relativo a la mejora de la calidad del aire.

Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados, es la actual Ley Marco de residuos que deroga a la Ley 10/98, de 21 de abril de residuos y transpone a la Directiva marco europea 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de noviembre de 2008, sobre residuos y por la que a su vez se derogan determinadas Directivas. En este sentido, adopta las principales implicaciones de ésta en cuanto a que ya no sólo prima la prevención en la producción y gestión de los residuos, posibilitando su trazabilidad, sino también la lucha contra el cambio climático, con la preservación del medioambiente y la salud humana.

Esta ley marco es mucho más extensa y completa en su ámbito de aplicación que la anterior, dando cobertura a todo tipo de residuos y a los suelos contaminados, con excepción de las emisiones a la atmósfera, los suelos no contaminados excavados con fines de construcción, los residuos radiactivos, los explosivos desclasificados y las materias fecales. Respecto a las aguas residuales, los cadáveres de animales, los desperdicios de origen animal y los residuos mineros, la Ley sólo será de aplicación en los aspectos no regulados expresamente por su normativa específica.

En cuanto a las novedades conceptuales, introduce la definición de residuos domésticos, entre los que incluye *“los residuos y escombros procedentes de obras menores de construcción y reparación domiciliaria”*. Junto a las clásicas figuras del productor, poseedor y gestor de los residuos, incorpora nuevos elementos actores en el proceso de la gestión: el negociante y el agente, incluyendo las correspondientes obligaciones de cada uno de ellos.

También resulta novedosa la introducción del concepto de subproducto y la inclusión de las condiciones que deben cumplir los residuos para que dejen de tener la condición de residuo, además del mecanismo necesario para poder reclasificar un residuo no peligroso, cuando en la lista europea de residuos consta como peligroso, y viceversa.

En cuanto a los principios de la política de residuos, se refuerzan el *“principio de jerarquía”*, así como el *“principio de autosuficiencia y proximidad”*. Asimismo, se ponen de manifiesto otros principios como el *“principio de acceso a la información y participación en materia de residuos”*, o se tienen en cuenta cuestiones como los costes de gestión de los residuos. En este sentido, aparece la nueva fórmula en la jerarquía de residuos: prevención, preparación para la reutilización, reciclado, otros tipos de valorización y eliminación.

Se establecen claramente las competencias administrativas, de manera que se requiere la elaboración y puesta en marcha de un plan nacional marco de la prevención y la gestión de residuos, así como los correspondientes planes autonómicos y la actuación de los Entes Locales a través de sus Ordenanzas Municipales.

Entre los objetivos y medidas en la gestión de los residuos, la Ley especifica concretamente que debe alcanzarse un mínimo del 70% del peso de los residuos no peligrosos de construcción y demolición destinados a la preparación para la reutilización, el reciclado y otras formas de valorización antes de 2020.

Finalmente, dentro del proceso de gestión de residuos, contempla los procedimientos de autorización, información y registro de los residuos, así como la responsabilidad, vigilancia, inspección, control y régimen sancionador.

Real Decreto-ley 17/2012, de 4 de mayo, de medidas urgentes en materia de medio ambiente, pretende una simplificación administrativa que mejore los mecanismos de intervención complejos e ineficaces, que provocan las demoras que soportan los ciudadanos y las dificultades de gestión por parte de las Administraciones. Entre otras introduce modificaciones administrativas en la Ley 22/2011, de 28 de julio de residuos y suelos contaminados, concretamente en los artículos 21, 25, 31, 32, 49, la disposición transitoria cuarta y el anexo X.

4.4.3. Marco legislativo de residuos de construcción y demolición en las Comunidades Autónomas

Las competencias de las Comunidades Autónomas, reconocidas en el artículo 148 de la Constitución, se ponen de manifiesto, en el caso concreto de la gestión de los residuos de construcción y demolición, como se ha señalado anteriormente, de lo emanado de las Correspondientes Directivas europeas, a la Ley 10/1998, de 21 de abril de Residuos, derogada por la Ley 22/2011, de 28 de Julio, que establecen la elaboración de planes nacionales de residuos, resultantes a su vez de la integración de los correspondientes planes autonómicos.

Abundando en ello, la propia Ley 22/2011, en su preámbulo, establece que debido a que son varias las administraciones públicas que intervienen en la gestión de los residuos, se hace necesario un artículo que defina las competencias administrativas de cada una de ellas, el número 12, en cuyo apartado 4 establece las competencias de las Comunidades Autónomas en materia de residuos. En dicho apartado se les conmina, entre otras, a:

- a) La elaboración de los programas autonómicos de prevención de residuos y de los planes autonómicos de gestión de residuos.
- b) La autorización, vigilancia, inspección y sanción de las actividades de producción y gestión de residuos.
- c) El registro de la información en materia de producción y gestión de residuos en su ámbito competencial.

A continuación se presenta un listado, ordenado cronológicamente, de la legislación que cada Comunidad Autónoma, incluidas las Ciudades Autónomas de Ceuta y Melilla, han venido desarrollando en materia de residuos de construcción y demolición, así como aquella acerca de los residuos en general, del impacto ambiental y los vertederos que tiene vinculación con los residuos.

En el caso de la Comunidad Autónoma de Andalucía, además se comentan los aspectos más destacados encontrados en los documentos legislativos en materia de residuos de construcción y demolición.

4.4.3.1. Marco legislativo de residuos de construcción y demolición de Andalucía

Las competencias propias de la Comunidad Autónoma de Andalucía en materia de medio ambiente, a tenor de lo establecido en el artículo 148 de la Constitución española, quedan definidas en el artículo 57 de su Estatuto de Autonomía, que aún sin referirse expresamente a los RCD, establece que corresponde a la Junta de Andalucía *“la regulación sobre prevención y corrección de la generación de residuos con origen o destino en Andalucía”*. Por otra parte, en el artículo 198 del mismo Estatuto, establece que *“corresponde a la Junta de Andalucía la planificación, supervisión y control de la gestión de los residuos urbanos e industriales. Se adoptarán los medios necesarios tanto para asegurar el cumplimiento de las normas como de las medidas para la reducción, reciclaje y reutilización de los residuos”*.

A continuación se presenta el listado de regulaciones en materia de residuos de construcción y demolición, así como en residuos en general, vertederos e impacto ambiental que se ha promulgado en esta Comunidad Autónoma.

Ley 7/1994, de 18 de mayo, de protección ambiental de la Comunidad Autónoma de Andalucía. La Ley nace con la finalidad de prevenir, minimizar, corregir o impedir los efectos que determinadas actuaciones puedan tener sobre el medio ambiente y la calidad de vida, definiendo el marco normativo y de actuación en materia de protección atmosférica, residuos en general y calidad de las aguas en Andalucía. Siendo de aplicación a los planes, programas y proyectos de construcción, instalaciones y obras cuya actividad contaminación y produzca residuos, incluidos los escombros y restos de obras.

La Ley articulaba la prevención ambiental a través de tres medidas: evaluación del impacto ambiental, informe ambiental y calificación ambiental, para cuyo cumplimiento establecía el correspondiente régimen sancionador. Cada una de dichas medidas se articulará según sus correspondientes Decretos: el Decreto 292/1995, de 12 de diciembre, por el que se aprueba el reglamento de evaluación de impacto ambiental; el Decreto 297/1995, de 19 de diciembre por el que se aprueba el reglamento de calificación ambiental; y el Decreto 297/1995, de 19 de diciembre por el que se aprueba el reglamento de calificación ambiental

En materia de residuos, concretamente tenía como objetivos: promover la reducción, fomentar la recogida selectiva, valorizar los residuos e incentivar su reciclaje y reutilización, y eliminar los depósitos incontrolados. Así mismo, incluía las obligaciones de los productores poseedores de residuos en cuanto a su gestión, conforme a lo que se dispusiera en el futuro Plan Director Territorial de Gestión de Residuos.

Decreto 283/1995, de 21 de noviembre, por el que se aprueba el Reglamento de residuos de la Comunidad Autónoma andaluza. Este Decreto tenía por objeto desarrollar los objetivos preventivos de la Ley anterior, estableciendo el marco normativo para llevarlos a cabo, con el propósito específico de promover la reducción de la producción de residuos y su peligrosidad, fomentar su recogida selectiva, valorizarlos e incentivar cuanto sea posible su reciclaje y reutilización, y eliminar los depósitos incontrolados, asegurando el tratamiento adecuado de los residuos. Para ello, establecía que la Agencia de Medio Ambiente debería elaborar el Plan Director Territorial de Gestión de Residuos en el que se integrarían los Planes Directores provinciales, indicando cuál sería su contenido y el procedimiento de elaboración y aprobación. Así mismo, conminaba a los municipios a que establecieran sus propias Ordenanzas Municipales en materia de residuos.

En cuanto a las instalaciones de gestión de residuos sólidos urbanos, definía los tipos de instalaciones y los procedimientos de autorización.

Respecto de los escombros y restos de obras, no los señalaba expresamente, sino que los englobaba en la categoría general de residuos sólidos urbanos. Igualmente, establecía la obligatoriedad de planificar la gestión de los residuos tóxicos y peligrosos, y de crear el correspondiente registro de productores de este tipo de residuos.

Decreto 292/1995, de 12 de diciembre, por el que se aprueba el reglamento de evaluación de impacto ambiental de la Comunidad Autónoma de Andalucía. Este Decreto desarrollaba todas las normas aplicables referidas a la primera medida establecidas en la Ley 7/1994, de 18 de mayo, de protección ambiental, sobre la evaluación de impacto ambiental.

Se definía evaluación de impacto ambiental como *“el proceso de recogida de información, análisis y predicción destinado a anticipar, corregir y prevenir los posibles efectos que una actuación de las enumeradas en el Anexo Primero de la Ley 7/1994”*; y estudio de impacto ambiental como el *“conjunto de documentos que deben presentar los titulares de planes, programas, proyectos de construcción, instalaciones y obras públicas o privadas, en el que se recoja y analice la información necesaria para evaluar las consecuencias ambientales de la actuación que se pretenda ejecutar”*. El Decreto establecía además el contenido de dicho estudio y el procedimiento general a seguir.

Igualmente establecía el procedimiento de la evaluación de impacto ambiental de los planes urbanísticos, así como de los planes y programas de infraestructuras físicas.

Decreto 297/1995, de 19 de diciembre por el que se aprueba el reglamento de calificación ambiental, en cumplimiento de la segunda medida establecida en la Ley 7/1994, de 18 de mayo, de protección ambiental, sobre la calificación ambiental.

El Decreto define la calificación ambiental como el procedimiento que compete a los Ayuntamientos que otorgan la licencia de actividades *“mediante el cual se analizan las consecuencias ambientales de la implantación, ampliación, modificación o traslado de las actividades incluidas en el Anexo Tercero de la Ley 7/1994, al objeto de comprobar su adecuación a la normativa ambiental vigente y determinar las medidas correctoras o precautorias necesarias para prevenir o compensar sus posibles efectos negativos sobre el medio ambiente”*. Incluye, así mismo, el procedimiento de calificación ambiental, la puesta en marcha, y la inspección y vigilancia de la actividad a calificar.

Decreto 153/1996, de 30 de abril, por el que se aprueba el reglamento de informe ambiental, en cumplimiento de la última medida establecida en la Ley 7/1994, de 18 de mayo, de protección ambiental, sobre el informe ambiental.

Este Decreto viene a definir el informe ambiental como, aquel obligatorio elaborado por las Comisiones Interdepartamentales Provinciales de Medio Ambiente, que *“valorará las repercusiones ambientales de cada propuesta de actuación y determinará la conveniencia o no de ejecutar la misma, especificando si la actuación propuesta se ajuste o no a la normativa ambiental en vigor. Y en caso negativo, se indicarán los preceptos legales o reglamentarios que se incumplen, de acuerdo con lo establecido en el artículo 9 de la Ley 7/1994, de 18 de mayo”*. Se incluyen expresamente las actuaciones en cuanto al incremento de la generación de residuos.

Se incluye en el Decreto el procedimiento para la creación de las Comisiones Interdepartamentales Provinciales de Medio Ambiente, la tramitación documental a cerca del informe, su seguimiento y control.

Acuerdo de 9 de diciembre de 1997, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba la formulación del Plan Director Territorial de Gestión de Residuos de Andalucía, conforme a lo dispuesto en la Ley 7/1994, de 18 de mayo, de protección ambiental, y el Decreto 283/1995, de 21 de noviembre, por el que se aprueba el Reglamento de residuos de la Comunidad Autónoma andaluza. En el Acuerdo se establece el contenido del Plan Director así como el procedimiento para su aprobación y publicación.

Decreto 134/1998, de 23 de junio, por el que se aprueba el Plan de Gestión de Residuos Peligrosos de Andalucía.

Decreto 218/1999, de 26 de octubre, por el que se aprueba el Plan Director Territorial de Gestión de Residuos Urbanos de Andalucía. El Plan resulta de aplicación a los residuos sólidos urbanos, entre los que incluye expresamente a los residuos y escombros procedentes de obras menores de construcción y reparación domiciliarias, con el propósito específico, como objetivo general, de promover la reducción en la producción de residuos y de su peligrosidad, el fomento de la recogida selectiva, la valorización, el fomento del reciclaje y reutilización, y la eliminación de los depósitos incontrolados, asegurando un tratamiento adecuado a los residuos. Para la consecución de estos objetivos

preveía que las Administraciones Públicas estableciesen instrumentos de carácter económico y medidas de fomento.

En el Plan se analizó la situación en la que se encontraban los residuos sólidos urbanos en esa época y las previsiones futuras según los planes directores provinciales vigentes. Y concretamente, en cuanto a los residuos de construcción y demolición, destacar que se hizo una estimación de producción por provincias que arrojaban una cantidad de 5kg/habitante.día, además, sólo se contemplaba el vertido controlado o incontrolado de los mismos, siendo prácticamente nula cualquier alternativa de valorización, reciclaje o reutilización.

Entre los objetivos específicos se fijaron la consecución del “crecimiento cero” y que los materiales no recuperables o inertes generados no superasen en el año 2008 el 35% de los residuos urbanos generados.

En cuanto a las propuestas de actuación para la gestión de los residuos de escombros y restos de obra, establecía como objetivos: (i) la minimización del volumen generado, previendo en los proyectos de obra la cantidad, composición y destino de los mismos, incluyendo cláusulas en los proyectos que fomenten la utilización de materiales reciclados, y fomentando el desarrollo de normativa orientada a la minimización; (ii) el aumento de los volúmenes de reutilización y reciclaje; y (iii) el depósito controlado de los materiales que no sean reutilizables o reciclables, proponiendo las instalaciones adecuadas al efecto y la inversión necesaria.

Decreto 104/2000, de 21 de marzo, por el que se aprueba el registro administrativo especial de personas o entidades gestoras de residuos urbanos.

Decreto 94/2003, de 8 de abril, por el que se modifican puntualmente los anexos del Decreto 292/1995, de 12 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento de evaluación de impacto ambiental de la Comunidad Autónoma de Andalucía y del Decreto 153/1996, de 30 de abril, por el que se aprueba el Reglamento de informe ambiental.

Decreto 99/2004, de 9 de marzo, por el que se aprueba el Plan de Prevención y Gestión de Residuos Peligrosos de Andalucía 2004-2010, que constituye el segundo plan de gestión en materia de residuos peligrosos.

Ley 7/2007, de 9 de julio, de gestión integrada de la calidad ambiental. Deroga a la Ley 7/1994, de 18 de mayo, de protección ambiental de la Comunidad Autónoma de Andalucía.

Esta Ley, que se conoce comúnmente como GICA, viene a completar el marco legal existente en política ambiental en Andalucía, dotándola de nuevos instrumentos de protección ambiental. La Ley se promulga con el doble objetivo de mejorar la calidad de vida de los ciudadanos de la Comunidad Autónoma y obtener un alto nivel de protección del medio ambiente, ante los posibles efectos derivados de determinados planes, programas, proyectos de obras y actividades, incluidos los urbanísticos.

La GICA en su Capítulo V, de residuos, en la sección cuarta, dedicada a la gestión de los residuos de la construcción y demolición, en su único artículo 104, de producción de residuos de construcción y demolición, establece el procedimiento a seguir durante la fase de proyecto y ejecución de una obra de construcción al objeto de conseguir una adecuada gestión de los mismos. En este sentido, se contempla que los proyectos deben de incluir una estimación de los residuos producidos, las medidas para su clasificación y separación por tipos en origen, su destino y las condiciones de gestión; en base a los cuales se establecerá la correspondiente fianza o garantía equivalente que responda de la correcta gestión de los mismos.

Además, establece los procedimientos de vigilancia, inspección y control ambiental de las actividades, así como el establecimiento de las sanciones en función del tipo de infracción. En este sentido, se consideran infracciones graves entre otras el *“abandono, almacenamiento, vertido o eliminación incontrolados de cualquier tipo de residuos no peligrosos”* que se podrán sancionar con multas desde 603 a 30051€.

Finalmente, en su anexo I establece las categorías de actuaciones sometidas a los instrumentos de prevención y control ambiental, entre las que se encuentran los proyectos de infraestructuras, a los que se les ha de aplicar el instrumento de autorización ambiental integrada (AAI).

Acuerdo de 3 de agosto de 2010, del Consejo de Gobierno, de formulación del Plan de Prevención y Gestión de Residuos Peligrosos De Andalucía (2011-2020). En este acuerdo se establecen las bases para ejecutar un plan con el objetivo de prevenir la producción de residuos peligrosos a través del incremento de las medidas de control. Éste será el tercer plan de gestión de los residuos peligrosos que se redacte en Andalucía.

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.

Decreto 397/2010, de 2 de noviembre, por el que se aprueba el Plan Director Territorial de Gestión de Residuos No Peligrosos de Andalucía 2010-2019. El precedente inmediato de este Plan es el Decreto 218/1999, que aprobó el Plan Territorial de Gestión de Residuos Urbanos 1999-2008. Una vez agotado éste, se plantea la necesidad de incorporar nuevos condicionantes de carácter normativo que han surgido con posterioridad y adaptarlos a las peculiaridades de la Comunidad andaluza.

El Plan, adoptando los criterios de la legislación comunitaria y nacional, establece dos programas de actuación horizontales con medidas específicas para cada tipo de residuo: el programa de prevención y el programa de gestión. Así mismo, plantea sendos programas transversales de actuación: el programa de seguimiento y control, y el programa de concienciación, difusión y comunicación.

Este Plan Director es de aplicación a los residuos municipales, entre los que se encuentran los residuos y escombros procedentes de obras menores de construcción y reparación domiciliaria, y los residuos no peligrosos que se generen en un proceso de construcción de una edificación cuya gestión no compete a los entes locales.

En su análisis de la situación actual de los residuos de construcción y demolición se admite que no existen datos reales en cuanto a la producción y gestión de este tipo de residuos en Andalucía, trabajándose con estimaciones basadas en la población, ya que ni productores ni gestores estaban obligados a facilitar datos antes de 2008. Así mismo, se reconoce que, de los distintos modelos de gestión posible, el establecimiento de una fianza al solicitar la licencia de obra y su posterior devolución al acreditar la gestión de los RCD, es el modelo que está obteniendo mejores resultados.

Para la consecución del objetivo general de lograr que la gestión de los residuos sea un servicio de calidad, de coste homogéneo en todo el territorio y que proporcione un adecuado nivel de protección del medioambiente, el Plan se apoya en una serie de objetivos o directrices basados fundamentalmente en el principio de prevención, desarrollados a través de una serie de medidas propias para cada objetivo. Así, en el caso concreto de los residuos de construcción y demolición, se contempla el objetivo 1.9. Prevención en origen de la generación de RCD, con las siguientes medidas:

- Medida 20: 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 de RCD.
- Medida 21: Desarrollo de programas de formación a profesionales del sector de la construcción en materia de prevención y gestión de RCD.
- Medida 22: 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 RCD.

En cuanto a los programas de gestión, específicamente para los residuos de construcción y demolición, se contemplan los siguientes objetivos:

- Objetivo 2.17. Separación en origen y correcta gestión ambiental de las distintas fracciones de residuos contenidas en los RCD. Eliminación del vertido incontrolado de RCD y erradicación del vertido de RCD en vertederos de residuos inertes sin tratamiento previo (Medidas 86, 87 y 88).
- Objetivo 2.18. Aplicación del principio de jerarquía a los RCD. Maximización de la valorización (Medidas 89 y 90).

- Objetivo 2.19. Separación y gestión de forma ambientalmente correcta del 100% de los residuos peligrosos procedentes de los RCD (Medidas 91 y 92).
- Objetivo 2.20. Reciclado de los siguientes % de RCD, respecto del total generado: 15% en 2010, 25% en 2012, 35% en 2015 y 40% en 2019 (Medida 93).
- Objetivo 2.21. Alcanzar los siguientes porcentajes de RCD valorizados mediante otras operaciones, incluidas las de relleno, respecto del total generado: 10% en 2010, 15% en 2012, 20% en 2015 y 25% en 2019 (Medidas 94, 95 y 96).
- Objetivo 2.22. Eliminación en vertedero con tratamiento previo, como máximo, de los siguientes porcentajes de RCD, respecto del total generado: 75% en 2010, 60% en 2012, 45% en 2015 y 40% en 2019 (Medida 97).

De la misma manera, los programas de seguimiento y control, y los programas de concienciación, difusión y comunicación, aplicados sobre la totalidad de los residuos se fundamentan en una serie de objetivos generales con sus correspondientes medidas de actuación.

Finalmente, el plan contempla la actuación en cuanto a la generación de empleo y la inversión económica en infraestructuras de gestión adecuadas.

Decreto 7/2012, de 17 de enero, por el que se aprueba el Plan de Prevención y Gestión de Residuos Peligrosos de Andalucía 2012-2020, anunciado en el anterior acuerdo del Consejo de Gobierno de 3 de agosto de 2010. En este tercer Plan se plantea el marco legal y la situación en la que se encuentran los residuos peligrosos en el entorno de la Comunidad andaluza, los objetivos, programas y líneas de actuación a seguir de cara a minimizar su producción, así como los mecanismos de control, evaluación y seguimiento de los mismos.

Decreto 73/2012, de 22 de marzo, por el que se aprueba el Reglamento de Residuos de Andalucía. Deroga al Decreto 283/1995, de 21 noviembre, por el que se aprueba el Reglamento de Residuos de la Comunidad Autónoma de Andalucía, 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 el Decreto 356/2010, de 3 de agosto, por el que se regula la autorización ambiental unificada.

Este Decreto, que constituye el segundo reglamento en residuos de Andalucía, se crea con la finalidad de establecer el régimen jurídico regulador de la producción, posesión y gestión de los residuos que se generen y gestionen en Andalucía, garantizando la defensa del medio ambiente y la preservación de los recursos naturales. Para ello sigue las directrices y principios rectores tanto de la Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de noviembre de 2008, sobre residuos, como de la Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados, por lo que recoge el ámbito de aplicación de aquellas, así como la titularidad y obligatoriedad en cuanto a la producción, posesión y gestión de los residuos.

Se establece el reparto de competencias en materia de residuos entre la Consejería de Medio Ambiente y los municipios, con la elaboración y puesta en marcha de sus respectivas Ordenanzas Municipales.

En cuanto a los objetivos generales de gestión de los residuos, se especifica que antes de 2020, deberá aumentarse al 70% del peso de los residuos de construcción y demolición destinados a la preparación para la reutilización, el reciclado y otra valorización de materiales, excepto los definidos en la categoría 17 05 04 de la lista europea de residuos.

En el título V en su capítulo I, se contemplan específicamente los residuos de construcción y demolición, diferenciándose jurídicamente, según el Real Decreto 105/2008, los municipales, generados en las obras menores de construcción y reparación domiciliaria, y por tanto regulados por las ordenanzas municipales, de los no municipales, cuyo régimen jurídico lo establece la Administración de la Comunidad andaluza. En todo caso, el establecimiento de la garantía para asegurar la correcta gestión de los residuos se tiene que constituir en base a la fianza o garantía financiera equivalente.

Se establece el procedimiento de la gestión de los residuos, primando la prevención, la reutilización y el reciclaje sobre el depósito en vertedero, así como el régimen de inspección, vigilancia y control, y las sanciones que se deriven del proceso de gestión, por lo que incorpora un extenso número de documento y modelos al efecto.

4.4.3.2. Marco legislativo de residuos de construcción y demolición de Aragón

En materia de residuos de construcción y demolición en Aragón se han publicado los siguientes Decretos:

Decreto 262/2006, de 27 de diciembre, del Gobierno de Aragón, por el que se aprueba el Reglamento de la producción, posesión y gestión de los residuos de la construcción y la demolición, y del régimen jurídico del servicio público de eliminación y valorización de escombros que no procedan de obras menores de construcción y reparación domiciliaria en la Comunidad Autónoma de Aragón.

Decreto 117/2009, de 23 de junio, del Gobierno de Aragón, por el que se modifica el Decreto 262/2006, de 27 de diciembre, del Gobierno de Aragón, por el que se aprueba el Reglamento de la producción, posesión y gestión de los residuos de la construcción y la demolición, y del régimen jurídico del servicio público de eliminación y valorización de escombros que no procedan de obras menores de construcción y reparación domiciliaria en la Comunidad Autónoma de Aragón.

Respecto a los residuos en general, impacto ambiental y vertederos se ha publicado lo siguiente:

Decreto 109/1986, de 14 de noviembre, de la Diputación General de Aragón, por el que se regula la intervención de la Diputación General de Aragón en materia de actividades molestas, insalubres, nocivas y peligrosas.

Decreto 118/1989, de 19 de septiembre, de procedimiento de evaluación del impacto ambiental.

Decreto 148/1990, de 9 de noviembre, de procedimiento para la declaración de impacto ambiental.

Orden de 14 de junio de 1991, del Departamento de Ordenación Territorial, Obras Públicas y Transportes, por la que se crea en la Comunidad Autónoma de Aragón el registro de pequeños productores de residuos tóxicos y peligrosos.

Orden de 24 de Julio de 1992, del Departamento de Ordenación Territorial, Obras Públicas y Transportes, por la que se modifica el anexo I de la Orden de 14 de Junio de 1991, por la que se crea en la Comunidad Autónoma de Aragón el registro de pequeños productores de residuos tóxicos y peligrosos.

Decreto 45/1994, de 4 de marzo, de evaluación de impacto ambiental.

Decreto 182/1994, de 8 de agosto, del Departamento de Medio Ambiente de la Diputación General de Aragón, por el que se crea la comisión de residuos especiales de la Comunidad Autónoma de Aragón.

Resolución de 15 de enero de 1996, de la Dirección General de Política Ambiental, por la que se dispone la publicación del convenio marco de colaboración y Addenda correspondiente entre el Departamento de Medio Ambiente de la Comunidad Autónoma de Aragón y el Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente, para la realización de actuaciones derivadas del Plan Nacional de Residuos Peligrosos (1995-2000).

Decreto 17/1996, de 20 de febrero, sobre ayudas de apoyo financiero a programas de la Comunidad sobre residuos tóxicos y peligrosos.

Decreto 18/1996, de 20 de febrero, sobre ayudas en materia de gestión de residuos sólidos urbanos.

Orden de 18 de julio de 1997, del Departamento de Agricultura y Medio Ambiente, por la que se regulan los documentos de control y seguimiento de la gestión de residuos tóxicos y peligrosos procedentes de pequeños productores.

Decreto 198/1997, de 9 de diciembre, de Modificación del Decreto 17/1996, por el que se establecen y regulan las ayudas públicas de apoyo financiero a los programas de la Comunidad Autónoma de Aragón en materia de residuos peligrosos.

Decreto 72/1998, de 31 de marzo, por el que se aprueba el Plan de Ordenación de la Gestión de Residuos Sólidos Urbanos de la Comunidad Autónoma de Aragón.

Orden de 25 de mayo de 1999, del Departamento de Agricultura y Medio Ambiente, por la que se crea la Comisión de seguimiento del Plan de Ordenación de la Gestión de Residuos Sólidos Urbanos de la Comunidad Autónoma de Aragón.

Decreto 49/2000, de 29 de enero, por el que se regula la autorización y registro de las actividades de valorización y eliminación de residuos no peligrosos, y se crean los registros para otras actividades de gestión de residuos no peligrosos, distintas de las anteriores y para el transporte de los peligrosos.

Orden de 27 de diciembre de 2000, del Departamento de Medio Ambiente, por la que se aprueba el programa de actualización del Plan de Ordenación de la Gestión de Residuos Sólidos Urbanos de la Comunidad Autónoma de Aragón.

Orden de 5 de Julio de 2001, del Departamento de Medio Ambiente, por la que se dispone la publicación del acuerdo de Consejo de Gobierno, por el que se aprueba el Plan de Residuos Peligrosos de la Comunidad Autónoma de Aragón (2001-2004).

Acuerdo de 8 de mayo de 2001, del Gobierno de Aragón, por el que se aprueba el Plan de Residuos Peligrosos de la Comunidad Autónoma de Aragón (2001-2004).

Decreto 312/2002, de 8 de octubre del Gobierno de Aragón por el que se atribuyen determinadas competencias en materia de evaluación de impacto ambiental.

Decreto 236/2005, de 22 de noviembre, del Gobierno de Aragón, por el que se aprueba el Reglamento de la Producción, Posesión y Gestión de Residuos Peligrosos y del régimen jurídico del servicio público de eliminación de residuos peligrosos en la Comunidad Autónoma de Aragón.

Acuerdo del 11 de enero de 2005, de Consejo de Gobierno de Aragón, por el que se aprueba el Plan de Gestión Integral de Residuos de Aragón 2005-2008 (GIRA).

Decreto 2/2006, de 10 de enero, del Gobierno de Aragón, por el que se aprueba el Reglamento de la Producción, Posesión y Gestión de Residuos Industriales No Peligrosos y del régimen jurídico del servicio público de eliminación de residuos industriales no peligrosos no susceptibles de valorización en la Comunidad Autónoma de Aragón.

Ley 7/2006, de 22 de junio de protección ambiental de Aragón.

Orden de 22 de abril de 2009, del Consejero de Medio Ambiente, por el que se da publicidad al acuerdo del Gobierno de Aragón de fecha 14 de abril de 2009, por el que se aprueba el Plan de Gestión Integral de Residuos de Aragón 2009-2015.

Decreto 74/2011, de 22 de marzo, del Gobierno de Aragón, por el que se modifican los anexos de la Ley 7/2006, de 22 de junio, de protección ambiental de Aragón.

4.4.3.3. Marco legislativo de residuos de construcción y demolición de la Comunidad Asturiana

Respecto a los residuos en general en Asturias se ha publicado exclusivamente el siguiente:

Plan Básico de Gestión de Residuos en Asturias (aprobado por el Consejo de Gobierno el 14 de junio de 2001).

4.4.3.4. Marco legislativo de residuos de construcción y demolición de Baleares

En materia de residuos de construcción y demolición en Baleares se ha publicado:

Decreto 10/2000, de 4 de febrero, por el que se fija provisionalmente y con carácter de extrema urgencia, la selección y vertido de los residuos de la construcción y demolición.

Orden de la Consejería de Medio Ambiente, de 28 de febrero de 2000, de medidas transitorias para la autorización de instalaciones de valorización y eliminación de residuos de la construcción y demolición.

Resolución de la Consejería de Medio Ambiente, de 26 de febrero de 2001, en aplicación de la disposición adicional de la Orden de 28 de febrero de 2000, sobre las medidas transitorias para la autorización de instalaciones de valorización y eliminación de residuos de construcción y demolición.

Respecto a los residuos en general e impacto ambiental, se ha publicado lo siguiente:

Decreto 4/1986, de 23 de enero, de implantación y regulación de los estudios de evaluación ambiental en las Islas Baleares.

Decreto 76/1991, de 14 de Julio, de la Consejería de Comercio e Industria, relativo a la aprobación del Plan Director de Residuos Sólidos de la Isla de Menorca.

Decreto 68/1994, de 13 de mayo, de aprobación del Plan Director para la Gestión de los Residuos Sólidos Urbanos de la Isla de Ibiza.

Decreto 21/2000, de 18 de febrero, por el que se aprueba el Plan Director para la Gestión de los Residuos Sólidos Urbanos de Mallorca, y desarrollado y ejecutado mediante la Resolución de la Consejería de Medio Ambiente de 20 de Noviembre de 2000.

Decreto 85/2004, de 1 de octubre, por el que se modifica el Decreto 4/1986, de 23 de enero, de implantación y regulación de los estudios de evaluación de impacto ambiental

Ley 11/2006, de 14 de septiembre, de evaluación de impacto ambiental y evaluaciones ambientales estratégicas.

Ley 6/2009, de 17 de noviembre, de medidas ambientales para impulsar las inversiones y la actividad económica en las Illes Balears

4.4.3.5. Marco legislativo de residuos de construcción y demolición de Canarias

En la Comunidad Autónoma Canaria sólo existe el siguiente Plan en el que se contemplan los residuos de construcción y demolición:

Plan Territorial Especial de Ordenación de Residuos de la Isla de Tenerife (PTEOR), en el que se incluyen los residuos de construcción y demolición, dentro del Plan Integral de Residuos de Canarias (PIRCAN), aprobado el 30 de julio de 2001. Anexo 7.2.3. del Decreto 161/2001, de 30 de julio).

El resto de documentos que se refieren a los residuos se listan a continuación:

Ley 11/1990, de 13 de julio de 1990, de prevención de impacto ecológico.

Decreto 51/1995, de 24 de marzo, por el que se regula el registro de pequeños productores de residuos tóxicos y peligrosos generados en las Islas Canarias.

Orden de 14 de mayo de 1996, por la que se regula el libro personal de registro para pequeños productores de residuos tóxicos y peligrosos en Canarias.

Resolución de 19 de Enero de 1998, de la Secretaría General Técnica, por la que se da publicidad al Acuerdo adoptado por el Gobierno de la Comunidad Autónoma de Canarias en la sesión de 13 de mayo de 1997, de aprobación del plan integral de residuos de Canarias.

Ley 1/1999, de 29 de enero, de residuos de Canarias.

Ley 13/1999, de 17 de noviembre, de modificación de la Disposición Transitoria Quinta de la Ley 1/1999, de 29 de enero, de residuos de Canarias.

Ley 5/2000, de 9 de noviembre, por la que se derogan los artículos 34 y 35 de la Ley 1/1999, de 29 de enero, de residuos de Canarias.

Decreto 64/2001, de 5 de marzo, por el que se aprueba el Reglamento de Organización y Funcionamiento del Consejo Canario de Residuos.

Decreto 161/2001, de 30 de julio, por el que se aprueba el Plan Integral de Residuos de Canarias.

Decreto 112/2004, de 29 de julio, por el que se regula el procedimiento y requisitos para el otorgamiento de las autorizaciones de gestión de residuos, y se crea el registro de gestores de residuos de Canarias.

Ley 4/2008, de 12 de noviembre, por la que se introduce en la legislación canaria sobre evaluación ambiental de determinados proyectos la obligatoriedad del examen y análisis ponderado de la alternativa cero.

4.4.3.6. Marco legislativo de residuos de construcción y demolición de Cantabria

Los residuos de construcción y demolición quedan regulados en la Comunidad Cántabra por:

Decreto 72/2010, de 28 de octubre, por el que se regula la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición en la Comunidad Autónoma de Cantabria.

Así mismo, se recogen los siguientes documentos legislativos en materia de residuos y su gestión:

Decreto 23/1987, de 22 de abril, que aprueba el Plan de Gestión de Residuos Sólidos Urbanos de Cantabria.

Decreto 9/1988, de 1 de marzo, por el que se regula el control, inspección y vigilancia de los residuos sólidos urbanos.

Decreto 51/1988, de 16 de septiembre, por el que se modifica el Decreto 9/1988, de 1 de marzo, de control, inspección y vigilancia de los residuos sólidos urbanos.

Ley 8/1993, de 18 de noviembre, del plan de gestión de residuos urbanos de Cantabria. Deroga al Decreto 23/1987, de 22 de abril, que aprueba el Plan de Gestión de Residuos Sólidos Urbanos de Cantabria.

Resolución de 15 de enero de 1996, de la Dirección General de Política Ambiental, por la que se acuerda la publicación del Convenio Marco de colaboración y Adenda entre el Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente y la Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio de la Comunidad Autónoma de Cantabria, para la realización de actuaciones derivadas del Plan Nacional de Residuos Peligrosos (1995-2000).

Orden de 28 de mayo de 2001, por la que se regula el contenido mínimo de los estudios de minimización de residuos peligrosos.

Decreto 42/2001, de 17 de mayo, por el que se crea y regula el registro de pequeños productores de residuos peligrosos en el ámbito de la Comunidad Autónoma de Cantabria.

Decreto 105/2001, de 20 de noviembre, por el que se crean y regulan los registros para las actividades en las que se desarrollen operaciones de gestión de residuos no peligrosos distintas a la valoración o eliminación y para el transporte de residuos peligrosos en el ámbito de la Comunidad Autónoma de Cantabria.

Decreto 160/2005, de 15 de diciembre, por el que se fijan los precios públicos del Gobierno de Cantabria para determinadas actividades de gestión de residuos urbanos y hospitalarios.

Ley de Cantabria 17/2006, de 11 de diciembre, de control ambiental integrado.

Decreto 102/2006, de 13 de octubre, por el que se aprueba el Plan de Residuos de Cantabria 2006-2010.

Decreto 22/2007, de 1 de marzo, por el que se modifica el Decreto 102/2006, de 13 de octubre, por el que se aprueba el Plan de Residuos de Cantabria 2006-2010.

Decreto 146/2007, de 8 de noviembre, por el que se crea la comisión de seguimiento de los Planes de Residuos de Cantabria.

Decreto 32/2008, de 3 de abril, por el que se modifica el Decreto 146/2007, de 8 de noviembre, por el que se crea la Comisión de seguimiento de los Planes de Residuos de Cantabria.

Orden HAC/25/2009, de 30 de diciembre, por la que se establecen los requisitos para la repercusión del Impuesto sobre el depósito de residuos en vertedero de la Comunidad Autónoma de Cantabria.

Ley de Cantabria 6/2009, de 28 de diciembre, de medidas fiscales y de contenido financiero.

Orden HAC/15/2010, de 10 de mayo, por la que se modifica la Orden HAC/25/2009, de 30 de diciembre, por la que se establecen los requisitos para la repercusión del impuesto sobre el depósito de residuos en vertedero de la Comunidad Autónoma de Cantabria.

Decreto 15/2010, de 4 de marzo, por el que se aprueban los Planes Sectoriales de Residuos que desarrollan el Plan de Residuos de Cantabria 2006-2010 y, en su virtud se fijan los objetivos del mismo para el periodo 2010-2014.

Decreto 19/2010, de 18 de marzo, por el que se aprueba el Reglamento de la Ley 17/2006 de 11 de diciembre de control ambiental integrado.

Decreto 71/2010, de 14 de octubre, por el que se modifica el Decreto 19/2010, de 18 de marzo, por el que se aprueba el Reglamento de la Ley de Cantabria 17/2006, de 11 de diciembre, de control ambiental integrado.

4.4.3.7. Marco legislativo de residuos de construcción y demolición de Castilla y León

La Comunidad Autónoma de Castilla y León ha contado hasta 2010 con el siguiente plan de territorial de gestión de residuos de construcción y demolición:

Decreto 54/2008, de 17 de julio, por el que se aprueba el Plan Regional de Ámbito Sectorial de Residuos de Construcción y Demolición de Castilla y León (2008-2010).

Así mismo, la siguiente lista atestigua la labor legislativa desarrollada en materia de residuos, su gestión ambiental y su vertido:

Decreto 90/1990, de 31 de mayo, por el que se aprueba el Plan Director Regional de Gestión de Residuos Sólidos Urbanos de la Comunidad de Castilla y León

Decreto 50/1998, de 5 de marzo, sobre modificación del Plan Director Regional de Gestión de Residuos Sólidos Urbanos. Deroga al Decreto 90/1990, de 31 de mayo.

Resolución de 20 de noviembre de 2001, de la Consejería de Medio Ambiente, por la que se hace público dictamen medioambiental de la evaluación estratégica previa sobre la estrategia regional de residuos de Castilla y León 2001-2010.

Decreto 74/2002, de 30 de mayo, por el que se aprueba la estrategia regional de residuos de la Comunidad de Castilla y León 2001-2010.

Ley 9/2002, de 10 de julio, para la declaración de proyectos regionales de infraestructuras de residuos de singular interés para la Comunidad.

Ley 11/2003, de 8 de abril, de prevención ambiental de Castilla y León.

Orden MAM/1313/2004, de 12 de agosto, por la que se inicia el procedimiento de aprobación del Plan de Residuos Urbanos y Residuos de Envases de Castilla y León 2004-2010.

Resolución de 13 de diciembre de 2004, de la Consejería de Medio Ambiente, por la que se hace público el dictamen medioambiental de la evaluación estratégica previa sobre el plan regional de ámbito sectorial de residuos urbanos y residuos de envases de Castilla y León, 2004-2010.

Ley 3/2005, de 23 de mayo, de prevención ambiental de Castilla y León, que modifica a la Ley 11/2003, de 8 de abril, de prevención ambiental de Castilla y León.

Decreto 18/2005, de 17 de febrero, por el que se aprueba el Plan Regional de Ámbito Sectorial de Residuos Urbanos y Residuos de Envases de Castilla y León 2004-2010.

Ley 8/2007, de 24 de octubre, de modificación de la Ley 11/2003, de 8 de abril, de prevención ambiental de Castilla y León.

Decreto 70/2008, de 2 de octubre, por el que se modifican los Anexos II y V y se amplía el Anexo IV de la Ley 11/2003, de 8 de abril, de prevención ambiental de Castilla y León.

Ley 1/2009, de 26 de febrero, de modificación de la Ley 11/2003, de 8 de abril, de prevención ambiental de Castilla y León.

Ley 10/2009, de 17 de diciembre, de medidas financieras, que modifica la disposición derogatoria única de la Ley 1/2009, de 26 de febrero, de modificación de la Ley 11/2003, de 8 de abril, de prevención ambiental de Castilla y León.

Orden HAC/108/2012, de 5 de marzo, por la que se aprueba el modelo de autoliquidación del impuesto sobre la eliminación de residuos en vertederos, sus normas de gestión y se regula su repercusión.

Orden FYM/162/2012, de 9 de marzo, por la que publica la relación de residuos susceptibles de valorización y se establecen los métodos y criterios para la estimación indirecta del peso y composición de residuos en el impuesto sobre la eliminación de residuos de Castilla y León.

4.4.3.8. Marco legislativo de residuos de construcción y demolición de Castilla-La Mancha

Castilla-La Mancha cuenta con su propio plan de acción vigente en materia de residuos de construcción y demolición:

Decreto 189/2005, de 13 de diciembre, por el que se aprueba el Plan de Castilla-La Mancha de Gestión de Residuos de Construcción y Demolición (2005-2015).

Además se han desarrollado los siguientes documentos que promueven la gestión de los residuos:

Decreto 70/1999, de 25 de mayo, por el que se aprueba el Plan de Gestión de Residuos Urbanos de Castilla-La Mancha.

Ley 10/2001, de 22 de noviembre, regula la adecuación de procedimientos administrativos de la Junta de Comunidades y la cesión de datos personales.

Ley 5/1999, de 8 de abril, de evaluación del impacto ambiental.

Decreto 126/99, de 29 de julio, de estructura orgánica y competencias de la Consejería de Agricultura y Medio Ambiente de Castilla La Mancha.

Decreto 118/2000, de 20 de junio, por el que se establecen umbrales y criterios para determinadas actividades del anejo 2 de la ley 5/1999, de 8 de abril.

Decreto 158/2001, de 5 junio, por el que se aprueba el Plan Regional de Residuos Tóxicos y Peligrosos.

Decreto 178/2002, de 17 de diciembre, por el se aprueba el Reglamento general de desarrollo de la Ley 5/1999, de 8 de abril, de evaluación de impacto ambiental de Castilla-La Mancha, y se adaptan sus anexos. Deroga totalmente el Decreto 118/2000, de 20 de junio.

Orden de 26 de enero de 2005, por la que se regula la autorización a entidades y profesionales para el seguimiento y control de actividades sometidas a evaluación de impacto ambiental.

Ley 4/2007, de 08 de marzo, de de evaluación ambiental, deroga la Ley 5/1999, de 8 de abril, de evaluación del impacto ambiental.

Decreto 179/2009, de 24 de noviembre, por el que se aprueba el II Plan de Gestión de Residuos Urbanos de Castilla-La Mancha 2009-2019.

4.4.3.9. Marco legislativo de residuos de construcción y demolición en Cataluña

La Comunidad Autónoma de Cataluña es la que más tempranamente comienza su andadura en regulación de la gestión de residuos de construcción y demolición. Los siguientes decretos lo atestiguan:

Decreto 201/1994, de 20 de julio, regulador de los escombros y otros residuos de construcción.

Decreto 161/2001, de 12 de junio de 2001, de modificación del Decreto 201/1994, de 20 de julio, regulador de los escombros y otros residuos de construcción.

Decreto 89/2010, de 29 de junio, por el que se aprueba el Programa de Gestión de Residuos de la Construcción de Cataluña (PROGROC), se regula la producción y gestión de los residuos de la construcción y demolición, y el canon sobre la deposición controlada de los residuos de la construcción. Deroga al Decreto 201/1994, de 20 de julio, regulador de los escombros y otros residuos de construcción, y al Decreto 161/2001, de 12 de junio de 2001, de modificación del Decreto 201/1994.

Además se ha venido promulgando una amplia sucesión de regulaciones en materia de residuos, vertederos e impacto ambiental, cuyo listado se presenta a continuación:

Decreto 64/1982, de 9 de marzo de 1982, tratamiento de desechos y residuos.

Ley 6/1993, de 15 de julio, reguladora de los residuos.

Decreto 115/1994, de 6 de abril, regulador del registro general de gestores de residuos.

Decreto 34/1996, por el que se aprueba el catálogo de residuos de Cataluña.

Decreto 1/1997, de 7 de enero, sobre la disposición residuos en depósitos controlados.

Ley 3/1998, de 27 de febrero, de la intervención integral de la administración ambiental.

Ley 1/1999, de 30 de marzo, de modificación de la disposición final cuarta de la Ley 3/1998, de 27 de febrero, de la intervención integral de la administración ambiental.

Decreto 92/1999, de 6 de abril, de modificación del Decreto 34/1996, por el que se aprueba el catálogo de residuos de Cataluña.

Decreto 93/1999, de 6 de abril, sobre procedimientos de gestión de residuos.

Decreto 136/1999, de 18 de mayo, por el que se aprueba el Reglamento general de desarrollo de la Ley 3/1998, de 27 de febrero, de la intervención integral de la administración ambiental, y se adaptan sus anexos.

Ley 11/2000, de 13 de noviembre, reguladora de la incineración de residuos.

Decreto 43/2000, de 26 de enero, del fondo de gestión de residuos.

Programa de Gestión de Residuos Municipales de Cataluña, 2001-2006

Programa de Gestión de Residuos de la Construcción de Cataluña, 2001-2006, aprobado el 28 de junio de 2001 por el consejo de dirección de la Junta de Residuos.

Programa de Gestión de Residuos Industriales de Cataluña, 2001-2006, aprobado el 11 de mayo de 2001 por el consejo de dirección de la Junta de Residuos.

Ley 13/2001, de 13 de julio, de modificación de la Ley 3/1998 de 27 de febrero, de la intervención integral de la administración ambiental.

Decreto 219/2001, deroga la disposición adicional tercera del Decreto 93/1999 de 6 de abril, sobre procedimientos de gestión de residuos.

Ley 15/2003, de 13 de junio, de modificación de la Ley 6/1993 reguladora de los residuos.

Ley 16/2003, de 13 de junio, de financiación de las infraestructuras de tratamiento de residuos y del canon sobre la disposición de residuos.

Ley 4/2004, de 1 de julio, reguladora del proceso de adecuación de las actividades de incidencia ambiental a lo establecido en la Ley 3/1998, de 27 de febrero, de la intervención integral de la administración ambiental.

Decreto 21/2006, de 14 de febrero, regula la adopción de criterios ambientales y de ecoeficiencia en los edificios.

Ley 8/2008, de 10 de julio, de financiación de las infraestructuras de gestión de los residuos y de los cánones sobre la disposición del desperdicio de los residuos, que deroga a la Ley 16/2003, de 13 de junio.

Ley 9/2008, de 10 de julio, de modificación de la Ley 6/1993, de 15 de julio, reguladora de los residuos.

Ley 6/2009, de 28 de abril, de evaluación ambiental de planes y programas.

Decreto Legislativo 1/2009, de 21 de julio, por el que se aprueba el Texto refundido de la Ley reguladora de los residuos.

Ley 20/2009, de 4 de diciembre, de prevención y control ambiental de las actividades, que deroga a la Ley 3/1998, de 27 de febrero, de la intervención integral de la administración ambiental.

Decreto 69/2009, de 28 de abril, por el cual se establecen los criterios y procedimientos de admisión de residuos en depósitos controlados.

Decreto 111/2009, de 14 de julio, de modificación del Decreto 21/2006, de 14 de febrero, regula la adopción de criterios ambientales y de ecoeficiencia en los edificios.

Decreto 16/2010, de 16 de febrero, por el que se aprueba el Plan Territorial Sectorial de Infraestructuras de Gestión de Residuos Municipales.

Decreto 87/2010, de 29 de junio, por el cual se aprueba el Programa de Gestión de Residuos Municipales de Cataluña (PROGEMIC) y se regula el procedimiento de distribución de la recaptación de los cánones sobre la disposición del desperdicio de los residuos municipales.

Decreto 88/2010, de 29 de junio, por el cual se aprueba el Programa de Gestión de Residuos Industriales de Cataluña (PROGRIC) y se modifica el Decreto 93/1999, de 6 de abril, sobre procedimientos de gestión de residuos.

4.4.3.10. Marco legislativo de residuos de construcción y demolición en la Ciudad Autónoma de Ceuta

En materia de residuos la Ciudad Autónoma de Ceuta sólo tiene la vigente:

Ordenanza de limpieza viaria y residuos sólidos urbanos de la Ciudad Autónoma de Ceuta.

4.4.3.11. Marco legislativo de residuos de construcción y demolición de Extremadura

Los residuos de construcción y demolición en la Comunidad Autónoma de Extremadura se rigen por:

Decreto 20/2011, de 25 de febrero, por el que se establece el régimen jurídico de la producción, posesión y gestión de los residuos de construcción y demolición en la Comunidad Autónoma de Extremadura.

En cuanto a los residuos en general, impacto ambiental y vertederos, cuentan con los siguientes documentos legislativos:

Orden de 9 de febrero de 2001, por la que se da publicidad al Plan Director de Gestión Integrada de Residuos de la Comunidad Autónoma de Extremadura.

Resolución de 12 de abril de 2010, de la Secretaría General, por la que se acuerda la publicación del Plan Integral de Residuos de Extremadura 2009-2015 (PIREX).

Ley 5/2010, de 23 de junio, de prevención y calidad ambiental de la Comunidad Autónoma de Extremadura.

Decreto 54/2011, de 29 de abril, por el que se aprueba el Reglamento de evaluación ambiental de la Comunidad Autónoma de Extremadura.

Ley 2/2012, de 28 de junio, de medidas urgentes en materia tributaria, financiera y de juego de la Comunidad Autónoma de Extremadura

Orden de 1 de agosto de 2012, por la que se aprueba el modelo 695 de autoliquidación y el modelo 698 de autoliquidación telemática del impuesto sobre la eliminación de residuos en vertedero, se determina la forma, el lugar de presentación y se crea el censo de entidades explotadoras de vertederos.

4.4.3.12. Marco legislativo de residuos de construcción y demolición de Galicia

La regulación sobre residuos de construcción y demolición en Galicia solamente se ha desarrollado mediante:

Decreto 352/2002, de 5 de diciembre, por el que se regula la producción de los residuos de la construcción y la demolición.

Resolución de 17 de julio de 2005, por la que se aprueba el Programa de Gestión de Residuos de Construcción y Demolición de Galicia 2005-2007.

No obstante existe una amplia lista de documentos jurídicos en materia de residuos, vertederos e impacto ambiental, que se detalla a continuación:

Decreto 72/1989, de 27 de abril, por el que se aprueba el Plan de Gestión y Tratamiento de Residuos Sólidos Urbanos de Galicia.

Decreto 442/1990, de 13 de septiembre, de evaluación del impacto ambiental para Galicia.

Decreto 327/1991, de 4 de octubre, de evaluación de efectos ambientales para Galicia.

Ley 1/1995, de 2 de enero, de protección ambiental de Galicia.

Ley 2/1995, de 31 de marzo, por la que se da una nueva redacción a la disposición derogatoria única de la Ley 1/1995, de protección ambiental de Galicia.

Decreto 156/1995, de 3 de junio, de inspección ambiental.

Decreto 455/1996, de 7 de noviembre, de fianzas en materia ambiental.

Ley 10/1997, de 22 de agosto, de residuos sólidos urbanos.

Decreto 260/1998, de 10 de septiembre, por el que se regula la autorización y se crea el registro de productores y gestores de residuos urbanos.

Decreto 263/1998, de 10 de septiembre, por el que se regula la autorización y se crea el registro de productores y gestores de residuos peligrosos.

Resolución de 28 de Octubre de 1998, por la que se acuerda hacer pública la adaptación del Plan de Gestión de Residuos Sólidos Urbanos de Galicia.

Decreto 154/1998, de 28 de mayo, por el que se publica el catálogo de residuos de Galicia.

Decreto 263/1998, de 10 de septiembre, por el que se regula la autorización y se crea el registro de productores y gestores de residuos peligrosos.

Resolución de 2 de Junio de 1999, por la que se ordena la publicación del Acuerdo del Consello de Xunta de Galicia, de 23 de Abril de 1999, por el que se aprueba definitivamente como plan sectorial de incidencia supramunicipal el Plan de Gestión de Residuos Sólidos Urbanos de Galicia.

Decreto 185/1999, de 17 de junio, por el que se establece el procedimiento para la aplicación en la Comunidad Autónoma gallega de un sistema voluntario de gestión y auditoría ambiental.

Resolución de 10 de Noviembre de 2000, por la que se acuerda la publicación de la estrategia gallega de gestión de Residuos.

Decreto 295/2000 de 21 de diciembre, por el que se desarrolla la Ley 1/1995 de 2 de enero, de protección ambiental de Galicia, en relación con el pacto ambiental en la Comunidad Autónoma de Galicia.

Decreto 298/2000, de 7 de Diciembre, por el que se regula la autorización y notificación de productor y gestor de residuos de Galicia y se crea el registro general de productores y gestores de residuos de Galicia.

Resolución de 21 de noviembre de 2001, por la que se acuerda hacer público el Plan de Gestión de Residuos Industriales y Suelos Contaminados de Galicia.

Decreto 4/2005, de 13 de enero, sobre colaboración técnica y financiera de la Consellería de Medio Ambiente con las entidades locales en materia de gestión de residuos.

Decreto 174/2005, del 9 de junio, por el que se regula el régimen jurídico de la producción y gestión de residuos y el registro general de productores y gestores de residuos de Galicia.

Orden del 15 de junio de 2006, por la que se desarrolla el Decreto 174/2005, del 9 de junio, por el que se regula el régimen jurídico de la producción y gestión de residuos y el registro general de productores y gestores de residuos de Galicia.

Decreto 133/2008, de 12 de junio, polo que se regula la evaluación de incidencia ambiental.

Ley 10/2008, de 3 de noviembre, de residuos de Galicia. Deroga a la Ley 10/1997, de 22 de agosto, de residuos sólidos urbanos.

Decreto 59/2009, del 26 de febrero, por el que se regula la trazabilidad de los residuos.

Orden de 20 de julio de 2009, por la que se regula la construcción y la gestión de los vertederos en el ámbito de la Comunidad Autónoma de Galicia.

4.4.3.13. Marco legislativo de residuos de construcción y demolición en Madrid

Los residuos de construcción y demolición producidos en el ámbito territorial de la Comunidad Autónoma de Madrid se han venido rigiendo por la siguiente regulación:

Acuerdo de 21 de febrero de 2002, que aprueba el Plan de Gestión Integrada de Residuos de Construcción y Demolición de la Comunidad de Madrid (2002-2011) (PGIRCD).

Orden 2690/2006, de 28 de julio, de la Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio, regula la gestión de los residuos de construcción y demolición en la Comunidad de Madrid.

Acuerdo de 18 de octubre de 2007, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba la Estrategia de residuos de la Comunidad de Madrid (2006-2016). Dentro de la cual se establece el Plan Regional de Residuos de Construcción y demolición de la Comunidad de Madrid (2006-2016).

Orden 2726/2009, de 16 de julio, por la que se regula la gestión de los residuos de construcción y demolición en la Comunidad de Madrid.

Así mismo, diversos han sido los documentos legislativos que en materia de residuos, vertederos e impacto ambiental se han promulgado, y cuyo listado se presenta a continuación:

Decreto 9/1995, de 9 de febrero, por el que se aprueban las líneas básicas del sistema de gestión e infraestructuras de tratamiento de los residuos sólidos urbanos en la Comunidad de Madrid.

Decreto 70/1997, de 12 de junio, por el que se aprueba el Plan Autonómico de Gestión de los Residuos Sólidos Urbanos de la Comunidad de Madrid 1997-2005.

Ley 2/2002, de 19 de junio, de evaluación ambiental de la Comunidad de Madrid.

Ley 5/2003, de 20 de marzo, de residuos de la Comunidad de Madrid.

Ley 6/2003, de 20 de marzo, del impuesto sobre depósito de residuos.

Declaración a los efectos de cumplimiento del artículo 14 de la Ley 9/2006, de 28 de abril, sobre la evaluación de los efectos de determinados planes y programas en el medio ambiente, en relación con la estrategia de residuos 2006-2016.

Acuerdo de 18 de octubre de 2007, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba la estrategia de residuos de la Comunidad de Madrid (2006-2016). La estrategia se divide en capítulos formados por, entre otros, los siguientes específicos:

- Plan regional de residuos urbanos de la Comunidad de Madrid (2006-2016).
- Plan regional de residuos industriales de la Comunidad de Madrid (2006-2016).

- Plan regional de residuos de suelos contaminados de la Comunidad de Madrid (2006-2016).

Ley 9/2010, de 23 de diciembre, de medidas fiscales, administrativas y racionalización del sector público. Modifica parcialmente la Ley 5/2003, de 20 de marzo, de residuos de la Comunidad de Madrid.

4.4.3.14. Marco legislativo de residuos de construcción y demolición en la Ciudad Autónoma de Melilla

Los residuos y vertederos se encuentran regulados en la Ciudad Autónoma de Melilla por:

Decreto n.º1005 de fecha 28 de agosto de 2009, relativo a aprobación definitiva del reglamento de utilización del vertedero controlado de residuos sólidos inertes de la Ciudad Autónoma de Melilla.

Ordenanza de protección de los espacios públicos en relación con su limpieza y retirada de residuos.

Ordenanza fiscal reguladora de la tasa por recogida de basura.

4.4.3.15. Marco legislativo de residuos de construcción y demolición de Murcia

La Comunidad Autónoma de Murcia no cuenta con ninguna regulación específica en materia de residuos de construcción y demolición, encontrándose igualmente muy poca documentación legal acerca de gestión residuos e impacto ambiental, como se puede observar en el siguiente listado:

Ley 1/1995, de 8 de marzo, de protección del medio ambiente de la región de Murcia.

Resolución de 26 de junio de 2001, del Gobierno de Murcia, por la que se aprueba el Plan de Residuos Urbanos y de los Residuos no Peligrosos de la Región de Murcia.

Decreto 48/2003, de 23 de mayo, por el que se aprueba el Plan de Residuos Urbanos y de los Residuos No Peligrosos de la Región de Murcia 2001-2006.

Ley 9/2005, de 29 de diciembre, de medidas tributarias en materia de tributos cedidos y tributos propios año 2006 (establece un impuesto sobre la eliminación de residuos inertes en vertederos en la Región de Murcia).

Orden de 12 de noviembre de 2007, por la que se hacen públicos los criterios de aplicación del trámite de evaluación ambiental estratégica a determinados tipos de instrumentos de planeamiento urbanístico.

Ley 13/2007, de 27 de diciembre, de modificación de la Ley 1/1995, de 8 de marzo, de protección del medio ambiente de la Región de Murcia.

Ley 4/2009, de 14 de mayo, de protección ambiental integrada de la Región de Murcia.

4.4.3.16. Marco legislativo de residuos de construcción y demolición de Navarra

Los residuos de construcción y demolición en Navarra cuenta en la actualidad con dos documentos vigentes:

Acuerdo de 27 de diciembre de 2010, del Gobierno de Navarra, por el que se formula declaración de incidencia ambiental favorable del Plan Integrado de Gestión de Residuos de Navarra 2010-2020 y se procede a la aprobación definitiva del mismo (Contiene subprograma de residuos de construcción y demolición).

Decreto Foral 23/2011, de 28 de marzo, por el que se regula la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición en el ámbito territorial de la Comunidad Foral de Navarra.

Por su parte también se ha desarrollado las siguientes regulaciones en materia de residuos e impacto ambiental:

Ley Foral 13/1994, de 20 de septiembre, de gestión de los residuos especiales.

Decreto Foral 295/1996, de 29 de julio, por el que se establece el régimen simplificado de control de la recogida de pequeñas cantidades de residuos especiales.

Acuerdo de 23 de marzo de 1998, del Gobierno de Navarra, por el que se aprueba el Plan Gestor de Residuos Especiales de Navarra.

Acuerdo de 25 de octubre de 1999, del Gobierno de Navarra, por el que se aprueba el Plan Integrado de Gestión de Residuos de Navarra.

Ley Foral 1/2001, de 13 de febrero, de modificación de la Ley Foral 13/1994, de 20 de septiembre, de gestión de los residuos especiales.

Ley Foral 4/2005, de 22 de marzo, de intervención para la protección ambiental. Deroga, entre otras, a la Ley Foral 13/1994, de 20 de septiembre, de gestión de los residuos especiales.

Decreto Foral 93/2006, por el que se aprueba el reglamento de desarrollo de la Ley Foral 4/2005, de 22 de marzo, de intervención para la protección ambiental.

4.4.3.17. Marco legislativo de residuos de construcción y demolición del País Vasco

Los residuos de construcción y demolición están regulados en el País Vasco por:

Decreto 423/1994, de 2 de noviembre, sobre gestión de residuos inertes e inertizados.

Orden de 15 de febrero de 1995, sobre el contenido de los proyectos técnicos y memorias descriptivas de instalaciones de vertederos de residuos inertes o inertizados, rellenos y acondicionamientos de terrenos.

Decreto 112/2012, de 26 de junio, por el que se regula la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición.

La regulación relativa a los residuos en general, impacto ambiental y vertederos se hace a través de:

Resolución de 8 de Abril de 1996, por la que se dispone la publicación del convenio marco de colaboración entre el Departamento de Ordenación del Territorio, Vivienda y Medio Ambiente del País Vasco y el Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente, para la realización de actuaciones derivadas del Plan Nacional de Residuos Peligrosos (1995-2000).

Plan Integral de Gestión de los Residuos Sólidos Urbanos del territorio histórico de Bizkaia (1997-2001).

Ley 3/1998, de 27 de febrero, general de protección del medio ambiente del País Vasco.

Resolución de 15 de septiembre de 2000, del director de calidad ambiental, por la que se adjudican los trabajos de estudio sobre las actividades de producción, movimiento y gestión de residuos peligrosos.

Decreto 34/2001, de 20 de Febrero, por el que se determinan los órganos competentes de la Comunidad Autónoma en relación con las medidas de control de los riesgos inherentes a los accidentes graves en los que intervengan sustancias peligrosas.

Resolución de 4 de Octubre de 2002, del viceconsejero de medio ambiente, por la que se acuerda someter a información pública el Plan de Gestión de Residuos Peligrosos de la Comunidad Autónoma del País Vasco (2002-2006).

Acuerdo de 4 de junio de 2002, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba la estrategia ambiental vasca de desarrollo sostenible 2002-2020 y el primer programa marco ambiental 2002-2006.

Plan Integral de Gestión de Residuos Urbanos de Guipúzcoa 2002-2016, aprobado en Consejo de Diputados, en sesión de 17 de diciembre de 2002.

Plan de prevención y gestión de residuos peligrosos 2008-2011.

Decreto 49/2009, de 24 de febrero, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero y la ejecución de los rellenos.

Orden de 30 de abril de 2009, de la Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio por la que se aprueba el Plan de Gestión y Prevención de Residuos No Peligrosos de la Comunidad Autónoma del País Vasco 2009-2012.

4.4.3.18. Marco legislativo de residuos de construcción y demolición de La Rioja
La Rioja no cuenta con una legislación específica en residuos de construcción y demolición, no obstante están contemplados en el siguiente Plan Director de Residuos:

Decreto 62/2008, de 14 de noviembre, por el que se aprueba el Plan Director de Residuos de La Rioja 2007-2015.

El resto de legislación en materia de residuos, vertederos e impacto ambiental está recogida en los siguientes documentos:

Orden de 25 de mayo de 1992, de creación del registro de pequeños productores de residuos tóxicos y peligrosos.

Decreto 46/1994, de 28 de julio, por el que se regula el régimen de gestión de los residuos sólidos urbanos.

Resolución de 24 de Abril de 1996, por la que se dispone la publicación del convenio marco de colaboración y Addenda correspondiente entre la Consejería de Medio Ambiente de la Comunidad Autónoma de La Rioja y el Ministerio de Obras Públicas, Transportes y medio Ambiente, para la realización de actuaciones derivadas del Plan Nacional de Residuos 1995-2000.

Decreto 14/1998, de 20 de febrero, por el que se modifica el Decreto 46/1994, de 28 de julio, de gestión de residuos sólidos urbanos.

Acuerdo de 4 de diciembre de 2000, por el que se aprueba el Plan Director de Residuos de La Rioja 2000-2006.

Ley 5/2002, de 8 de octubre, de protección del medio ambiente de La Rioja

Decreto 4/2006, de 13 de enero, regulador de las actividades de producción y gestión de residuos, que deroga al Decreto 46/1994, de 28 de julio y a la Orden de 25 de mayo de 1992, de creación del registro de pequeños productores de residuos tóxicos y peligrosos.

Decreto 62/2006, de 10 de noviembre, por el que se aprueba el Reglamento de desarrollo del Título I, "Intervención Administrativa", de la Ley 5/2002, de 8 de octubre, de protección del medio ambiente de La Rioja.

Decreto 20/2009, de 3 de abril, por el que se regula el procedimiento administrativo de evaluación ambiental de planes y programas.

4.4.3.19. Marco legislativo de residuos de construcción y demolición de la Comunidad Valenciana

La Comunidad Valenciana tiene vigente los siguientes documentos que regulan la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición:

Decreto 200/2004, de 1 de octubre, del Consell de la Generalitat, por el que se regula la utilización de residuos inertes adecuados en obras de restauración, acondicionamiento y relleno, o con fines de construcción.

Plan integral de residuos de la Comunidad Valenciana 2010.

En materia de residuos en general, impacto ambiental y vertederos se han promulgado los siguientes:

Ley 2/1989, de 3 de marzo, de estudios de impacto ambiental.

Decreto 162/1990, de 15 de octubre, por el que se aprueba el reglamento de Ley de 3 de marzo de 1989, de impacto ambiental.

Orden de 6 de Julio de 1994, del Conseller de Medio Ambiente, por la que se regulan los documentos de control y seguimiento de residuos tóxicos y peligrosos para emplear únicamente por pequeños productores de residuos.

Resolución de 15 de Enero de 1996, por la que se dispone la publicación del convenio marco de colaboración y Addenda correspondiente entre la Consejería de Medio Ambiente de la Comunidad Autónoma de Valencia y el Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente, para la realización de actividades derivadas del Plan Nacional de Residuos Peligrosos (1995-2000).

Decreto 317/1997, de 24 de diciembre, por el que se aprueba el Plan Integral de Residuos de la Comunidad Valenciana.

Decreto 202/1997, de 1 de julio. Regula la tramitación y aprobación del Plan Integral de Residuos de la Comunidad Valenciana.

Decreto 32/1999, de 2 de marzo, del Gobierno Valenciano, por el que se aprueba la modificación del Plan Integral de Residuos de la Comunidad Valenciana.

Ley 10/2000, de 12 de diciembre, de residuos de la Comunidad Valenciana.

Orden de 4 de octubre de 2001, del Conseller de Medio Ambiente, por la que se aprueba el Plan Zonal de Residuos de la Zona I.

Orden de 12 de noviembre de 2001, del Conseller de Medio Ambiente, por la que se aprueba el Plan Zonal de Residuos de la Zona XV.

Orden de 18 de enero de 2002, del Conseller de Medio Ambiente, por la que se aprueba el Plan Zonal de Residuos de las Zonas III y VIII.

Orden de 29 de octubre de 2004, del Conseller de Territorio y Vivienda, por la que se aprueba el Plan Zonal de Residuos de las Zonas X, XI, y XII.

Orden de 29 de octubre de 2004, del Conseller de Territorio y Vivienda, por la que se aprueba el Plan Zonal de Residuos de las Zonas VI, VII y IX.

Orden de 2 de diciembre de 2004, del Conseller de Territorio y Vivienda, por la que se aprueba el Plan Zonal de Residuos de la Zona XIII.

Orden de 2 de diciembre de 2004, del Conseller de Territorio y Vivienda, por la que se aprueba el Plan Zonal de Residuos de las Zonas II, IV y V.

Orden de 29 de diciembre de 2004, del Conseller de Territorio y Vivienda, por la que se aprueba el Plan Zonal de Residuos de la Zona XIV.

Orden de 29 de diciembre de 2004, del Conseller de Territorio y Vivienda, por la que se aprueba el Plan Zonal de Residuos de la Zona XVI.

Orden de 29 de diciembre de 2004, del Conseller de Territorio y Vivienda, por la que se aprueba el Plan Zonal de Residuos de la Zona XVIII.

Orden de 3 de enero de 2005, por la que se establece el contenido mínimo de los estudios de impacto ambiental.

Orden de 15 de abril de 2005, del Conseller de Territorio y Vivienda, por la que se aprueba el Plan Zonal de Residuos de la Zona XVII.

Decreto 32/2006, por el que se modifica el Decreto 162/1990, de 3 de marzo.

Ley 2/2006, de 5 de mayo, de prevención de la contaminación y calidad ambiental.

Decreto 127/2006, de 15 de septiembre, del Consell, por el que se desarrolla la Ley 2/2006, de 5 de mayo, de la Generalitat, de prevención de la contaminación y calidad ambiental.

4.5. Marco técnico de los áridos reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición

Los residuos de construcción y demolición, como ya se ha puesto de manifiesto, previo proceso adecuado de valorización que los transforme en materiales granulares, se pueden emplear en distintos usos como árido, entre los que

destaca la construcción de carreteras (Agrela, Barbudo et al. 2012, Debieb, Courard et al. 2009, Herrador, Pérez et al. 2011, Poon, Chan 2006, Vegas, Ibañez et al. 2011), la fabricación de hormigón estructural (Rahal 2007, Gómez Soberón, Vázquez Ramonich et al. 2001, GEHO-CEB. Grupo Español del Hormigón 1997, Etxeberria, Vázquez et al. 2007, Sánchez de Juan, Gutiérrez Alaejos 2009) y en aplicaciones no estructural (Soutsos, Tang et al. 2011, Soutsos, Tang et al. 2011, Gencel, Ozel et al. 2012, de Brito, Pereira et al. 2005).

En este apartado se analizarán las especificaciones técnicas recogidas en las normas y guías de recomendaciones recopiladas al respecto sobre el uso de áridos reciclados en su aplicación como hormigón. A tal efecto, en la mayoría de las ocasiones, se ha tenido que recurrir a los datos que aparecen en diferentes publicaciones científicas, ya que los organismos de normalización de cada país, celosos de su contenido, no permiten su publicación sino un uso de los documentos particularizado.

Aunque el uso de productos reciclados resulta beneficioso, tanto técnica como medioambientalmente, se ha observado que existe una amplia dispersión en cuanto a las clasificaciones que la normativa técnica establece por tipos de áridos reciclados, así como en cuanto a las especificaciones exigidas y a las limitaciones impuestas a cada especificación. Por lo que se pone de manifiesto la carencia de normativa técnica que establezca las diferentes aplicaciones de estos materiales granulares, en las que se distingan, por una parte, qué tipos de áridos se pueden emplear, y por otra, cuáles son las prescripciones que se les exigen y en qué nivel de exigencia se encuentran tales prescripciones.

Antes de proceder a la revisión de la normativa técnica encontrada, hemos de poner de manifiesto que, a pesar de las medidas tomadas al efecto, en la actualidad la normativa técnica y legal no lo apoya ni fomenta suficientemente el empleo de materiales y productos reciclados (Tam, Tam et al. 2007).

4.5.1. Alemania

La norma DIN 4226-100 “*Áridos para morteros y hormigones. Parte 100: áridos reciclados*” (DIN 4226-100 2002), en su actualización de 2002, establece los requisitos que deben cumplir los áridos reciclados de densidad superior a 1500 kg/m³ para su uso en morteros y hormigones, así mismo establece el control de producción y los criterios de conformidad de los productos.

Esta norma establece una de las más amplias clasificaciones de los áridos reciclados, diferenciando las cuatro categorías siguientes, en base a la composición principal que presenta el árido:

- Tipo 1, áridos procedentes en su mayoría de escombros de hormigón o áridos minerales, en más de un 90%, y un contenido máximo de clinker, ladrillo y/o arenisca calcárea del 10%.

- Tipo 2, áridos procedentes en su mayoría de escombros de hormigón o áridos minerales, en más de un 70%, y un contenido máximo de clinker, ladrillo y/o arenisca calcárea del 30%.
- Tipo 3, áridos procedentes en su mayoría de escombros cerámicos, en más de un 80%, con un contenido máximo de materiales procedentes de hormigón o áridos minerales del 20%.
- Tipo 4, áridos procedentes de una mezcla de RCD con un contenido mínimo del 80% de material procedente de hormigón, áridos minerales o productos cerámicos.

La composición total de estos materiales granulares está recogida en la Tabla 8, donde se aprecia que, además de los componentes principales que definen a los cuatro tipos de áridos, se permiten diferentes cantidades de otros, que por su peligrosidad, pueden aparecer en proporciones minoritarias.

Tabla 8. Composición del árido reciclado para hormigón según la norma DIN 4226-100

COMPOSICIÓN	ARIDO RECICLADO CLASE A			
	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4
Hormigón y componentes pétreos	≥ 90	≥ 70	≤ 20	≥ 80
Ladrillos poco porosos	≤ 10	≤ 30	≥ 80	
Material pétreo			≤ 5	
Otros (ladrillos porosos, hormigón ligero, hormigón celular, morteros, estucos, escorias y piedras porosas)	≤ 2	≤ 3	≤ 5	≤ 20
Asfalto	≤ 1	≤ 1	≤ 1	
Impurezas minerales (vidrio, cerámica, metales no férricos, yeso, caucho, plástico, madera, papel)	≤ 0.2	≤ 0.5	≤ 0.5	≤ 1

Fuente: Elaboración propia según la norma DIN 4226-100

Además de los requisitos de composición, la DIN 4226-100 recoge una serie de limitaciones en cuanto a algunas de las especificaciones físicas y químicas de los áridos reciclados. Dichas especificaciones se encuentran recogidas en la Tabla 9.

Tabla 9. Prescripciones del árido reciclado para hormigón según la norma DIN 4226-100

PRESCRIPCIÓN	AGREGADO RECICLADO CLASE A			
	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4
Densidad seca mínima (kg/m ³)	2000		1800	1500
Absorción máxima medida a los 10 minutos (%)	10	15	20	-
Contenido en finos (< 0.063mm) Declarar categoría	$f_1 < 1$ $f_{1.5} < 1.5$ $f_3 < 3$ $f_4 < 4$			
Contenido en sulfatos solubles en ácido máximo (%)	0.8			-
Contenido en cloruros solubles en ácido máximo (%)	0.04			0.15

Fuente: Elaboración propia según la norma DIN 4226-100

Con carácter general la norma alemana permite sustituir hasta un 5% de árido grueso reciclado sin necesidad de establecer restricciones adicionales al mismo. En todo caso se permite aumentar el porcentaje de sustitución hasta los valores establecidos en la Tabla 10, siempre que se realicen las correspondientes comprobaciones adicionales al hormigón elaborado con ellos.

Tabla 10. Porcentaje de sustitución de árido grueso reciclado para hormigón según la norma DIN 4226-100

AMBIENTE DE EXPOSICIÓN	PORCENTAJE DE SUSTITUCIÓN DE ARIDO GRUESO REICLADO	
	% EN VOLUMEN MÁXIMO	COMPROBACIÓN ADICIONAL
No agresivo	< 50	$f_c \leq 25$ MPa
	< 40	$f_c \leq 35$ MPa
Agresividad por humedad, agua de mar o química	30	Comprobar reacción árido-álcalis

Fuente: Elaboración propia según la norma DIN 4226-100

4.5.2. Australia

La Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO), en colaboración con el Ministerio de Medio ambiente y Patrimonio australiano, publicó en septiembre de 1998 la guía de especificaciones del árido reciclado de hormigón para la producción de hormigón en masa y armado de uso no estructural de resistencia inferior a 40MPa (Sagoe-Crentsil, Brown 1998).

En la guía se define al árido reciclado de hormigón como el árido grueso reciclado de tamaño 4-32mm, que debe tener una granulometría uniforme, producido a partir de hormigón triturado, con un total de contaminantes inferior al 2% en masa. En cuanto a la composición, se indica que este árido estará constituido por grava, piedra triturada, hormigón o una combinación de ellos

Así mismo, se define el hormigón reciclado como el producido con el árido grueso reciclado anterior, con la incorporación de arena natural como fracción fina.

En este documento se clasifica al árido reciclado en dos clases: clase 1 es el árido reciclado destinado a la fabricación de hormigón, y clase 2 el empleado para la ejecución de bases y subbases de carreteras. Dentro de la clase 1 se contemplan dos tipos de áridos reciclados:

- Clase 1A, compuesta por el árido grueso uniformemente graduado de tamaño 4-32mm, procedente del procesamiento del residuos de hormigón, con un total del 1% de contaminantes sobre el peso total.
- Clase 1B, sería en la que se incluye el árido grueso reciclado de la clase 1A que se encuentre mezclado con no más de del 30% del materiales cerámicos.

En cuanto a su composición, la guía CSIRO recomienda que ambas clases de áridos cumplan lo indicado en la Tabla 11.

Los requisitos físicos que se le exigen a ambos tipos de áridos gruesos reciclados se muestran en la Tabla 12, donde se puede constatar que la guía no incluye limitación acerca de los contaminantes químicos del árido reciclado, que pueden afectar negativamente a las propiedades del hormigón, ni de los correspondientes requisitos mecánicos. En estos casos remite a lo establecido en la regulación existente para el árido natural.

Tabla 11. Composición del árido grueso reciclado para hormigón según la guía CSIRO

COMPOSICIÓN	ÁRIDO RECICLADO	
	CLASE 1A	CLASE 1B
Contenido en hormigón (%)		-
Contenido en piedra natural y árido no tratado con conglomerantes hidráulicos (%)	≥ 90	< 5
Contenido en material de albañilería (%)	≤ 10	< 30
Contenido en material bituminoso (%)	≤ 1	
Otros materiales cohesivos, maderas, metales, plástico, caucho (%)	≤ 2	< 2

Fuente: Elaboración propia según la guía CSIRO

Tabla 12. Prescripciones del árido grueso reciclado para hormigón según la guía CSIRO

PRESCRIPCIÓN	ÁRIDO RECICLADO	
	CLASE 1A	CLASE 1B
Densidad seca mínima de las partículas (kg/m ³)	2100	1800
Densidad de conjunto mínima (kg/m ³)	1200	1000
Absorción de agua máximo (%)	6	8
Índice de partículas trituradas mínimo (%)	30	30
Coefficiente de forma de las partículas máximo (%)	35	35
Contenido de impurezas máximo (%)	1	2
LOI máximo (%) (*)	5	5
Perdida de material por lavado máximo (%)	1	1
(*) LOI, loss of ignition o pérdida de peso por calcinación		

Fuente: Elaboración propia según la guía CSIRO

Las aplicaciones permitidas para los áridos gruesos reciclados de hormigón (Clase 1A) o mixtos (Clase 1B) se expresan en función de los siguientes grados de exigencia:

- Grado 1, hormigón en masa y hormigón armado fabricado con un máximo del 30% de árido reciclado de calidad uniforme Clase 1^a, con una resistencia característica de 40MPa.
- Grado 2, hormigón en masa y hormigón armado fabricado con un máximo del 30% de árido reciclado de calidad uniforme Clase 1 (A o B), con una resistencia característica de 25MPa, para hormigón de usos no estructurales.

En todo caso, la guía recomienda siempre utilizar el árido reciclado premojado durante al menos 10 minutos, para evitar los efectos negativos que pueda producir en la pasta de cemento por su pronunciada absorción al agua.

4.5.3. Bélgica

Las prescripciones técnicas PTV-406 es el documento normativo elaborado en 2003 por el Organismo Imparcial de Control de Productos para la Construcción belga (COPRO asbl) (PTV 406 2003). Dichas prescripciones fueron posteriormente validadas por el Instituto Belga de Normalización (IBN), estableciendo la categorización de los áridos reciclados procedentes de residuos de hormigón, albañilería o asfálticos, de acuerdo con las especificaciones establecidas en las normas vigentes. La norma establece cinco tipos diferentes de áridos reciclados, cuya composición se señala en la Tabla 13, aunque sólo permite en la elaboración de hormigón la utilización de los procedentes de hormigón, albañilería o mixtos.

Tabla 13. Composición de los áridos reciclados según la norma PTV-406

COMPOSICIÓN	PROCEDENCIA DEL ÁRIDO RECICLADO				
	HORMIGÓN	ALBAÑILERÍA	MIXTO	ASFÁLTICO	HORMIGÓN/ ASFALTO
Hormigón y material pétreo (%)	> 90	< 40	> 40	< 30	> 55
Material de albañilería (ladrillos, tejas, morteros,...) (%)	< 10	> 60	> 10	-	< 10
Otros materiales pétreos (arcilla expandida, hormigón celular, escoria,...) (%)	< 5	-	-	-	< 5
Mezclas bituminosas (asfaltos, betunes,...) (%)	< 5	< 5	< 5	> 70	< 30
Material no pétreo (yeso, plásticos, vidrio, metales,...) (%)	≤ 0.5	≤ 1	≤ 1	≤ 1	≤ 1
Material orgánico (restos de plantas, papel, madera, corcho,...) (%)	≤ 0.5	≤ 0.5	≤ 0.5	≤ 0.5	≤ 0.5

Fuente: Elaboración propia según la norma PTV-406

Respecto de las prescripciones que los áridos deben de cumplir, la norma no establece ninguna limitación. Tan solo solicita del fabricante la declaración de las categorías que presentan en cuanto a diferentes requisitos físicos, mecánicos y químicos, de acuerdo con la norma armonizada europea EN 12620 (UNE-EN 12620:2003+A1 2009).

Aunque en el anexo belga NBN B15-001 de la norma europea EN 206-1 (UNE-EN 206-1 2008) no se menciona el uso de árido reciclado, sólo las prescripciones técnicas TRA 550 (CRIC 2004) permiten desde 2004 el uso de árido reciclado en la elaboración de hormigón. En estas prescripciones, según Vyncke and Vrijders (Vyncke, Vrijders 2010), se contempla el uso de hasta un 20% de árido grueso reciclado en hormigones no sometidos a ambientes de riesgo o en interior (X0, XC1), limitados a la clase resistente C16/20.

4.5.4. Brasil

La Comisión de Árido Reciclado de Residuos Sólidos de la Construcción Civil CE-18:200.05 del comité ABNT/CB-18 de la Asociación Brasileña de Normas Técnicas, es la encargada de elaborar la norma brasileña NBR 15116 sobre “*Agregados reciclados de residuos sólidos da construção civil - Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural-Requisitos*” (Áridos reciclados de residuos sólidos de construcción civil – Utilización en pavimentado y fabricación de hormigón sin función estructura–Requisitos) (NBR 15116 2005).

Esta norma, en su versión de 2005, establece los requisitos que deben cumplir los áridos reciclados procedentes de los residuos sólidos de construcciones civiles para la ejecución de pavimentación viaria y la elaboración de hormigón reciclado sin misión estructural. A tal efecto, define 4 clases de residuos (A, B, C y D) de los cuales sólo la clase A, residuos de construcción, demolición, reformas y reparación de pavimentos, edificaciones o prefabricados de hormigón, pueden ser reutilizables como áridos reciclados. Dentro de esta clase diferencia dos tipos de áridos reciclados:

- ARC, el procedente de RCD de clase A compuesto en más del 90% de áridos naturales y áridos de hormigón,
- ARM, el procedente de RCD de clase A formado por menos de un 90% de áridos naturales y áridos de hormigón.

De acuerdo con la norma brasileña, los áridos reciclados para la fabricación de hormigón no estructural deben cumplir las limitaciones de la Tabla 14.

La norma destaca que ante granulometrías de los áridos reciclados poco adecuadas, cabe la corrección mediante los correspondientes áridos convencionales.

Un aspecto representativo que recoge la norma, es la recomendación a cerca de la utilización del árido reciclado previamente mojado para compensar la elevada absorción que presentan, indicando como cuantía sancionada por la práctica, la humectación del mismo en un valor del 80% de su absorción.

Tabla 14. Prescripciones del árido reciclado para hormigón según la norma MBR 15116

PRESCRIPCIÓN		ÁRIDO RECICLADO CLASE A			
		ARC		ARM	
		GRUESO	FINO	GRUESO	FINO
Contenido de fragmentos de cemento y rocas (%)		≥ 90	-	< 90	-
Absorción de agua máximo (%)		7	12	12	17
Contaminantes -valores máximos (% en peso)	Cloruros	1			
	Sulfatos	1			
	Materiales no minerales (*)	2			
	Terrones de arcilla	2			
	Total de contaminantes	3			
CBR mínimo		12-60			
Expansibilidad máxima		0.5-1			
(*) Madera, plástico, betún, materiales carbonizados, vidrios y vidrios cerámicos.					

Fuente: Elaboración propia según la norma MBR 15116

4.5.5. China

Las especificaciones técnicas para la aplicación del hormigón elaborado con áridos reciclados DG/TJ07/008 de la Shanghai Construction Standard Society (SCSS) publicadas en 2007, establecen los requisitos exigibles al árido grueso reciclado para la fabricación de hormigón (Shanghai Construction Standard Society (SCSS) 2007).

Tabla 15. Prescripciones del árido grueso reciclado para hormigón según la norma DG/TJ07/008

PRESCRIPCIÓN	ÁRIDO RECICLADO	
	TIPO I (Uso estructural)	TIPO II (Uso no estructural)
Densidad seca mínima de las partículas (kg/m ³)	2400	2200
Absorción de agua máximo (%)	7	10
Índice de partículas trituradas mínimo (%)	30	-
Índice de lajas máximo (%)	15	-
Contenido en material cerámico máximo (%)	5	10
Contenido en arcilla máximo (%)	4	-
Contenido de impurezas máximo (%)	1	-
Pérdida de masa por sulfato magnésico (%)	18	-
Contenido en sulfatos máximo	1	-
Contenido en cloruros máximo (%)	0.25	-
Contenido en materia orgánica máximo (%)	0.5	-

Fuente: Elaboración propia según la norma DG/TJ07/008

Esta norma recoge dos tipos de áridos gruesos reciclados según vayan a ser utilizados en la elaboración de hormigón estructural (Tipo I) o no estructural (Tipo II). Los requisitos técnicos que han de cumplir se resumen en la Tabla 15.

4.5.6. Corea

La norma coreana KS F 2573 de 2011 (KS F 2573 2011) permite el uso de árido reciclado, tanto fino como grueso en la elaboración de hormigón estructural. No obstante, como se puede observar en los límites recogidos en la Tabla 16, los valores en cuanto a densidad y absorción son tan estrictos, que el árido reciclado que en la práctica se puede utilizar debe de cumplir un grado de exigencia muy elevado.

Tabla 16. Prescripciones del árido reciclado según la norma KS F 2573

PRESCRIPCIÓN	ÁRIDO GRUESO	ÁRIDO FINO
Densidad seca de las partículas mínima (kg/m ³)	2500	2200
Absorción de agua máximo (%)	3	5
Contenido en finos (< 0.08mm) máximo (%)	1	7
Contenido de sólidos en volumen mínimo (%)	55	53
Contenido en arcilla máximo (%)	0.2	1
Contenido en sustancias peligrosas máximo (%)	Orgánicas	1 (en volumen)
	Inorgánicas	1 (en peso)
Resistencia a la fragmentación de Los Ángeles máxima	40	
Pérdida de peso por sales máxima (%)	12	10
Reacción árido-álcalis	No reactivo	

Fuente: Elaboración propia según la norma KS F 2573

4.5.7. España

4.5.7.1. Proyecto GEAR: Guía española de áridos reciclados procedentes de RCD

El proyecto GEAR (Proyecto GEAR 2012) es una iniciativa de la Asociación Española de Gestores de RCD cuyo objetivo, desde su fundación en 1994, ha sido promover la normalización y promoción de los áridos reciclados y los materiales reciclados procedentes del tratamiento de los RCD. En el proyecto, que se ha desarrollado en el marco de Proyectos de Desarrollo Experimental del Plan Nacional de Investigación Científica, Desarrollo e Innovación Tecnológica en el periodo 2008-2011, han intervenido 24 empresas de reciclaje, 4 Universidades y 3 Centros Públicos de investigación.

Como resultado del proyecto se acaba de publicar una guía de recomendaciones técnicas y fichas de uso aplicables a todos los áridos procedentes del reciclaje de residuos de construcción y demolición que vayan a ser utilizados como materiales de construcción, en la que se contemplan las 6 siguientes recomendaciones técnicas en usos no ligados y ligados:

- GEAR RT-01 recomendaciones técnicas para los áridos procedentes de RCD a utilizar como material granular en firmes,
- GEAR RT-02 recomendaciones técnicas para los áridos procedentes de RCD a utilizar como material granular en rellenos y explanaciones,
- GEAR RT-03 recomendaciones técnicas para los áridos procedentes de RCD a utilizar como material tratado con ligantes hidráulicos en firmes y explanaciones,
- GEAR RT-04 recomendaciones técnicas para los áridos procedentes de RCD a utilizar como material tratado con ligantes hidráulicos en prefabricados,
- GEAR RT-05 recomendaciones técnicas para los áridos procedentes de RCD a utilizar como material tratado con ligantes hidráulicos en hormigones en masa,
- GEAR RT-06 recomendaciones técnicas para los áridos procedentes de RCD a utilizar como material tratado con ligantes hidráulicos en hormigones compactados con rodillo.

La guía propone una clasificación de los áridos reciclados en base a su composición formada por cinco categorías, de la siguiente manera:

- Categoría ARH (Áridos Reciclados de Hormigón): el contenido de hormigón y piedra natural (sin mortero adherido) es del 90% o más en peso.
- Categoría ARMh (Áridos Reciclados Mixtos de Hormigón): el contenido de hormigón y piedra es menor al 90% y el de material cerámico no alcanza el 30%.
- Categoría ARMc (Áridos Reciclados Mixtos Cerámicos): el contenido de material cerámico supera el 30%.
- Categoría ARC (Áridos Reciclados Cerámicos): el contenido de material cerámico supera el 70%. Este tipo de árido reciclado es de origen prácticamente industrial.
- Categoría ARMa (Áridos Reciclados Mixtos con Asfalto): el contenido de materiales bituminosos está entre el 5% y el 30%.

La propuesta de clasificación se presenta en total consonancia con la clasificación que realiza la norma EN 933-11 (UNE EN 933-11 2009), salvo en el contenido en otros componentes (cohesivos, metales, madera, plástico, yeso) designados con la letra X, cuyo valor límite resulta más permisivo en esta guía.

La Tabla 17 recoge la propuesta de clasificación que se realiza en el proyecto, en base a la composición de los áridos reciclados, para cada una de las recomendaciones técnicas contempladas en el documento.

Los requisitos técnicos que la guía contempla para las diferentes recomendaciones técnicas, en base a las experiencias contrastadas en diferentes estudios experimentales y casos reales en el territorio español, se resumen en la Tabla 18 y la

Tabla 19.

Tabla 17. Propuesta de clasificación de los áridos reciclados para las recomendaciones técnicas de la guía GEAR

COMPOSICIÓN	GEAR RT-01, RT-02, RT-03, RT-04 y RT-05		GEAR RT-06
Contenido en productos pétreos (Ru) + Contenido en hormigón y mortero (Rc) (%)	ARH	≥ 90	> 50
	ARMh	≥ 70	
	ARMc	< 70	
	ARMa	-	
Contenido en material cerámico (Rb) (%)	ARH	≤ 10	< 50
	ARMh	≤ 30	
	ARMc	> 30	
	ARMa	-	
Contenido en asfalto (Ra) (%)	ARH	≤ 5	< 5
	ARMh	≤ 5	
	ARMc	≤ 5	
	ARMa	5-30	
Otros (cohesivos, metales, madera, plástico, yeso) (X) (%)	ARH	≤ 1	< 1
	ARMh	≤ 1	
	ARMc	≤ 1	
	ARMa	≤ 1	
Materiales flotantes (FL) (%)	-	-	< 2cm ³ /kg

Fuente: Elaboración propia según la guía GEAR

4.5.7.2. Instrucción EHE-08

Tradicionalmente los áridos empleados en la elaboración de hormigón en España han de cumplir las prescripciones establecidas en la Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08 de 2008 (EHE-08 2008).

Esta norma, de obligado cumplimiento, establece en su artículo 28 los requisitos físicos, mecánicos y químicos de los áridos, sin mencionar expresamente a los áridos reciclados. No obstante, en el anejo 13, sobre la contribución de la estructura a la sostenibilidad, se valora muy positivamente el empleo de áridos procedentes de reciclado. En este sentido, el anejo 15 de la misma, sobre recomendaciones para la utilización de hormigones reciclados, permite la utilización exclusivamente de hasta un 20% de árido grueso reciclado procedente de hormigón en aplicaciones estructurales; y en el anejo 18, de hormigones no estructurales, permite hasta el 100%, siempre que cumpla lo establecido en el anejo anterior.

En la Tabla 20 se presentan los requisitos que deben cumplir los áridos según la Instrucción EHE-08. Es preciso destacar que las limitaciones del artículo 28, se entienden, son de aplicación para los áridos reciclados empleados en la elaboración de hormigón estructural y no estructural, salvo que se especifique otra cosa en los correspondientes anejos 15 y 18.

Tabla 18. Prescripciones del árido reciclado para las recomendaciones técnicas de la guía GEAR

PRESCRIPCIÓN	GEAR RT-01	GEAR RT-02	GEAR RT-03	GEAR RT-04	GEAR RT-05	GEAR RT-06
Tipo de árido	Todo uno	Todo uno	Todo uno	Todo uno	Grueso	Grueso
Categoría de árido	ARH, ARMh, ARMc, AR Ma	ARH, ARMh, ARMc, ARMa	ARH, ARMh, ARMc, ARMa	ARH, ARMh, ARMc, ARMa	ARH, ARMh, ARMc	ARH, ARMh, ARMc
Contenido en arena reciclada máximo (< 4mm) (%)				48-75	5	
Contenido en finos (<0.063mm) máximo (%)				8-18		
Contenido en desclasificados inferiores máximo (%)					10	
Terrones de arcilla máximo (%)	1		0.25 (AF) 1 (AG)		0.25-0.6	
Partículas flotantes ≤ 2 cm ³ /kg máximo (%)					1	
Partículas ligeras máximo (%)					1	
Equivalente de arena mínimo	30-40	30	35-40	≥ 50 ó ≥ 20 y A.M.<4.5-6.5		
Índice de lajas máximo (%)	35		30-40	35	35	30-35
Angulosidad mínima (%)	50-100		30-75			
Absorción de agua máximo (%)				8-11	9-12	10
Densidad mínima kg/cm ³						2100
Resistencia a la fragmentación máximo (%)	35-45	40-45	35-45	40-50	50	35-40
Pérdida de peso al hielo-deshielo máximo (%)				1 (*)		
Pérdida de peso al sulfato magnésico máximo (%)					18	
Contenido en cloruros totales máximo (%)				0.05	0.05	
A.M.: Ensayo de azul de metileno						
(*) Ningún valor individual debe ser mayor de 1.5%						

Fuente: Elaboración propia según la guía GEAR

Tabla 19. (Continuación) Prescripciones del árido reciclado para las recomendaciones técnicas de la guía GEAR

PRESCRIPCIÓN	GEAR RT-01	GEAR RT-02	GEAR RT-03	GEAR RT-04	GEAR RT-05	GEAR RT-06
Tipo de árido	Todo uno	Todo uno	Todo uno	Todo uno	Grueso	Grueso
Categoría de árido	ARH, ARMh, ARMc, ARMa	ARH, ARMh, ARMc	ARH, ARMh, ARMc			
Contenido en sulfatos solubles en ácido máximo (%)			0.8	0.8	0.8	0.8
Contenido en sulfatos solubles en agua máximo (%)	0.5					
Contenido en compuestos totales de azufre máximo (%)	1		1	1	1	1
Contenido en yeso máximo (%)		0.2-5		1		1
Materia orgánica máximo (%)	0.2	0.2-5	1	Exento		1
Límite líquido máximo	25-35	30-65	25-30			
Índice de plasticidad máximo	6-9	58.4	6-15			
Coeficiente de limpieza máximo	2					2
Densidad de compactación Próctor Modificado mínima (%)	98-100	80-100				
CBR mínimo (%)	20-70	3-20				
Resistencia a compresión a 7 días mínima (MPa)			2.5-7			
Hinchamiento libre máximo (%)	0.5	3-5				
Asiento en ensayo de colapso máximo (%)		1				
Reactividad potencial			No reactivo			

Fuente: Elaboración propia según la guía GEAR

Tabla 20. Prescripciones del árido grueso reciclado según la Instrucción EHE-08

PRESCRIPCIÓN	Art. 28	Anejo 15	Anejo 18
Contenido en árido grueso reciclado máximo (%)		20	100
Contenido en arena reciclada máximo (< 4mm) (%)		5	
Contenido en desclasificados inferiores máximo (%)		10	
Tamaño máximo D (mm)			30-40 (1)
Contenido en terrones de arcilla máximo (%)		0.6 (2)	0.25
Contenido en finos (<0.063mm) máximo (%)	1.5%		
Equivalente de arena mínimo (3)	70-75		
Índice de lajas máximo (%)	35		
Absorción de agua máximo (%)	5	7 (4)	5(4)
Absorción a los 10 minutos máxima (%)		5.5 (5)	
Resistencia a la fragmentación máximo (%)	40 (6)	40 (6)	
Pérdida de peso con 5 ciclos de sulfato magnésico máximo (%)	18	18	
Contenido en cloruros totales máximo (%)		0.05 (7)	
Contenido en cloruros solubles en agua máximo (%)	0.03 (8) 0.05 (7)	0.05 (7)	
Contenido en compuestos totales de azufre máximo (%)	1	1	
Contenido en sulfatos solubles en ácido máximo (%)	0.8	0.8	
Material retenido por el tamiz 0.063mm que flota en un líquido de peso específico 2 máximo (%)	1		
Contenido en material cerámico máximo (%)		5	
Contenido en partículas ligeras máximo (%)		1	
Contenido en asfalto máximo (%)		1	
Contenido en otros materiales (vidrio, plásticos, metales, etc) máximo (%)		1	
(1) 30mm máximo en hormigón de limpieza y 40mm en hormigones no estructurales (2) Siempre que el resto de árido natural (>80%) presente un contenido en terrones de arcilla inferior al 0.15% (3) Las arenas procedentes de machaqueo calizas o dolomíticas que no cumplan el ensayo de equivalente de arena se aceptarán si cumplen el ensayo de azul de metileno (4) El árido grueso natural debe tener una absorción inferior al 4.5% (5) Para la combinación de árido grueso natural y reciclado (6) Si el hormigón tiene una resistencia característica inferior a 30MPa y existe experiencia previa de empleo del árido, puede alcanzar una resistencia a la fragmentación de 50 (7) En hormigón en masa (HM) y hormigón armado (HA) (8) En hormigón pretensado (HP)			

Fuente: Elaboración propia según la Instrucción EHE-08

Por lo que, al efecto de identificar el tipo de árido reciclado que permite la Instrucción para la elaboración de hormigón, se puede deducir que sólo el árido grueso procedente de machaqueo de residuos de hormigón podría ser utilizado, no siendo posible en ningún caso el empleo de áridos reciclados cerámicos o mixtos,

como se contempla en muchas de las normativas y guías de recomendaciones consultadas, ni siquiera en aplicaciones no estructurales.

Por tanto, el árido reciclado contemplado en la EHE-08 se permite en la elaboración de hormigón, tanto en masa como armado, de resistencia no superior a 40MPa, quedando excluido de empleo, en cualquier caso, el árido fino reciclado, el árido reciclado cuya naturaleza sea distinta del hormigón, el que provenga de estructuras de hormigón con algún tipo de patología que afecte a su calidad o el obtenido de hormigones especiales (aluminosos, con fibras, con polímeros, etc).

4.5.8. Europa

4.5.8.1. Proyecto de Norma Europea prEN 12620

El comité técnico europeo AEN/CTN 146 de áridos se encuentra en la actualidad en un proceso de revisión de las normas europeas al objeto de poder introducir los materiales reciclados en el ámbito de estudio de las normas que contemplan los áridos en general. Se tiene previsto que en la primavera de 2013 se publiquen todas las normas revisadas.

En este sentido, en el proyecto de norma EN 12620 (prEN 12620 2013) ya se ha contemplado el uso de áridos reciclados en la fabricación de hormigón. Hasta la fecha, se ha revisado la norma EN 1744-6 (UNE-EN 1744-6 2007), sobre las propiedades químicas de los áridos, para adaptarla a las particularidades de los áridos reciclados y determinar la influencia de éstos en el tiempo de principio de fraguado del cemento. Así mismo, se ha publicado la EN 933-11 (UNE EN 933-11 2009), que contempla la clasificación de los áridos reciclados según su composición.

El proyecto de norma EN 12620 establece las prescripciones que deben cumplir los áridos para la fabricación de hormigón. En su ámbito de aplicación se incluyen todos los áridos para la elaboración de hormigón estructural de procedencia natural, reciclados o mezcla de ellos, de densidad superior a 2000 kg/m³, contemplándose también sus aplicaciones en carreteras, pavimentos y productos prefabricados. Permite el empleo de áridos reciclados con densidades entre 1500 y 2000 kg/m³ así como la posibilidad de utilizar arenas recicladas, con algunas salvedades.

La norma no establece limitación alguna a los áridos, aunque si establece la necesidad de determinar las propiedades geométricas, físicas, químicas y de durabilidad de los áridos, así como la obligación del fabricante de declarar, cuando sea requerido, la conformidad del árido, mediante el valor obtenido en cada uno de los ensayos, según el uso final y el origen del árido. De esta manera, cuando el valor de una propiedad es requerido pero no está definido por un límite específico, dicho valor debe ser declarado mediante su categoría siguiendo el siguiente esquema:

XX_{declarada}

Donde: XX, son las iniciales de la propiedad requerida, declarada, es el valor numérico obtenido de la realización del correspondiente ensayo.

4.5.8.2. Norma Europea EN 933-11

En el proceso de normalización del árido reciclado para su uso en la elaboración de hormigón, el comité técnico europeo AEN/CTN 146 de áridos promulgó en 2009 la primera norma específica para áridos reciclados, la EN 933-11 (UNE EN 933-11 2009), mediante la cual se establece el método para determinar la clasificación de los áridos reciclados según su composición.

La norma especifica que el procedimiento de ensayo se le practicará a los áridos gruesos reciclados de cara a la obtención de los porcentajes en masa de los diferentes componentes no flotantes, según lo indicado en la Tabla 21. No obstante, este procedimiento viene a armonizar lo que la normativa de diferentes países está haciendo al respecto de clasificar los áridos reciclados, como se puede constatar en este capítulo.

Tabla 21. Clasificación de los áridos reciclados según la norma EN 933-11

COMPONENTE	DESCRIPCIÓN
Rc	Hormigón, productos de hormigón, mortero Unidades de albañilería
Ru	Áridos no tratados, piedra natural Áridos tratados con conglomerantes hidráulicos
Rb	Unidades de albañilería de arcilla (ladrillos, tejas) Unidades de albañilería de silicato de calcio Hormigón aireado no flotante
Ra	Materiales bituminosos
Rg	Vidrio
Xs	Otros: Cohesivos (arcilla y arena) Varios: metales (ferrosos y no ferrosos), madera no flotante, plástico y caucho Yeso

Fuente: Elaboración propia según la norma EN 933-11

4.5.9. Holanda

4.5.9.1. Recomendación CUR

El Commissie voor Uitvoering van Research (CUR) es un centro de investigación holandés que ha venido desarrollando las especificaciones para la utilización de áridos reciclados antes de la entrada en vigor de la norma NEN 5905 (NEN 5905 2010). En 1984 publicó la recomendación para la utilización de áridos reciclados

provenientes de hormigón triturado (CUR 1984), en 1986 hizo lo propio con la correspondiente a los áridos reciclados de albañilería (CUR 1986) y posteriormente, en 1994 (CUR 1994), la de residuos de mortero triturado. Estas recomendaciones han servido de base para el posterior desarrollo normativo de la norma holandesa NEN 5905.

Estas recomendaciones clasifican a los áridos reciclados en dos tipos según sean residuos de hormigón o de albañilería. Los áridos reciclados de hormigón estarán compuestos en su mayoría por residuos de hormigón con una densidad mínima de 2100 kg/m³, de manera que sean considerados conforme a otras normas y recomendaciones como áridos reciclados de calidad. En la recomendación de 1994 se permite que la densidad de los áridos reciclados para hormigón sea de al menos 2000 kg/m³.

En la Tabla 22 se recoge cual ha de ser la composición que estos áridos presenten en función del análisis visual y el posterior pesado de las partículas retenidas en el tamiz de 8mm.

Tabla 22. Clasificación de los áridos reciclados según las recomendaciones CUR

COMPOSICIÓN	ÁRIDO RECICLADO DE HORMIGÓN	ÁRIDO RECICLADO DE ALBAÑILERÍA	
Hormigón (%)	> 95	-	
Residuos de albañilería (%)	< 5	> 65	
Hormigón ligero (%)		< 20	
Productos cerámicos (%)			
Piedra natural (%)			
Hormigón celular (%)			< 10
Morteros (%)			< 25

Fuente: Elaboración propia según las recomendaciones CUR

La Tabla 23, por su parte, recoge los requisitos que han de cumplir los áridos reciclados según estas recomendaciones.

Las recomendaciones CUR prevén el uso de los áridos reciclados, de granulometría fina y gruesa, en la elaboración de hormigones en masa, armados, e incluso, pretensados, indicando, a diferencia del resto de normas y recomendaciones, que el uso de áridos finos no perjudica al hormigón. Así mismo, argumentan que las características de los hormigones elaborados con hasta el 20% de sustitución de árido fino y grueso natural por las correspondientes fracciones recicladas, deben ser las mismas que en los hormigones convencionales. No obstante, al exigirle el cumplimiento de unos altos parámetros de calidad al árido reciclado, posibilitan la sustitución de hasta el 100%, resultando compatible con las resistencias demandadas al hormigón reciclado. En este sentido, y para contrarrestar la disminución del módulo de elasticidad y la fluencia en el hormigón reciclado, proponen las recomendaciones un aumento del 10% en el espesor y la altura de los elementos dimensionados.

Tabla 23. Prescripciones del árido reciclado según las recomendaciones CUR

PRESCRIPCIÓN		ÁRIDO RECICLADO DE HORMIGÓN		ÁRIDO RECICLADO DE ALBAÑILERÍA	
		Fino	Grueso	Fino	Grueso
Contenido en finos dispersables máximo (%)		-		4	2
Carbonato de calcio mínimo (%)		25	10	-	
Componentes no minerales máximo (%) (*)		0.5	0.1	1	
Materiales no pétreos máximo (%) (**)		1		1	
Partículas blandas máximo (%)		0.1		-	
Contenido en sulfatos máximo (%)		1		1	
Contenido en cloruros máximo (%)	Hormigón en masa	-		1	1
	Hormigón armado	0.1	0.05	0.1	0.05
	Hormigón pretensado	0.015	0.007	0.015	0.007
Resistencia hielo-deshielo. Pérdida de masa (%)		-		3	
(*) Madera, vegetales, papel, entre otros.					
(**) Asfalto, metal, vidrio.					

Fuente: Elaboración propia según las recomendaciones CUR

Para controlar su calidad, las recomendaciones CUR indican la necesidad de identificar, entre otras cosas, el origen de los áridos reciclados, sus características, tipología, etc.

Finalmente, y en relación al comportamiento físico de los áridos reciclados, destaca que para compensar las diferencias de absorción de agua existente entre áridos naturales y reciclados, éstos deben ser sometidos a un tratamiento de pre-saturación antes de agregarlos a la mezcla de hormigón, así no absorben agua del amasado. En caso contrario debe compensarse la cantidad de agua absorbida por los áridos reciclados, añadiendo una mayor cantidad de agua de amasado directamente a la mezcla.

4.5.9.2. Norma holandesa NEN 5905

La norma NEN 5905 (NEN 5905 2010), publicada en 2010 como suplemento a la norma armonizada europea EN 12620 “Áridos para hormigón” (UNE-EN 12620:2003+A1 2009), recoge los criterios que han de cumplir los áridos para hormigón, contemplando la utilización de árido grueso reciclado a tal efecto.

La norma permite la utilización de áridos gruesos reciclados procedentes de hormigón o mixtos en la elaboración de hormigón estructural en masa o armado, excluyéndose por tanto el hormigón pretensado, que cumplan los requisitos de la Tabla 24.

En cuanto a los porcentajes de sustitución de árido grueso natural por la correspondiente fracción reciclada, se contempla hasta el 100% en el caso del

árido reciclado de hormigón en hormigones de hasta 45MPa de resistencia, y de un máximo del 20% en el mixto para hormigones de resistencia máxima 25MPa.

Tabla 24. Prescripciones del árido grueso reciclado según la norma NEN 5905

PRESCRIPCIÓN	ÁRIDO RECICLADO DE HORMIGÓN	
Contenido en finos (< 0.063mm) máximo (%)	5	
Coefficiente de forma máximo (%)	35	
Contenido en conchas máximo (%)	10	
Índice de lajas máximo (%)	40	
Absorción de agua máximo (%)	6	
Resistencia a la fragmentación de Los Ángeles máximo (%)	40	
Contenido en materiales ligeros máximo (%)	0.1	
Contenido en terrones de arcilla máximo (%)	0.5	
Contenido en sulfatos máximo (%)	1	
Contenido en sulfatos solubles en ácido (%)	1	
Contenido en cloruros máximo (%)	Hormigón en masa	1
	Hormigón armado	0.05

Fuente: Elaboración propia según la norma NEN 5905

4.5.10. Hong Kong

En Hong Kong, las Works Bureau Technical Circular WBTC 12 de 2002 (WBTC 12/2002 2002) contienen las especificaciones para facilitar el uso de áridos reciclados en la fabricación de hormigón y en la ejecución de subbases de carreteras.

En la fabricación de hormigón, estas recomendaciones sólo permiten la utilización de árido reciclado procedente de hormigón para dos aplicaciones diferentes. Se contempla la sustitución de hasta el 100% de áridos naturales en la elaboración de hormigones de poca exigencia con un valor de resistencia máxima de 20MPa, o bien de hasta el 20% en hormigones estructurales de resistencias entre 25 y 35MPa, que no vayan a estar en contacto con agua. En ambos casos el hormigón en estado fresco debe presentar una consistencia mínima de 75mm, para conseguir la adecuada compactación final. Además, no se puede emplear arena reciclada, debiendo cumplir los áridos gruesos reciclados las especificaciones de la Tabla 25.

Como medida previa a la utilización del árido reciclado, al igual que otras normas consultadas, propone el premojado antes de ser usado, de cara a evitar que las diferencias de absorción de agua alteren la relación agua/cemento efectiva, necesaria para la correcta hidratación del cemento y para conferirle al hormigón la trabajabilidad necesaria.

Tabla 25. Prescripciones del árido grueso reciclado según las recomendaciones WBTC 12/2000

PRESCRIPCIÓN	ÁRIDO RECICLADO DE HORMIGÓN
Densidad seca mínima de las partículas (kg/m ³)	2000
Contenido en finos (< 0.075mm) máximo (%)	4
Contenido en arena máximo (%)	5
Índice de lajas máximo (%)	40
Absorción de agua máximo (%)	10
Contenido en material de densidad < 1000 kg/m ³ máximo (%)	0.5
Contenido en materiales extraños (metales, vidrio, materiales blandos, betún) (%)	1
Índice del 10% de finos mínimo (kN) (*)	100
Contenido en sulfatos máximo (%)	1
Contenido en cloruros solubles en ácido máximo (%) (**)	0.05 (***)
(*) Mide la resistencia mecánica de los áridos a través de la oposición que presentan a ser triturados	
(**) Es más exigente que los determinados mediante solubilidad al agua	
(***) En el árido combinado	

Fuente: Elaboración propia según las recomendaciones WBTC 12/2000

Esta recomendación introduce una novedad en la regulación técnica de los áridos y hormigones reciclados. Durante el hormigonado del hormigón reciclado la recomendación propone el llenado de 4 probetas diarias para evaluar su capacidad resistente a compresión a 7 y 28 días, obteniéndose como mínimo unas resistencias de 7 y 20MPa, respectivamente, de manera que se evalúe la repercusión sobre la resistencia debido a la variabilidad que pueda existir en la composición de los áridos reciclados.

4.5.11. Italia

La Norma Tecnica per le Costruzioni NTC 2008 (Ministero delle Infrastrutture 2008) en su capítulo sobre el hormigón hace una pequeña referencia a los áridos reciclados que se pueden utilizar al efecto.

Para la producción de hormigón resultan adecuados los áridos reciclados que se ajusten a la correspondiente norma europea armonizada EN 12620 (prEN 12620 2013). En cuanto a los requisitos físicos y químicos del árido reciclado, remite a las correspondientes normas UNI 8520-1 y UNI 8520-2, a las que deben ajustarse los correspondientes áridos naturales, en función del uso final y el ambiente de exposición al que va a verse sometido el hormigón elaborado con ellos.

Se permite el uso de árido grueso reciclado, de acuerdo con las limitaciones establecidas en la Tabla 26, a condición de que la mezcla de hormigón fabricado sea previamente ensayada y documentada su viabilidad a través de las adecuadas pruebas de laboratorio.

Tabla 26. Prescripciones del árido grueso reciclado para hormigón según la norma NTC

ORIGEN DEL ÁRIDO RECICLADO	CLASE DEL HORMIGÓN	PORCENTAJE DE SUSTITUCIÓN
Demolición de edificios (escombros)	= C8/10	Fino al 100%
Demolición sólo de hormigón	≤ C30/37	≤ 30%
	≤ C20/25	Fino al 60%
Reutilización del hormigón producido en las plantas de prefabricados sujeto a la clase >C45/55	≤ C45/55	Fino al 15%
	Misma clase que el hormigón de origen	Fino al 5%

Fuente: Elaboración propia según la norma NTC

4.5.12. Japón

4.5.12.1. Recomendaciones BCSJ

La Building Constructors Society de Japón creó un comité encargado de la reutilización de los residuos de construcción, presidido por Kasai, que en 1973 inicia su trayectoria en este campo, con el objetivo de impulsar la utilización de los residuos de construcción y demolición en Japón. A resultados del trabajo de investigación que se llevó a cabo, se desarrolló el proyecto de norma para el uso del árido reciclado de hormigón y sus comentarios, que se emitió en mayo de 1977 (Hansen 1992).

Así mismo, en noviembre de 1986 se publican una serie de guías de recomendaciones elaboradas por el Ministerio de Construcción, partiendo de un proyecto de investigación llevado a cabo durante 5 años sobre el Desarrollo de la Tecnología Aplicada a los Materiales de Desecho para la Industria de la Construcción. Dichas guías fueron publicadas con el nombre de:

- Proyecto de norma sobre la calidad del árido grueso reciclado para edificios y comentarios.
- Proyecto de norma sobre la utilización del árido grueso reciclado de hormigón para edificios y comentarios.
- Proyecto de norma sobre el diseño y la aplicación del árido reciclado de hormigón para obra pública y comentarios.
- Proyecto de norma sobre la calidad del árido reciclado para bloques huecos y comentarios.

La BCSJ no pide ningún tipo de exigencia a la composición de los áridos reciclados, pudiéndose utilizar tanto residuos procedentes de hormigón como cerámicos, de la misma manera que no impide la utilización de la fracción fina reciclada. No obstante, debido al nivel de exigencia en cuanto a la densidad que deben presentar, indicada en la Tabla 27 donde se consideran el resto de requisitos, no se posibilita una elevada utilización de este tipo de áridos.

Tabla 27. Prescripciones del árido reciclado según las recomendaciones BCSJ

PRESCRIPCIÓN		ÁRIDO GRUESO	ÁRIDO FINO
Densidad mínima de las partículas (kg/m ³)		2200	2000
Absorción de agua máximo (%)		7	13
Pérdida de sustancias por lavado máximo (%)		1	8
Contenido de sólidos en volumen mínimo (%)		53	1
Contenido en impurezas máximo (kg/m ³)	Densidad < 1200 kg/m ³	2	2
	Densidad < 1950 kg/m ³	10	10

Fuente: Elaboración propia según las recomendaciones BCSJ

La recomendación contempla, así mismo, tres tipos distintos de hormigón posible a fabricar según el árido utilizado y la resistencia máxima a compresión conseguida (ver Tabla 28).

Tabla 28. Tipos de hormigón con árido reciclado según las recomendaciones BCSJ

HORMIGÓN	TIPO DE ÁRIDO		VALOR MÁXIMO RESISTENCIA A COMPRESIÓN (MPa)	
	GRUESO	FINO	DE PROYECTO	REAL DE OBRA
TIPO I	Reciclado	Natural	18	30
TIPO II	Reciclado	Mezcla	15	27
TIPO III	Reciclado	Reciclado	12	24

Fuente: Elaboración propia según las recomendaciones BCSJ

Finalmente, en la elaboración de hormigón reciclado debe emplearse aditivos introductores de aire o reductores de agua, de modo que el contenido en aire ocluido se sitúe entre el 3 y el 6%. Esta medida, única en la normativa consultada, conducirá, por una parte, a aumentar la protección del hormigón reciclado frente a los efectos de hielo-deshielo y, por otra, a conseguir un asentamiento que permita su adecuada puesta en obra, debido a la elevada cuantía de armadura que se emplea para la resistencia de la estructura frente al sismo. En este sentido, se recomiendan asientos del hormigón fresco no superiores a 21cm, conseguidos con relaciones agua/cemento inferiores a 0.7 y contenidos en cemento de al menos 250 kg/m³.

4.5.12.2. Normas de la Japanese Industrial Standard JIS

Las normas japonesas JIS surgen por la larga tradición que en este país se tiene en materia de residuos procedentes de la construcción y demolición de obras, fomentada por la Building Constructors Society of Japan.

Concretamente se han desarrollado y promulgado tres normas diferentes según el nivel de calidad del hormigón reciclado que se pretenda conseguir:

- JIS A 5021 (JIS A 5021 2005), sobre áridos reciclados para hormigón de clase H, específica para los áridos reciclados de calidad alta que se pueden emplear en la elaboración de hormigón estructural, de hasta 45MPa de resistencia a compresión, combinados con áridos convencionales.

- JIS A 5022 (JIS A 5022 2006), sobre áridos reciclados para hormigón de clase M, se aplica a los áridos reciclados de calidad media que, aun empleándose en la elaboración de hormigón estructural, no se puedan ver sometidos a ciclos hielo-deshielo.
- JIS A 5023 (JIS A 5023 2007), sobre áridos reciclados para hormigón de clase L, preceptiva para los áridos reciclados de calidad baja que no se empleen estructuralmente, como hormigones de limpieza, de relleno o nivelación.

La Tabla 29 recoge los niveles de exigencia respecto de las características físicas, mecánicas y químicas que deben de cumplir los áridos reciclados según la clase, observándose como a medida que la calidad del árido reciclado es más baja, también es menor el nivel de exigencia.

Tabla 29. Prescripciones del árido reciclado según las normas JIS

PRESCRIPCIÓN	CLASE H		CLASE M		CLASE L	
	AG	AF	AG	AF	AG	AF
Densidad mínima de las partículas(kg/m ³)	2500	2500	2300	2200		
Absorción de agua máximo (%)	3	3.5	5	7	7	13
Contenido en finos (< 0.075mm) máximo(%)	1	7				
Contenido de sólidos en volumen mínimo(%)	55	53				
Coefficiente de Los Ángeles máximo	35	-				
Contenido en cloruros (%)	0.04	0.04				

Fuente: Elaboración propia según las normas JIS

El contenido en contaminantes está limitado para el árido reciclado clase H, según se recoge en la Tabla 30 a una cantidad máxima del 3% del peso total del árido.

Tabla 30. Cantidad de contaminantes permitidos al árido reciclado de clase H según la norma JIS A 5021

CONTAMINANTE	LÍMITE MÁXIMO (%)
Tejas, ladrillos, cerámicas, hormigón asfáltico (%)	2
Vidrio (%)	0.5
Yeso (%)	0.1
Otros materiales inorgánicos (%)	0.5
Plástico (%)	0.5
Madera, papel, material bituminoso (%)	0.1
TOTAL (%)	3

Fuente: Elaboración propia según las normas JIS

4.5.13. Noruega

La asociación noruega del hormigón publicó en 2003 la guía de recomendaciones nº 26, NB 26 (NB 26 2003), teniendo como normas de referencia a la norma

noruega armonizada NS EN 206-1 de hormigón y a las normas noruegas NS 3420 sobre estructuras de hormigón y NS 3473 sobre normas de diseño, que permiten el uso de áridos reciclados procedentes de hormigón.

En la elaboración de hormigón estructural, la guía NB 26 contempla la utilización de dos tipos de árido reciclado de tamaño máximo 32mm proveniente de hormigón, cuyos requisitos se presentan en la Tabla 31. Inicialmente se considera al árido reciclado como reactivo, a menos que se pruebe lo contrario.

Como recomendaciones generales, la guía indica que han de seguirse las recomendaciones habituales en la elaboración de hormigón estructural. En caso de la elaboración de hormigones que han de estar sometidos a las clases de exposición XF y XD (humedad y hielo-deshielo, respectivamente), ha de estudiarse concretamente la aptitud del árido reciclado, no debiéndose utilizar en estructuras de edificios sometidos a fatiga.

Tabla 31. Requisitos del árido reciclado de la guía NB 26

PRESCRIPCIÓN	TIPO 1	TIPO 2
Hormigón y material pétreo (%)	-	> 99
Hormigón, piedra, mampostería, ladrillo (%)	> 95	-
Componentes no minerales: madera, papel, metal, plástico, vidrio, materiales de aislamiento, restos de plantas (%)	< 5 Aislantes < 0.5 (*) Plantas < 0.5 (*)	< 1 Aislantes < 0.1 (*) Plantas < 0.1 (*)
Densidad seca de las partículas mínima (kg/m ³)	1500	2000
Densidad seca con superficie saturada mínima(kg/m ³)	1800	2100
Absorción de agua máxima (%)	20	10
(*) En volumen		

Fuente: Elaboración propia según la guía NB 26

Los niveles de sustitución previsible se especifican en la Tabla 32 en función del tipo de hormigón y el ambiente de exposición.

Tabla 32. Porcentajes máximos de sustitución según la guía NB 26

TIPO DE HORMIGÓN Y CLASE DE EXPOSICIÓN	PORCENTAJES DE SUSTITUCIÓN MÁXIMOS (%)					
	TIPO 1		TIPO 2		TIPO 1 + 2	
	0/4	4/32	0/4	4/32	0/4	4/32
B20(*) y XC1 (seco)	5	10	10	30	10	30
B45 (**) y XC1-4	0	0	0	20	0	20
(*) corresponde al hormigón C20/25						
(**) Corresponde al hormigón C45/55						

Fuente: Elaboración propia según la guía NB 26

4.5.14. Portugal

La norma LNEC E 471 “*Guia para a utilização de agregados reciclados grossos em betões de ligantes hidráulicos*” (Guía para la utilización de áridos gruesos reciclados en hormigones con ligantes hidráulicos) (LNEC E 471 2009), elaborada por el Laboratorio Nacional de Ingeniería Civil de Portugal y editada en 2009, establece los requisitos mínimos de los áridos reciclados para la fabricación de hormigón conforme a la norma europea armonizada EN 12620 (prEN 12620 2013) de áridos para hormigones.

Esta norma agrupa los áridos reciclados procedentes de RCD en tres clases diferenciadas por las siglas ARB1, ARB2, constituidas fundamentalmente por hormigón mezclado o no, con otros áridos no procedentes de hormigón, y ARC, compuesto por una mezcla indistintamente de hormigón y material cerámico. De acuerdo con esta regulación, dichos áridos reciclados deben de cumplir las especificaciones de la Tabla 34.

Para su uso en la confección de hormigón, los áridos reciclados deben de cumplir los requisitos de composición indicados en la Tabla 33, conforme a la EN 933-11 (UNE EN 933-11 2009).

Tabla 33. Composición de los áridos reciclados según la norma LNEC E 471

CLASE	Rc (%)	Rc+Ru (%)	Rb (%)	Ra (%)	FL (%)	X+Rg (%)
ARB1	≥ 90		≤ 10	≤ 5	≤ 2	≤ 0.5
ARB2	≥ 70		≤ 30	≤ 5	≤ 2	≤ 1
ARC	≥ 90			≤ 10	≤ 2	≤ 2

Rc, hormigón y mortero
 Ru, productos pétreos no ligados, piedra natural y árido tratado con ligantes hidráulicos
 Rb, material cerámico
 Ra, material bituminoso
 FL, material flotante
 X, otros materiales cohesivos (suelos arcillosos), metales (férricos y no férricos), plástico, yeso y madera no flotante
 Rg, vidrio

Fuente: Elaboración propia según la norma LNEC E 471

Finalmente la norma establece las aplicaciones permitidas para el uso de áridos reciclados en la fabricación de hormigón (ver Tabla 35), prohibiendo expresamente el uso de estos áridos en la fabricación de hormigón que se prevea vaya a estar en contacto con agua para el consumo humano. Como se puede observar, el empleo de árido reciclado de la clase ARC queda prohibido en la elaboración de hormigones de tipo estructural, permitiéndose en aplicaciones de hormigón en masa, de relleno o de limpieza, en ambientes no agresivos, en cuyo caso el porcentaje de sustitución no estaría tampoco sujeto a limitación alguna. En otras circunstancias, donde se pretenda otra aplicación u otro porcentaje de sustitución, se debe justificar previo estudio específico.

Tabla 34. Prescripciones del árido reciclado de la norma LNEC E 471

PRESCRIPCIÓN	NORMA DE ENSAYO	REQUISITO DE CONFORMIDAD (SEGÚN EN 12620)	ÁMBITO
Dimensión	EN 933-1	Satisfacer 4.2	Todos
Granulometría	EN 933-1	Satisfacer 4.3.2	Todos
Componentes	EN 933-11	Satisfacer una clase del Cuadro 1	Todos
Forma	EN 933-3	FI ₃₅ (4.4)	ARB1
		FI ₅₀ (4.4)	ARB2
		Categoría a declarar	ARC
Contenido en finos	EN 933-1	f ₃ (4.6)	ARC
		f ₄ (4.6)	ARB1 y ARB2
Densidad mínima (kg/m ³)	EN 1097-6	2000 (5.5)	clase ARC
		2200 (5.5)	ARB1 y ARB2
Absorción de agua máxima (%)	EN 1097-6	7 (5.5)	ARB1 y ARB2
		Categoría a declarar	ARC
Resistencia a la fragmentación	EN 1097-2	LA ₅₀ (5.2)	ARB1
		Categoría a declarar	ARB2
Contenido de cloruros solubles en ácido	EN 1744-5	Valor a declarar (6.2)	Todos
Contenido de sulfatos solubles en ácido	EN 1744-1	AS _{0.8} (6.3.1)	Todos
Contenido en sulfatos solubles en agua	EN 1744-1	SS _{0.2} (6.3.3)	Todos
Contenido total de azufre	EN 1744-1	S ≤ 1.0% (6.3.2)	Todos
Contenido de materia orgánica que afecta la resistencia hormigón	EN 1744-1	Satisfacer a) y b) de 6.4.1	Todos
Reacciones álcali-sílice	LNEC E461	Categoría a declarar	Todos
Estabilidad de volumen	EN 1367-4 (Anexo A)	Retracción ≤ 0.075% (5.7.2)	Todos
Otros componentes que afectan a la resistencia del hormigón	EN 1744-6	Valor a declarar (6.4.1)	Todos
Liberación de sustancias peligrosas (lixiviación)	EN 12457-4	Inertes	Todos

Fuente: Elaboración propia según la norma LNEC E 471

Tabla 35. Aplicaciones permitidas para los áridos reciclados según la norma LNEC E 471

CLASE	APLICACIONES	RESISTENCIA CARACTERÍSTICA	PORCENTAJE DE SUSTITUCIÓN	CLASE DE EXPOSICIÓN AMBIENTAL(*)
ARB1	Se pueden usar para la fabricación de hormigón en masa y	C 40/50	25% (para hormigón armado)	X0, XC1, XC2, XC3, XC4, XS1, XA1(**)
ARB2	hormigón armado con límites en la sustitución.	C 35/45	20% (para hormigón armado)	
(*) Conforme a los definido en la norma EN 206-1				
(**) En cimentaciones				

Fuente: Elaboración propia según la norma LNEC E 471

4.5.15. Reino Unido

4.5.15.1. RILEM

Las asociación internacional RILEM (Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, systèmes de construction et ouvrages) nace en 1947 con el objetivo de establecer la colaboración científica en el área de materiales de construcción y las estructuras, encaminada a fomentar la relación entre ambas disciplinas, así como la transferencia y aplicación de sus conocimientos. Con el propósito de presentar los desarrollos científicos a nivel mundial en materia de demolición y reciclaje, se celebra el tercer congreso internacional RILEM en 1993 en Odense (Dinamarca), durante el cual se presenta el trabajo desarrollado por el comité científico TC-121-DRG de dicha asociación sobre “Specifications for concrete with recycled aggregates” (RILEM, Technical Committe TC 121 1994).

En este documento se recomienda el uso exclusivamente de árido grueso reciclado en la elaboración de hormigón, clasificándolo en tres tipos diferentes:

- Tipo I: árido reciclado procedente de fábrica de ladrillo.
- Tipo II: árido reciclado procedente de hormigón.
- Tipo III: árido compuesto por una mezcla de al menos el 80% de árido natural y menos del 10% de árido reciclado Tipo I (o hasta 20% de árido Tipo II).

Los requisitos que las recomendaciones RILEM le solicitan al árido grueso reciclado se presentan en la Tabla 36, así como la composición del árido grueso reciclado, que se debe ajustar a lo indicado en la Tabla 37.

En este documento se recomienda que, en el hormigón armado elaborado con áridos reciclados utilizado en ambientes con clases de exposición II, III y IV, debido a la presencia de humedad, se debe prestar especial atención a aspectos como la durabilidad, ya que la velocidad de carbonatación y la penetración de cloruros pueden ser mayores que en el hormigón convencional, recomendando los

ensayos adicionales de expansión, para evaluar la reactividad álcalis-sílice del árido reciclado, de resistencia al hielo-deshielo y la pérdida de peso del árido reciclado sometido al ensayo con sales fundentes. Además, se indica que en el diseño del hormigón con árido reciclado se sigan las mismas normas que para el convencional, aplicándole una serie de factores de corrección a los resultados que arrojen los ensayos mecánicos, por la disminución previsible de su calidad.

Tabla 36. Prescripciones del árido grueso reciclado según recomendaciones RILEM

PRESCRIPCIÓN	TIPO I	TIPO II	TIPO III
Densidad seca mínima de las partículas (kg/m ³)	1500	2000	2400
Absorción de agua máxima (%)	20	10	3
Contenido de material de densidad máx. < 2100 kg/m ³ (%) ^(*)	-	10	10
Contenido de material de densidad máx. < 1600 kg/m ³ (%) ^(*)	10	1	1
Contenido de material de densidad máx. < 1000 kg/m ³ (%) ^(*)	1	0.5	0.5
Contenido de materiales extraños máximo ^(**) (%)	5	1	1
Contenido de metales máximo (%)	1	1	1
Contenido Materia orgánica máximo (%)	1	0.5	0.5
Contenido finos (<0,063mm) máximo (%)	3	2	2
Contenido arena (<4mm) máximo (%) ^(***)	5	5	5
Contenido sulfatos máximo (%) ^(****)	1	1	1
Clase resistente máxima permitida	C16/20(a)	C50/60	-
<p>^(*) Determinada en condiciones de árido saturado con la superficie seca ^(**) Metales, vidrios, materiales blandos, betún ^(***) Si el contenido de arena es superior al límite, la arena que incorpora el árido reciclado se considerará conjuntamente con la fracción total de la arena ^(****) Contenido de Sulfatos solubles en agua calculados como SO₃ (a) La categoría resistente puede aumentar hasta C30/37 si la densidad saturada con superficie seca es superior a 2.000 kg/m³.</p>			

Fuente: Elaboración propia según recomendaciones RILEM

Tabla 37. Composición del árido grueso reciclado según recomendaciones RILEM

COMPOSICIÓN	TIPO I	TIPO II
Contenido en hormigón y mortero (Rc) (%)	0	≤ 100
Contenido en material cerámico (Rb) (%)	≤ 100	0
Contenido en Asfalto (Ra) + otros (cohesivos, metales, madera, plástico, yeso) (X) + vidrio (Rg) (%)	< 5	< 1

Fuente: Elaboración propia según recomendaciones RILEM

4.5.15.2. BRE Digest 433

Las recomendaciones BRE Digest 433 (Collins 1998) sobre árido reciclado las elabora el Building Research Establishment, un organismo de investigación y difusión del conocimiento del Reino Unido en 1998, ante el acelerado crecimiento de los residuos de construcción y demolición y su consiguiente utilización como árido reciclado, y para conseguir la integración de esta práctica en el proceso de normalización europeo. Para ello toman como base las especificaciones de la

RILEM (RILEM, Technical Committee TC 121 1994) y el trabajo que hasta la fecha está desarrollando el Comité Técnico Europeo TC-154 de áridos.

Las recomendaciones utilizan, de hecho, la misma clasificación y descripción que la RILEM, tal y como se recoge en la Tabla 38, siendo la correspondencia en cuanto a los diferentes tipos de áridos reciclados la siguiente:

- RCA I (Tipo I RILEM): áridos procedentes en su mayoría de escombros de fábrica de ladrillo.
- RCA II (Tipo II RILEM): áridos procedentes en su mayoría de escombros de hormigón.
- RCA III (Tipo III RILEM): áridos compuestos por una mezcla de áridos naturales superiores al 80% y áridos Tipo I inferior al 10% (o hasta el 20% de árido Tipo II).

Tabla 38. Tipología y composición del árido reciclado según las recomendaciones BRE Digest 433

CLASE	ORIGEN	CONTENIDO EN FÁBRICA DE LADRILLO EN PESO (%)
RCA I	Fábrica de ladrillo	0-100
RCA II	Hormigón	0-10
RCA III	Hormigón + Fábrica de ladrillo	0-50

Fuente: Elaboración propia según recomendaciones BRE Digest 433

Se considera que con un porcentaje de sustitución de hasta el 20% de árido grueso reciclado no se compromete la capacidad estructural del hormigón, por lo que la recomendación BRE Digest 433 limita la utilización de cada tipología a aplicaciones resistentes concretas según se observa en la Tabla 39.

Tabla 39. Categoría resistente máxima del hormigón según las recomendaciones BRE Digest 433

CLASE	CATEGORÍA RESISTENTE	
RCA I	Densidad < 2000 kg/m ³	C20
	Densidad > 2000 kg/m ³	C35
RCA II (*)		C50
RCA III (*)		Sin límite
(*) Con sustitución del 20% de árido grueso reciclado		

Fuente: Elaboración propia según recomendaciones BRE Digest 433

Así mismo, estas recomendaciones contabilizan el contenido en impurezas que puede presentar el árido reciclado, así como el de sulfatos solubles en ácido, según se observa en la Tabla 40 y, aunque no están limitados expresamente, aconseja estudiar el contenido en cloruros solubles en ácido y la reactividad del árido reciclado con los álcalis del cemento.

Tabla 40. Contenido en impurezas del árido reciclado según las recomendaciones BRE Digest

433

IMPUREZAS		APLICACIONES		
		ÁRIDO GRUESO PARA HORMIGÓN	EN CAPAS NO LIGADAS O LIGADAS CON CEMENTO	RELLENOS DRENANTES
Contenido en asfalto y alquitrán máximo (%)	RCA I	Incluido en el límite de otros materiales extraños	10 (*)	10 (*)
	RCA II		5 (*)	
	RCA III		10 (*)	
Contenido en madera (incluidos otros materiales menos densos que el agua) máximo (%)	RCA I	1	1 en subbases	2
	RCA II	0.5	2% en capas de cemento	
	RCA III	2.5 (**)	2% en capas de nivelación	
Contenido en vidrio máximo (%)		Incluido en el límite de otros materiales extraños	Documentar si es > 5	Documentar si es > 5
Contenido en sulfatos solubles en ácido máximo (%)		1		
Contenido en otros materiales extraños máximo (%)	RCA I	5	1	1
	RCA II	1		
	RCA III(**)	5		
(*) No se limita si se satisfacen los ensayos físicos y mecánicos				
(**) No se debe sustituir más del 20% de árido natural. Se asume que el árido natural no aporta madera y otras materias extrañas. Del mismo modo el límite del 1% máximo en sulfatos solubles en ácido se debe aplicar a la combinación del árido				

Fuente: Elaboración propia según recomendaciones BRE Digest 433

Finalmente, esta guía propone la aplicación del árido reciclado en usos no estructurales. Concretamente, en la elaboración de bloques prefabricados de hormigón con árido reciclado de buena calidad indica no utilizar el 100% de árido reciclado, por lo que plantea la eliminación de los finos reciclados, la adición de arena natural y el aumento del tamaño máximo del árido grueso.

4.5.15.3. BS 8500-1

La norma inglesa BS 8500-2 “*Specification for constituent materials and concrete*” (Especificaciones sobre los componentes del hormigón) (BS 8500-2:2006 2006) es publicada en 2006 por la British Standard Institution (BSI) y elaborada por el grupo de trabajo B7517/1/WG20, redacción de especificaciones, dentro del Subcomité B7517/1, producción de hormigón y ensayos, del Comité Técnico B/517, hormigón y sus productos. Su objetivo es establecer las prescripciones que han de cumplir los constituyentes del hormigón, entre los que se encuentran los áridos reciclados.

Esta especificación distingue entre árido reciclado procedente de hormigón (RCA) y el procedente de materiales cerámicos o la mezcla de ambos (RMA), de manera que además de no permitir el uso del árido fino reciclado, no establece un porcentaje de sustitución máximo de árido grueso reciclado, pues será el conjunto del árido el que deba cumplir las prescripciones generales establecidas para el árido natural, además de las recogidas en la Tabla 41.

Tabla 41. Prescripciones del árido grueso reciclado según norma BS 8500-2

PRESCRIPCIÓN	RCA	RMA
Contenido en finos máximo (<0,063mm) (%)	5	3
Tamaño máximo (mm)	20	20
Contenido en contaminantes orgánicos ligeros máximo (%)	0.5	1
Contenido en sulfatos solubles en ácido máximo (%)	1	1
Contenido en arena máximo (<4mm) (%)	0	0
Clase resistente máxima permitida	C40/50	-

Fuente: Elaboración propia según norma BS 8500-2

La Tabla 42 recoge los requisitos de composición que contempla la norma inglesa para el árido grueso reciclado.

Tabla 42. Composición del árido grueso reciclado según norma BS 8500-2

COMPOSICIÓN	RCA	RMA
Contenido en productos pétreos (Ru) + Contenido en hormigón y mortero (Rc) (%)	≤ 95	-
Contenido en material cerámico (Rb) (%)	≤ 5	< 100
Contenido en Asfalto (Ra) (%)	0	≤ 10
Otros (cohesivos, metales, madera, plástico, yeso) (X) + vidrio (Rg) (%)	≤ 0.3	≤ 1

Fuente: Elaboración propia según norma BS 8500-2

La Tabla 43 recoge la utilización de ambos tipos de árido reciclado en función de la resistencia y clase de exposición, destacando que permite sólo la utilización de árido reciclado procedente de hormigón (RCA) en la elaboración de hormigón estructural, en un porcentaje de sustitución del 20% máximo. En este sentido no está contemplada la utilización de ningún tipo de árido grueso reciclado en hormigones expuestos a humedad marina, en ambientes con heladas, así como en suelos agresivos.

Tabla 43. Especificaciones de utilización del árido grueso reciclado según norma BS 8500-2

TIPO DE ÁRIDO GRUESO RECICLADO	HORMIGÓN RECICLADO	
	RESISTENCIA RECOMENDABLE (N/mm ²)	CLASE DE EXPOSICIÓN SEGÚN EN 206-1
RCA (hormigón)	H-40	X0, XC1, XC2, XC3, XC4, XF1
RMA (cerámico o mezcla)	H-16	X0

Fuente: Elaboración propia según norma BS 8500-2

4.5.16. Suiza

El objetivo técnico suizo OT 70085 (OT 70085 2000) “*Instrucción técnica. Utilización de materiales de construcción, minerales secundarios para la construcción de viviendas*” de 2006, promueve la utilización de áridos reciclados en la fabricación de hormigón. Esta norma se aplica conjuntamente con las recomendaciones técnicas SIA 162 (SIA 162 1994) sobre obras de hormigón y SIA 162/4 (SIA 162/4 1994) sobre hormigón reciclado, elaboradas por la Sociedad de Ingenieros y Arquitectos (SIA), con un periodo de validez de tres años. Así mismo, se ha de tener en cuenta lo indicado en el boletín SIA MB 2030 (SIA bulletin MB 2030 2010), que se publica en febrero de 2010 como un suplemento a la recomendación técnica anterior, al objeto de definir las principales propiedades mecánicas del hormigón reciclado y definir sus posibles usos.

La OT 70085 distingue dos tipos de áridos reciclados, procedentes de hormigón o mixtos, según sea el grado de exigencia que se pretenda del hormigón, bien sea hormigón clasificado o no clasificado.

Las exigencias de calidad exigidas a los áridos reciclados deberán de respetar las normas SIA 162 sobre obras de hormigón y SIA 162/4 de hormigón reciclado. Por su parte el boletín SIA MB 2030 reconoce igualmente ambos tipos de áridos reciclados y recomienda que su empleo en la elaboración de hormigón sea conforme a la norma europea EN 206-1 (UNE-EN 206-1 2008), cumpliendo además las especificaciones de la correspondiente EN 12620 (UNE-EN 12620:2003+A1 2009) y, adicionalmente, las definidas en dicho boletín.

A diferencia de la mayoría de la normativa técnica, el boletín SIA 2030 permite que el árido fino reciclado se pueda utilizar en la producción de hormigón estructural, a excepción de cuando se soliciten requerimientos especiales, como serían los relativos a durabilidad, y siempre teniendo en cuenta que se va a producir un menor módulo elástico y una mayor fluencia.

Como suplemento a las normas suizas, el boletín SIA 2030 define los requisitos de composición de los tipos de áridos reciclados permitidos en la elaboración de hormigón, que son los recogidos en la Tabla 44.

Tabla 44. Composición del árido grueso reciclado según boletín SIA 2030

COMPOSICIÓN	ÁRIDO DE HORMIGÓN	ÁRIDO MIXTO
Contenido en productos pétreos (Ru) (%)	< 75	< 95
Contenido en hormigón y mortero (Rc) (%)	≥ 25	
Contenido en material cerámico (Rb) (%)	≤ 5	≥ 5
Contenido en Asfalto (Ra) (%)	≤ 1	≤ 1
Otros (cohesivos, metales, madera, plástico, yeso) (X) + vidrio (Rg) (%)	≤ 0.3	≤ 0.3
Contenido en material flotante (FL) (cm ³ /kg)	≤ 2	≤ 2

Fuente: Elaboración propia según boletín SIA 2030

En cuanto a los requerimientos exigidos al hormigón, la OT 70085 establece que:

- En el caso de hormigón clasificado se utilizarán áridos reciclados de hormigón en un porcentaje de sustitución de hasta el 100%. Se permite su uso en hormigón armado, con una dosificación de cemento superior a 150 kg/m³, siendo las especificaciones del hormigón similares al hormigón fabricado con áridos naturales.
- En la elaboración de hormigón no clasificado se podrán utilizar áridos reciclados de hormigón y mixtos, pudiéndose sustituir el árido natural hasta en un 100% por áridos reciclados. En consecuencia sólo está permitido para su uso como hormigón en masa, concretamente en hormigón de regularización, hormigón de limpieza y hormigón pobre. Se debe aportar la información complementaria acerca de los áridos reciclados y la dosificación de cemento utilizada.

En la Tabla 45 se presentan los requisitos contemplados en la SIA 162/4 que han de cumplir los áridos reciclados para ambas aplicaciones de la norma OT 70085.

Tabla 45. Requisitos del árido reciclado según SIA 162/4

REQUISITOS		HORMIGÓN CLASIFICADO	HORMIGÓN NO CLASIFICADO
Contenido en contaminantes (madera, plástico, yeso) máximo (%)		1% (en volumen) o 0.3% (en masa) sin metales	2% (en volumen) o 0.5% (en masa) sin metales
Contenido en madera máximo (%)		0	Ver anterior
Contenido en material mezclado máximo (%)		3	-
Contenido en material bituminoso máximo (%)		0	7
Contenido en sulfatos máximo (%)		1	1
Contenido en cloruros máximo(%)	Hormigón sin armadura	0.12	0.12
	Hormigón armado	0.03	(**)
(*) Si el hormigón está expuesto a cambios de temperatura y humedad o está al aire libre			
(**) Aplicación no permitida			

Fuente: Elaboración propia según SIA 162/4

La norma fomenta el uso del árido reciclado al indicar que se debe utilizar preferentemente árido reciclado en lugar de árido natural y considera que la rentabilidad económica está asegurada, incluso si el coste aumenta entre el 5 y 10%.

El diseño de los hormigones elaborados con árido reciclado debe igualmente realizarse conforme a las indicaciones de la SIA 162/4, que con carácter general indica que todas las edificaciones pueden ejecutarse con árido reciclado con diferentes niveles de exigencia dentro de la misma obra. En función de dichos

niveles de exigencia, la Tabla 46 recoge las posibles dosificaciones de árido reciclado atendiendo a los 3 casos diferentes indicados en la norma OT 70085:

- Caso A: porcentajes de incorporación de áridos reciclados definidos por el proveedor de modo que respeten las exigencias de resistencia y trabajabilidad del hormigón.
- Caso B: porcentajes de incorporación máximos de áridos reciclados definidos en función de los requisitos de dosificación del hormigón. Dichos porcentajes deben asegurar que, sin que sea necesario realizar modificaciones en el diseño de la estructura, el hormigón fabricado con áridos reciclados presenta unas características similares a un hormigón convencional, tanto en estado fresco como endurecido.
- Caso C: este porcentaje de sustitución implica la indispensable realización de ensayos previos de acuerdo con lo previsto por el conjunto de las normas SIA 162 y 162/4, y puesto que la utilización de este tipo de hormigón, por el momento, se debe limitar a soluciones poco exigentes (no está concebido para ejecución de estructuras), se deben tener en cuenta las diferencias que presentan los hormigones con áridos reciclados y con áridos convencionales, tanto en estado fresco como endurecido.

Tabla 46. Condiciones de utilización del árido reciclado según norma OT 70085

UTILIZACIÓN DEL HORMIGÓN			(%) MÁXIMO DE UTILIZACIÓN DE LOS ÁRIDOS RECICLADOS		
			CASO A	CASO B	CASO C
Hormigón clasificado	Elementos exteriores	≥ C25/30	20% AG 20% AF	20% AG	-
	Elementos interiores	C30/37		25% AG 20% AF	100% AG
		C20/30		35% AG 20% AF	
	Elementos de poca importancia	C15/20		100%	
Hormigón sin clasificar	150-230 kg/m ³ de cemento		100% de árido procedente de hormigón		
	< 150 kg/m ³ de cemento		100% de árido mixto		

Fuente: Elaboración propia según norma OT 70085

Así mismo el boletín SIA MB 2030 propone unas recomendaciones sobre los ambientes de exposición para los hormigones reciclados elaborados con los áridos procedentes de residuos de construcción y demolición en consonancia con la EN 206-1 y que se encuentran recopiladas en la Tabla 47.

En definitiva, la norma suiza resulta, de todas las consultadas, la que mayores soluciones aporta a la utilización de árido reciclados en la elaboración de hormigón, tanto para soluciones constructivas de responsabilidad como para elementos de poca importancia, sin necesidad de comprometer la resistencia mecánica ni llegar al sobredimensionamiento de las piezas.

Tabla 47. Clases de exposición recomendadas para el hormigón reciclado según boletín SIA 2030

TIPO DE ÁRIDO GRUESO REICLADO	CONTENIDO	CLASE DE EXPOSICIÓN SEGÚN EN 206-1				
		X0	XC1(CH) XC1(Seco) XC2 (CH) XC3 (CH)	XC1(CH)	XC4 (CH)	XD (CH) XF(CH) XA
RC-C	Rc \geq 25% Rb < 5%	Permitido				(*)
RC-M	5% \leq Rb \leq 25% Rc + Rb \geq 25%	Permitido		(*)	No permitido	
RC-C, hormigón reciclado con árido de hormigón RC-M, hormigón reciclado con árido de mixto CH, exposición con humedad (*) Permitido según los estudios preliminares apropiados						

Fuente: Elaboración propia según boletín SIA 2030

4.6. Criterios de calidad para el uso del árido reciclado en la elaboración de hormigón

El árido en términos de volumen es el mayor constituyente en la elaboración de hormigón llegando a ocupar entre el 70-80% del mismo, por lo que le proporcionará efectos significativos en cuanto a las propiedades que le confiere, tanto en resistencia como en durabilidad, así como en el abaratamiento del costo (Limbachiya, Meddah et al. 2012).

Los criterios de calidad que ha de cumplir, por tanto, el árido reciclado para la elaboración de hormigón estructural, según ha quedado patente en el estudio de la normativa técnica realizado en el apartado anterior, se entiende que deben ser los mismos que los que se les exige al árido natural para el mismo uso (Tam, Le 2007), por lo que los áridos reciclados han de verificar las tradicionales especificaciones físicas, mecánicas y químicas que se les exigen a los áridos naturales.

En este sentido, la mayoría de las normas, especificaciones y guías de recomendaciones, siguen el esquema tradicional del estudio de las propiedades geométricas, físicas, mecánicas y químicas de los áridos reciclados incluyendo, en casi todos los documentos consultados, una clasificación del árido reciclado como forma de medir la calidad del mismo.

No obstante lo anterior, los criterios de calidad que va a presentar el árido reciclado van a diferir sustancialmente de su homólogo el natural. Son muchos los investigadores que han puesto de manifiesto la no uniformidad en las características de estos materiales granulares debido a: (i) la procedencia del residuo de construcción y demolición (Marinković, Radonjanin et al. 2010), (ii) las características de la planta de reciclado que recoge RCD, especialmente en cuanto

al método de trituración (Katz 2003, Mas, Cladera et al. 2011) y (iii) el desconocimiento de los datos acerca de la calidad del hormigón original (Oikonomou 2005).

A continuación se presenta el estudio de las características que definen a los áridos reciclados, obtenido de la exhaustiva revisión de casi 60 trabajos experimentales publicados.

4.6.1. Clasificación del árido reciclado de acuerdo con su composición

La clasificación de los áridos reciclados en función de la composición que presentan es un parámetro decisivo a la hora de establecer la calidad de los mismos (Angulo, Mueller 2009), influyendo en el comportamiento mecánico del hormigón que con ellos se elabore (Angulo, Carrijo et al. 2010). Los diferentes métodos de clasificación del árido reciclado relativos a su composición se han incorporado recientemente a los estudios experimentales, por lo que se disponen de pocos estudios y resultados. De hecho la mayoría de ellos (Agrela, Sánchez de Juan et al. 2011, Barbudo, Agrela et al. 2012, González-Fonteboa, Martínez-Abella et al. 2011, Jiménez, Agrela et al. 2011, Mas, Cladera et al. 2011) realizan la clasificación del árido reciclado siguiendo los criterios establecidos en la UNE-EN 933-11 (UNE EN 933-11 2009) del año 2009. El resto de estudios anteriores a esta fecha, lo hacen bien clasificando de visu (Poon, Kou et al. 2002), a través de la medición de su estructura porosa utilizando la técnica de intrusión de mercurio (Corinaldesi, Moriconi 2010) o mediante ensayos petrográficos para obtener su caracterización mineralógica (Calvo Pérez, Parra y Alfaro et al. 2002). Esto se puede corroborar en la Tabla 48 a la Tabla 50 donde se recogen los estudios en los que se ha realizado la clasificación de los componentes gruesos de los áridos reciclados objeto de estudio en los trabajos experimentales consultados.

Según los resultados de clasificación de los áridos reciclados como procedentes de hormigón, mixtos o cerámicos, se pone de manifiesto los problemas que pueden ocasionar los distintos componentes en la elaboración del hormigón. Así por ejemplo, el material cerámico presente en el árido reciclado puede afectar negativamente en el comportamiento físico y mecánico del hormigón (Yang, Du et al. 2011), aunque según Khatib (Khatib 2005) se produce un significativo desarrollo de resistencia entre los días 28 y 90, atribuida a la reacción puzolánica entre la sílice y la alúmina contenida en los materiales cerámicos reciclados y los productos que se forman durante la hidratación del nuevo cemento.

De la misma manera, la presencia de componentes minoritarios perjudiciales como el asfalto, yeso o vidrio, muestra la inadecuada selección en origen de los residuos y la consecuente falta de limpieza que presenta el árido, que pueden llegar, incluso en cantidades bajas, a resultar altamente nocivos para el hormigón, tanto en estado fresco como endurecido.

En este sentido, también se ha estudiado la presencia de impurezas metálicas en el árido reciclado, aunque los documentos técnicos consultados no contemplan estos productos de manera individualizada, sino conjuntamente con otros metales

férricos y no férricos, vidrio, materiales cohesivos, etc, estableciendo un rango de permisividad del total de estos componentes perjudiciales entre 0.5 y 3% (ver Tabla 51). Concretamente, las impurezas de aluminio contenidas en el árido reciclado pueden provocar la degradación en las propiedades mecánicas y la durabilidad del hormigón, incluso con contenidos muy bajos, inferiores al 0.1% (Park, Noguchi 2012). Es conocida la reacción química entre el aluminio y los álcalis del hormigón, que produce hidrógeno gaseoso que puede llegar a romper el hormigón endurecido.

La Tabla 51 y Tabla 52 muestran un resumen de la clasificación de los áridos reciclados basada en su composición, según las normas y guías de recomendaciones consultadas. Como se puede observar de la composición que pueden presentar los áridos reciclados, resultarían básicamente tres categorías dependiendo de la presencia de hormigón y/o material cerámico triturados, así como de otros componentes que pueden afectar a la calidad del árido reciclado.

Para unificar los criterios que se consideran en las normas y guías de recomendaciones se propone, en esta revisión bibliográfica, una clasificación en tres tipos diferentes de áridos reciclados que recibirían la siguiente nomenclatura:

- RCA (recycled concrete aggregate): árido reciclado procedente de hormigón,
- RMA (recycled masonry aggregate): árido reciclado procedente de material cerámico,
- MRA (mixed recycled aggregate): árido reciclado mixto.

Antes de estudiar cada uno de los requisitos granulométricos, físicos y químicos de los áridos reciclados, se puede concluir con la observación que se pone de manifiesto en la mayoría de los estudios consultados, donde los autores recomiendan la mejora del sistema manual de selección, ya que la inspección visual no es lo suficientemente precisa, pues se rige por la simple apariencia externa del grano (Angulo, Ulsen et al. 2004), debiéndose recurrir a métodos más eficientes de detección que, aunque aumenten el coste económico de los áridos reciclados, se aumente su ventaja ambiental (Pacheco-Torgal, Ding et al. 2012).

4.6.2. Características físicas de los áridos reciclados

La Tabla 53 muestra las características físicas que las diferentes normas y recomendaciones recogen según los tipos de árido reciclado. Como se puede observar, las diferentes regulaciones coinciden en estudiar para los áridos reciclados las propiedades relativas a la densidad y absorción. Tan sólo tres normas (BS 8500-2:2006 2006, EHE-08 2008, NEN 5905 2010) no hacen ningún tipo de referencia a la densidad de los áridos reciclados, en cambio el parámetro de absorción no se contempla en cuatro de ellas (BS 8500-2:2006 2006, CUR 1984, CUR 1986, CUR 1994, Ministero delle Infrastrutture 2008, prEN 12620 2013), pero lo que realmente resulta curioso es que la norma inglesa (BS 8500-2:2006 2006) no incluye ninguna de las dos prescripciones.

Tabla 48. Composición del árido reciclado todo en uno

AUTOR	TIPO DE ÁRIDO	HORMIGÓN (Rc) (%)	ÁRIDO NATURAL (Ru) (%)	TIERRA NATURAL (%)	CERÁMICO (ALBAÑILERÍA) (Rb) (%)	ASFALTO (RA) (%)	YESO (%)	VIDRIO (Rg) (%)	OTROS MINERALES (X) (%)
Barbudo et al., 2012	0/40 RCA	96.2-98.2			1.6-3.5	0-0.3	0-0.1		0-0.4
Jiménez et al., 2011	0/40 RCA	71.6-76.0	20.8-24.6	0.0	1.6-3.5	0.0-0.3	0.0-0.1		0.0-0.1
WRAP, 2007	RCA-10	100	0		0	0		0	
WRAP, 2007	RCA-35	100	0		0	0		0	
WRAP, 2007	RCA-60	100	0		0	0		0	
Barbudo et al., 2012	0/40 MRA	67.8-90.3			5.5-24.5	0-9.6	0-1.5		0-2.2
Jiménez et al., 2011	0/40 MRA	15.2-50.9	22.0-52.7	0.2-2.1	19.0-26.6	0.8-9.2	0.4-1.5		0.1
WRAP, 2007	RCA + ladrillo RA	30 y 70	0		70 y 30	0		0	
WRAP, 2007	MRA	88-10	54-76		10 a 13	0		0-0.05	
Barbudo et al., 2012	0/40 RMA	41.8-74.3			25.4-46.7	0-4.4	0.1-5.2		0-9.3
WRAP, 2007	ladrillo RA	0	0		100	0		0	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 49. Composición del árido grueso reciclado

AUTOR	TIPO DE ÁRIDO	IMPUREZAS (%)	INERTE (%)	HORMIGÓN (Rc) (%)	PASTA DE CEMENTO (%)	ÁRIDO NATURAL (Ru) (%)	CERÁMICO (ALBAÑILERÍA) (Rb) (%)	ASFALTO (RA) (%)	YESO (%)	VIDRIO (Rg) (%)	OTROS MINERALES (X) (%)
Agrela et al, 2011	RCA			90.5-97.7			1.9-7.2	0.3-4.6	0-1.0	0-0.1	
Agrela et al, 2011	RMA			36.38-65.08			30.08-53.9	0-6.9	0-9.9	0-0.75	
Agrela et al, 2011	MRA			70.01-88.9			6-28.9	0-16.7	0-3.2	0-1.51	
Angulo and Mueller, 2009	4/63 MRA			33.85-84.67			0.79-37.87	0.21-12.0			0.23-31.85
Corinaldesi and Moriconi, 2010	4/20 MRA		43		41		13	3			
Domingo-Cabo et al, 2009	4/20 MRA		68.5-81		31.5-18						
Gonzalez-Fontebova et al., 2011	4/20 MRA			14.1	47.3	25.5	2.7	10.1	0.2		
Mas et al., 2011	8/40 MRA				30-47	37-46	18-32	0.3-1	0.9-3.5	0.4-0.9	
Poon et al., 2002	MRA	0.2-0.3		77.7-98.8		21.8-0	0-0.2				

Fuente: Elaboración propia

Tabla 50. Composición del árido fino reciclado

AUTOR	TIPO DE ÁRIDO	PASTA DE CEMENTO (%)	ÁRIDO NATURAL (Ru) (%)	CERÁMICO (ALBAÑILERÍA) (Rb) (%)	ASFALTO (RA) (%)	YESO (%)	VIDRIO (Rg) (%)
Mas et al., 2011	0/8 MRA	43-47	27-37	18.5-32	0.5-1	0.4-0.9	0.1-0.4

Fuente: Elaboración propia

Tabla 51. Resumen de la clasificación de los áridos reciclados basada en su composición según las normas y guías de recomendaciones

Ámbito de aplicación	Norma /guía	Clase	Clase propuesta	Hormigón	Albañilería	Árido Natural	Materia orgánica	Contaminan /impurezas	Material ligero	Finos
Alemania	DIN 4226-100	Type 1	RCA	> 90	< 10		n.a.	1 (a)	n.a.	1
		Type 2	RCA	> 70	< 30		n.a.	1 (a)	n.a.	1.5
		Type 3	RMA	< 20	> 80	< 20	n.a.	1 (a)	n.a.	3
		Type 4	MRA	> 80 (b)			n.a.	1 (a)	n.a.	4
Australia	CSIRO	Class 1A	RCA	< 100	-	-	n.a.	1	n.a.	n.a.
		Clase 1B	MRA	< 70	< 30	-	n.a.	2	n.a.	n.a.
Bélgica	PTV 406	Béton	RCA	> 90	< 10	-	0.5	0.5 (c)	n.a.	n.a.
		Mixtes	MRA	> 40	> 10	-	0.5	1 (c)	n.a.	n.a.
		Maçonnerie	RMA	< 40	> 60	-	0.5	1 (c)	n.a.	n.a.
Brasil	NBR 15116	ARC	RCA	> 90	-	(d)	n.a.	3	n.a.	7
		ARM	MRA	< 90	-	(d)	n.a.	3	n.a.	10
China (e)	DG/TJ07/008	Type I	RCA	> 95	< 5	-	0.5	1	n.a.	n.a.
		Type II	MRA	< 90	> 10	-	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
España	EHE-08	RCA	RCA	-	< 5	-	0.5	(f)	1	2
	GEAR (g)	ARH	RCA	> 90	< 10	-	-	1 (a)	-	< 8-18 (h)
		ARMh	MRA	> 70	< 30	-	-	1 (a)	-	< 8-18
		ARMc	RMA	< 70	> 30	-	-	1 (a)	-	< 8-18
Holanda	CUR	ARH	RCA	> 95	< 5	-	n.a.	0.1	n.a.	-
	NEN 5905	ARH	RCA	< 80	-	< 20	n.a.	n.a.	0.1	3
Hong Kong	WBTC 12	Type II	RCA	< 100	-	-	n.a.	1	0.5	4
Japón (e)	JIS A 5021	ARH	RCA	-	-	-	n.a.	3	n.a.	1

Fuente: Elaboración propia

Tabla 52. (Continuación) Resumen de la clasificación de los áridos reciclados basada en su composición según las normas y guías de recomendaciones

Ámbito de aplicación	Norma /guía	Clase	Clase propuesta	Hormigón	Albañilería	Árido Natural	Materia orgánica	Contaminan /impurezas	Material ligero	Finos
Noruega	NB 26	Type 1	RCA	> 94	< 5	(d)	n.a.	1 (a)	0.1	n.a.
		Type 2	MRA	> 90		(d)	n.a.	1 (a)	0.1	n.a.
Portugal	LNEC E 471	ARB 1	RCA	> 90	< 10	(d)	n.a.	0.2 (i)	1	n.a.
		ARB 2	RCA	> 70	< 30	(d)	n.a.	0.5 (i)	1	n.a.
		ARC	MRA	> 90		>10	n.a.	1 (i)	1	n.a.
Reino Unido	BS 8500-2	RCA	RCA	> 95	< 5	-	n.a.	1 (j)	0.5	5
		RA	MRA	-	<100	-	n.a.	1 (j)	1	3
	BRE Digest 433	RCA I	RMA	-	< 20	>80	n.a.	5	1	n.a.
		RCA II	RCA	< 20	-	>80	n.a.	1	0.5	n.a.
		RCAIII	MRA	< 10	< 10	>80	n.a.	5	2.5	n.a.
	RILEM	Type I	RMA	-	< 100	-	1	5	1	3
		Type II	RCA	< 100	-	-	0.5	1	0.5	2
Type III		RCA	< 20	< 10	> 80	0.5	1	0.5	2	
Suiza	SIA 2030	BC	RCA	-	< 3	-	n.a.	1	n.a.	n.a.
		BNC	MRA	-	-	-	n.a.	2	n.a.	n.a.
n.a.: Límite no disponible en las normas y guías de recomendaciones						(f) Material bituminoso <1%; vidrio, metal, madera, plástico, etc <1%				
(a) Menos del 1% para material bituminoso en todos los tipos						(g) Para las aplicaciones de árido reciclado con ligantes hidráulicos en prefabricados (RT-04) y en hormigón en masa (RT-05)				
(b) 20% de material bituminoso y otros						(h) Para la aplicación RT-05 no se permiten finos				
(c) Menos del 5% de material bituminoso en todos los tipos						(i) Contaminantes de materiales bituminosos ARB 1 <5%; ARB 2<5%; ARC<10%				
(d) Incluido en el porcentaje de hormigón						(j) Material bituminoso RCA<5%; RA<10%				
(e) Esta norma clasifica el árido reciclado de acuerdo con sus propiedades										

Fuente: Elaboración propia

Fundamentalmente, las prescripciones que más se incluyen son la densidad de las partículas tras secado en estufa, y la absorción de los áridos reciclados. Siendo, precisamente éstas, de las características que más condicionan la calidad de estos tipos de áridos para las diferentes aplicaciones contempladas.

Destaca puntualmente la medición de las pérdidas por calcinación (LOI: losses of ignition) de los áridos reciclados, que está limitada en las recomendaciones australianas y que muchos autores, cuya investigación se centra en la línea de influencia de esta zona geográfica, la incluyen. Este parámetro, normalmente, se vincula a la medición de la materia orgánica en materiales cementosos.

En la Tabla 54 se presentan los valores entre los cuales se encuentran cada prescripción física, según la norma o guía de recomendaciones más o menos restrictiva.

De la Tabla 55 a la Tabla 63 se presentan los resultados de los requisitos físicos que se han obtenido de la revisión de las aproximadamente 60 investigaciones consultadas, diferenciándose por tamaños de los áridos, en todo uno, grueso, fino y finos, así como por los tipos de áridos reciclados que se han propuesto al inicio de este capítulo, es decir procedentes de hormigón (RCA), cerámicos (RMA) o mixtos (MRA).

4.6.2.1. Densidad

La densidad del árido reciclado resulta siempre inferior a la que presenta el árido natural, lo que se le atribuye a la presencia de material cerámico y otras impurezas, como el yeso, pero fundamentalmente al mortero adherido (Katz 2003, Sim, Park 2011). La mayor porosidad de éste último, en comparación con la del árido natural, hace que los beneficios que proporciona la pasta de cemento, en cuanto a la protección de la armadura frente al ataque por cloruros y otros agentes corrosivos, sean menor que los esperados (Ann, Moon et al. 2008).

Esta menor densidad va a contribuir a que los hormigones y morteros que se elaboren con dicho árido presenten unas características de menor trabajabilidad, demandando más agua en estado fresco, y una disminución de la resistencia y durabilidad en el endurecido. No obstante, la menor densidad que presenta el árido reciclado puede resultar de interés para aplicaciones en donde se requiera conseguir elementos de menor peso que los fabricados con hormigón convencional.

La densidad es, por tanto, un parámetro decisivo para establecer la calidad del árido reciclado y así queda contemplada para el procedente de residuos de construcción y demolición de hormigón (RCA) en la mayoría de la normativa, a excepción de la EHE-08 (EHE-08 2008) y la normas y recomendaciones europea (prEN 12620 2013), brasileña (NBR 15116 2005), holandesa (NEN 5905 2010), británicas (Collins 1998, BS 8500-2:2006 2006) y japonesa (JIS A 5021 2005).

Tabla 53. Requisitos físicos del árido reciclado de acuerdo con las normas y guías de recomendaciones

ÁMBITO DE APLICACIÓN	NORMA/GUÍA	DENSIDAD				ABSORCIÓN (%)	PÉRDIDAS POR CALCINACIÓN (LOI) (%)
		TRAS SECADO EN ESTUFA (kg/m³)	SATURADAS CON LA SUPERFICIE SECA (kg/m³)	APARENTE (kg/m³)	APARENTE DE LAS PARTÍCULAS (kg/m³)		
Alemania	DIN 4226-100	●■+				●■+	
Australia	CSIRO		●+	●+	●+	●+	●
Bélgica	PTV-406	●■				●■	
Brasil	NBR 15.116					●+	
China	DG/TJ07/008	●				●	
Corea	KS F2573				●	●	
España	EHE-08					●	
Europa	prEN 12620	●					
Holanda	NEN 5905					●	
	CUR	●■					
Hong Kong	WBTC 12	●				●	
Italia	NTC	●					
Japón	JIS A 5021/2/3	●				●	
Noruega	NB 26	●	●+	+		●	+
Portugal	LNEC E 471			●	+	●	+
Reino Unido	BS 8500-2						
	RILEM	●■				●■	

● RCA ■ RMA + MRA

Fuente: Elaboración propia

Tabla 54. Límites de los requisitos físicos del árido reciclado de acuerdo con las normas y guías de recomendaciones

PRESCRIPCIÓN	TIPO DE ÁRIDO	LÍMITES	NORMA/GUÍA MÁS RESTRICTIVA	NORMA/GUÍA MENOS RESTRICTIVA
Densidad de las partículas secas tras secado en estufa (kg/dm ³)	RCA	≥ 1.500-2.500 AG	JIS A 5021	EN 12620; NTC
		≥ 2.200 AF	JIS A 5022	JIS A 5022
	RMA	≥ 1.500-2.000	CUR	RILEM (Type I)
	MRA	≥ 1.500-2.200	DS 2426	DIN 4226-100 (Type 4); NB 26 (Type 1)
Densidad de las partículas saturadas con la superficie seca (kg/dm ³)	RCA	≥ 2.100	CSIRO Class 1A; NB 26 Type 2	CSIRO Class 1A; NB 26 Type 2
	MRA	≥ 1.800	CSIRO Class 1B; NB 26 Type 1	CSIRO Class 1B; NB 26 Type 1
Densidad aparente (kg/dm ³)	RCA	≥ 1.200-2.200	LNEC E 471	CSIRO Class 1A
	MRA	≥ 1.000-2.000	LNEC E 471	CSIRO Class 1A
Densidad aparente de las partículas (kg/dm ³)	RCA	≥ 2.440-2.500 AG	KS F2573	CSIRO Class 1A
		≥ 2.200 AF	KS F2573	
Absorción (%)	RCA	≤ 3 - 10% AG	KS F2573; JIS A 5021	DIN 4226-100 Type 1; DG/TJ07/008 Type II; WBTC 12; RILEM Type II; NB 26 Type 2
		≤ 3 - 13% AF	JIS A 5021	JIS A 5023
	RMA	≤ 9 - 20%	PTV-406	DIN 4226-100 Type 3; RILEM Type I
	MRA	≤ 8 - 20%	CSIRO Class 1B	NB 26 Type 1

Fuente: Elaboración propia

Tabla 55. Propiedades físicas de los áridos reciclados todo uno

AUTOR	TAMAÑO ÁRIDO	DENSIDAD PARTÍCULAS TRAS SECADO EN ESTUFA (kg/dm ³)	DENSIDAD PARTÍCULAS SATURADAS CON SUPERFICIE SECA (10min) (kg/dm ³)	DENSIDAD PARTÍCULAS SATURADAS CON SUPERFICIE SECA (24h) (kg/dm ³)	DENSIDAD APARENTE (kg/dm ³)	DENSIDAD APARENTE DE LAS PARTÍCULAS (kg/dm ³)	ABSORCIÓN (24h) (%)	POROSIDAD (%)
Jiménez et al., 2011	0/40 RCA	2.061-2.435					3.7-9.6	
Padmini et al., 2009	RCA 10				1.427-1.468	2.380-2.460	4.6-5.0	
Padmini et al., 2009	RCA 20				1.498-1.568	2.480-2.520	3.65-4.86	
Padmini et al., 2009	RCA 40				1.470-1.474	2.520-2.560	2.20-2.80	
WRAP, 2007	RCA-10	2.260		2.377		2.561	5.2	
WRAP, 2007	RCA-35	2.263		2.387		2.585	5.5	
WRAP, 2007	RCA-60	2.291		2.392		2.548	4.8	
WRAP, 2007	RMA ladrillo	2.130		1.940-2.300		2.450-2.630	8.0-28.0	
WRAP, 2007	RCA + RMA ladrillo	2.045-2.245		2.150-2.405		2.550-2.650	6.0-13.2	
G-Fonteboa and M-Abella, 2008	0/40 MRA	2.350-2.370	2.470-2.480				4.82-4.59	11.33-10.88
Jiménez et al., 2011	0/40 MRA	2.116-2.198					8.1-9.4	
Martín-Morales et al., 2011	0/63 MRA	2.230					10.64	
Tam and Le, 2007	0/10 MRA	2.100-2.590		2.300-2.620		2.590-2.670	0.77-8.77	
Tam and Le, 2007	0/20 MRA	2.120-2.620		2.310-2.640		2.590-2.660	0.57-7.99	
WRAP, 2007	MRA			2.400-2.650			3.5-9.5	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 56. Propiedades físicas de los áridos gruesos reciclados mixtos (MRA) a los que no se les indica el tamaño

AUTOR	DENSIDAD (kg/dm ³)					ABSORCIÓN (10min) (%)	ABSORCIÓN (24h) (%)
	SECAS EN ESTUFA	SATURADAS SUPERFICIE SECA (10min)	SATURADAS SUPERFICIE SECA (24h)	APARENTE	APARENTE PARTÍCULAS		
Agrela et al, 2011		2.260-2.330	2.240-2.580			5.30-8.56	2.1-8.79
Ann et al., 2008				2.480			4.25
Chen et al., 2003			2.280-2.290				7.54-5.04
Corinaldesi, 2010			2.400-2.420				8.8-6.8
Corinaldesi and Moriconi, 2009			2.320				8
Deshpande and Kulkarni, 2011					2.500-2.860		1.99-5.61
Fonseca et al, 2011	2.310	2.450		1.170			6.1
Gokce et al., 2004			2.410-2.500				3.19-5.58
Henry et al., 2011			2.430				5.81
Katz, 2003				1.433-1.462	2.550-2.600		3.2-3.4
Katz, 2003				1.220-1.278	2.250-2.350		8.0-9.7
Lovato et al., 2012				1.060	2.450		4.30
Poon et al., 2002			2.570				1.25
Rahman et al., 2009			2.400	2.360	2.510		1.39-1.78
Sagoe-Crentsil et al., 2001				2.394			5.6
Yong and Teo, 2009	2.090		2.140	1.326	2.300		6.4
Yoon et al, 2007			2.540				2.1
Zhu et al., 2011			2.584-2.678				2.60-6.76

Fuente: Elaboración propia

Tabla 57. Propiedades físicas de los áridos gruesos reciclados mixtos (MRA) de hasta 31.5mm

AUTOR	TAMAÑO ÁRIDO	DENSIDAD (kg/dm ³)				ABSORCIÓN (24h) (%)	POROSIDAD (%)
		SECA EN EST.	SAT. SUP.SECA	APARENTE	APA.PARTÍCUL		
Alaejos y Sánchez de Juan, 2004	4/16		2.300-2.450	2.090-2.400		4.91-9.74	
Angulo et al., 2004	4.8/25.4			1.780-2.730		1.21-18.09	
Barbudo et al., 2012	4/31.5		2.240-2.440			3.7-6.4	
Barbudo et al., 2012	4/31.5		2.150-2.460			5.1-10.1	
Barbudo et al., 2012	4/31.5		2.120-2.320			7.9-12.6	
Barra de Oliveira and Vazquez, 1996	5/10				2.230	7.6	
Barra de Oliveira and Vazquez, 1996	10/20				2.280	7.7	
Corinaldesi and Moriconi, 2010	4/20		2.340			7.5	
Domingo-Cabo et al, 2009	4/20	2.338	2.460			5.19	
Etxeberria and Vazquez, 2010	10/16	2.327	2.427		2.596	4.30	9.99
Etxeberria and Vazquez, 2010	16/25	2.361	2.452		2.598	4.30	9.13
Gómez-Soberón,2002	10/20		2.410		2.280	5.83	13.42
Gómez-Soberón,2002	5 /10		2.420		2.260	6.81	14.86
Glez-Fonteboa et al., 2011	4/20				2.400	5.01	
Kou et al., 2011 (b)	10				2.490	4.26	8.69
Kou et al., 2011 (b)	20				2.570	3.52	8.69
López-Gayarre et al., 2009	20	2.200-2.360				3.8-5.00	
Martín-Morales et al., 2011	4/16	2.150				8.43	
Poon et al., 2007	4/10				2.490	4.3	8.69
Poon et al., 2007	4/20				2.570	3.5	8.69
Sánchez de Juan and Alaejos, 2004	4/16		2.410		2.270	6.10	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 58. Propiedades físicas de los áridos gruesos reciclados mixtos (MRA) de más de 31.5mm

AUTOR	TAMAÑO DE ÁRIDO	DENSIDAD (kg/dm ³)			ABSORCIÓN (24h) (%)
		SECADO EN ESTUFA	SATURADAS CON LA SUPERFICIE SECA (24h)	APARENTE PARTICULAS	
Angulo and Mueller, 2009	4/63	1.890-2.760			
Glez-Fonteboa and Martínez-Abella, 2005	5/40		2.440	2.320	5.00
Martín-Morales et al., 2011	16/63	2.140			10.74
Mas et al., 2011	8/40			2.120-2.210	7.22-7.96

Fuente: Elaboración propia

Tabla 59. Propiedades físicas de los áridos gruesos reciclados cerámicos (RMA)

AUTOR	TAMAÑO ÁRIDO	DENSIDAD (kg/dm ³)					ABSORCIÓN (10min) (%)	ABSORCIÓN (24h) (%)	POROSIDAD (%)
		SECADO ESTUFA	SATURADAS SUP. SECA (10min)	PARTÍCULAS SATURADAS SUPERFICIE SECA (24h)	APARENTE	APARENTE PARTICULAS			
Agrela et al, 2011			2.070-2.400	2.060-2.390			5.04-12.74	7.21-14.36	
Becerra Cabral et al, 2010					1.460	1.860		15.62	
Debieb and Kenai, 2008					1.924	2.232		11.5	38.82
Medina et al., 2011	4/12.5	2.390						0.55	0.32
Senthamarai et al., 2011	20					2.450		0.72	
Yang et al., 2011	4/10	2.040		2.240				10.2	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 60. Propiedades físicas de los áridos gruesos reciclados de hormigón (RCA)

AUTOR	TAMAÑO ÁRIDO	DENSIDAD (kg/dm ³)					ABSORCIÓN (%)		POROSIDAD (%)
		SECA ESTUFA	SATURADAS SUP. SECA (10min)	SATURADAS SUP. SECA (24h)	APARENTE	APARENTE PARTÍCULAS	(10min)	(24h)	
Agrela et al, 2011			2.340-2.350	2.340-2.470			4.23-6.70	3.6-7.3	
Becerra Cabral et al, 2010					1.540	2.270		5.65	
Becerra Cabral et al, 2010					1.440	2.010		9.52	
Casuccio et al., 2008	4/40					2.520		3.9	
Casuccio et al., 2008	5/40					2.510		3.8	
Kou et al., 2011 (a)	10					2.350		7.42	8.46
Kou et al., 2011 (a)	20					2.450		5.63	8.46
Limbachiya et al., 2000		1.170-1.210		2.400-2.410				4.9-5.2	
Sim and Park, 2011						2.550		1.68	
Yang et al., 2011	4/10	2.420		2.520				4.2	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 61. Propiedades físicas de los áridos finos reciclados mixtos (MRA)

AUTOR	TAMAÑO ÁRIDO	DENSIDAD (kg/dm ³)				ABSORCIÓN (%)	
		SECA ESTUFA	SATURADA SUPERFICIE SECA (24h)	APARENTE	APARENTE PARTÍCULAS	(1h)	(24h)
Barbudo et al., 2012	0.063/4		2.060-2.370				7.1-9.6
Barbudo et al., 2012	0.063/4		1.310-2.450				4.2-15.2
Barbudo et al., 2012	0.063/4		2.150-2.650				4.4-12.1
Barra de Oliveira and Vazquez, 1996	0/5				2.250		7.2
Calvo Pérez et al., 2002	0/4						3.2
Calvo Pérez et al., 2002	0/2						4
Chen et al., 2003			2.190-2.260				10.37-7.22
Corinaldesi and Moriconi, 2009			2.150				10
Dapena et al., 2011		2.030			2.300		5.92
Deshpande and Kulkarni, 2011					2.290		8.52
Evangelista and de Brito, 2007 and 2010		1.913	2.165	1.234			13.1
Gómez-Soberón, 2002	0/5		2.350		2.170		8
Gonzalez-Fonteboa and Martínez-Abella, 2005	0/5		2.320		2.130		9.3
Katz, 2003				1.234-1.324	2.230-2.250		11.2-12.7
Kou and Poon, 2009			2.310			2.380	
Lovato et al., 2012				1.390	2.400		7.40
Martín-Morales et al., 2011	0/4	2.500					3.74
Mas et al., 2011	0/8				2.170-2.360		4.46-7.57
Zega and di Maio, 2011			2.560				8.5

Fuente: Elaboración propia

Tabla 62. Propiedades físicas de los áridos finos reciclados de hormigón (RCA)

AUTOR	DENSIDAD APARENTE (kg/dm ³)	DENSIDAD APARENTE PARTÍCULAS (kg/dm ³)	ABSORCIÓN (24h) (%)
Becerra Cabral et al, 2010	1.430	2.560	7.55
Becerra Cabral et al, 2010	1.390	2.600	4.13
Miranda and Selmo, 2006	1.530	2.670	2.0
Sim and Park, 2011		2.280	6.45

Fuente: Elaboración propia

Tabla 63. Propiedades físicas de los áridos finos reciclados cerámicos (RMA) y de los finos reciclados

AUTOR	DENSIDAD PARTÍCULAS SECADO ESTUFA (kg/dm ³)	DENSIDAD APARENTE (kg/dm ³)	DENSIDAD APARENTE PARTÍCULAS (kg/dm ³)	ABSORCIÓN (24h) (%)	POROSIDAD (%)
Becerra Cabral et al, 2010		1.260	2.350	10.69	
Debieb and Kenai, 2008		1.010	2.496	14.0	59.54
Miranda and Selmo, 2006		1.270	2.680	11.5	
Müller, 2004			1.850	12.1	
Poon and Chan, 2007	2.042			30.9	
Poon and Chan, 2007	2.199			16.9	
Miranda and Selmo, 2006 (*)		1.320	2.600	1.0	

(*) Finos (< 0.075mm) procedentes de mortero

Fuente: Elaboración propia

Tabla 64. Valores máximos y mínimos de densidad en las referencias

DENSIDAD	TIPO DE ÁRIDO	MÍNIMO (kg/dm ³)	MÁXIMO (kg/dm ³)
Densidad partículas secado en estufa	Todo uno	2.045 (WRAP, 2007)	2.620 (Tam and Le, 2007)
	Grueso	1.170 (Limbachiya et al., 2000)	2.760 (Angulo and Müller, 2009)
	Fino	1.913 (Evangelista and de Brito 2007 and 2010)	2.500 (Martín-Morales et al., 2011)
Densidad partículas saturadas con superficie seca (10 min)	Todo uno	2.470 (Gzález-Fonteboa and Mtínez-Abella, 2005)	2.480 (Gzález-Fonteboa and Mtínez-Abella, 2005)
	Grueso	2.070 (Agrela et al., 2011)	2.450 (Fonseca et al., 2011)
Densidad partículas saturadas con superficie seca (24h)	Todo uno	1.940 (WRAP, 2007)	2.650 (WRAP, 2007)
	Grueso	2.060 (Agrela et al., 2011)	2.678 (Zhu et al., 2011)
	Fino	1.310 (Barbudo et al., 2012)	2.650 (Barbudo et al., 2012)
Densidad aparente	Todo uno	1.427 (Padmini et al., 2009)	1.568 (Padmini et al., 2009)
	Grueso	1.060 (Lovato et al., 2012)	2.730 (Angulo et al., 2004)
	Fino	1.010 (Debied and Kenai, 2008)	1.530 (Miranda and Selmo, 2006)
	Finos	1.320 (Miranda and Selmo, 2006)	
Densidad aparente de partículas	Todo uno	2.380 (Padmini et al., 2009)	2.670 (Tam and Le, 2007)
	Grueso	1.860 (Becerra Cabral et al., 2010)	2.890 (Bairagi et al., 2012)
	Fino	1.850 (Müller, 2004)	2.680 (Miranda and Selmo, 2006)
	Finos	2.600 (Miranda and Selmo, 2006)	

Fuente: Elaboración propia

Así mismo, para el RMA no se contempla en el Reino Unido (Collins 1998, BS 8500-2:2006 2006) y para el MRA en la norma belga (PTV 406 2003), brasileña (NBR 15116 2005) y en las recomendaciones británicas (Collins 1998).

Como se puede observar en la Tabla 54, los valores recomendados para la densidad de las partículas de los áridos reciclados tras secado en estufa, independientemente del tipo de árido, se encuentran limitados entre 1.500-2.500 kg/dm³. Sin embargo, la mayoría de los valores que presentan los áridos reciclados estudiados son mayores de 2.000 kg/dm³ (ver Tabla 55 a Tabla 63). Con toda probabilidad, las normas NTC y DIN 4226-100, que especifican el valor mínimo de densidad en el árido reciclado de 1.500 kg/m³, lo hacen en consonancia con el proyecto de norma prEN 12620 (prEN 12620 2013), lo cual refleja el proceso de armonización que se está desarrollando a nivel de normalización en Europa. Sólo la norma japonesa JIS A 5022 (JIS A 5022 2006) establece un valor mínimo de densidad al árido fino reciclado, por lo que permitiría su uso a diferencia de la mayoría de la normativa consultada. No obstante, el valor mínimo lo establece en 2.200 kg/dm³, lo que resulta excesivamente restrictivo, impidiendo su uso en casi todos los casos.

La densidad de las partículas saturadas con la superficie seca se contempla sólo en la guía australiana CSIRO (Sagoe-Crentsil, Brown 1998) y en la norma noruega (NB 26 2003), mencionándola exclusivamente para los áridos reciclados procedentes de hormigón y mixtos, con un valor límite establecido por encima de 2.100 kg/dm³ y 1.800 kg/dm³ respectivamente.

Igual ocurre con la densidad aparente, que sólo es mencionada en dos regulaciones técnicas (Sagoe-Crentsil, Brown 1998, LNEC E 471 2009), aunque no coinciden en el valor límite que establecen. En el caso del árido reciclado procedente de hormigón, la CSIRO recomienda un valor mínimo de densidad aparente de 1.200 kg/dm³, mientras que en la LNEC E 471 es de 2.200 kg/dm³. En ambas regulaciones hay diferencias con respecto al árido reciclado mixto (MRA). La CSIRO, muy permisivamente, recomienda una densidad aparente mínima de 1.000 kg/dm³ y la LNEC E 471 la eleva hasta 2.000 kg/dm³.

Por su parte, la densidad aparente de las partículas es considerada por tan sólo dos regulaciones técnicas, aunque en este caso diferencian la densidad mínima que debe presentar los áridos grueso y fino reciclados de hormigón. En el caso del árido grueso, nuevamente la guía CSIRO (Sagoe-Crentsil, Brown 1998) y la norma KS F2573 (KS F 2573 2011) limitan al RCA a un valor mínimo de 2.500 kg/dm³, mientras que ésta última lo limita a 2.200 kg/m³ para el árido reciclado fino.

Según se puede observar de la Tabla 55 a la Tabla 63, la densidad de los áridos reciclados es tanto mayor cuanto más grande es el tamaño de los granos del árido (Becerra Cabral, Schalch et al. 2010, Etxeberria, Vázquez 2010, Kou, Poon et al. 2011, Kou, Poon et al. 2011, Padmini, Ramamurthy et al. 2009, Poon, Chan 2007, WRAP 2007). Las investigaciones consultadas confirman que las densidades más altas se dan en el caso de los áridos reciclados de hormigón (RCA) (Agrela, Sánchez de Juan et al. 2011, Becerra Cabral, Schalch et al. 2010, Jiménez, Agrela

et al. 2011, Padmini, Ramamurthy et al. 2009, WRAP 2007), respecto de los mixtos (MRA) (Angulo, Mueller 2009, Corinaldesi, Moriconi 2009, Dapena, Alaejos et al. 2011, Martín-Morales, Zamorano et al. 2011, Tam, Le 2007, Yong, Teo 2009). Por el contrario, los áridos reciclados cerámicos (RMA) presentan las densidades más bajas de todos los materiales granulares estudiados (Dapena, Alaejos et al. 2011, Debieb, Kenai 2008, Miranda, Selmo 2006, Müller 2004, Poon, Chan 2007).

En la Tabla 64 y para su mejor comprensión lectora, se han representado estos resultados de manera abreviada, diferenciándolos por tipos de densidades, según sea el procedimiento de medida, así como por tipos de árido, de acuerdo con el tamaño que presentan.

Como resultado de la comparación de los valores de densidad obtenidos de los diferentes estudios consultados con respecto de la limitación establecida en la regulación técnica, se puede decir que, aunque la densidad que presentan los áridos reciclados es ligeramente menor que la correspondiente a los áridos naturales convencionales, en general, no resulta difícil el cumplimiento de esta prescripción.

4.6.2.2. Absorción de agua

La absorción de agua es una de las propiedades físicas que marcan una mayor diferencia del árido reciclado respecto del natural. Este parámetro está íntimamente relacionado con la densidad, en tanto que el mortero adherido (López-Gayarre, Serna et al. 2009, Padmini, Ramamurthy et al. 2009), el material cerámico y las impurezas de yeso (Agrela, Sánchez de Juan et al. 2011) son los que aumentan considerablemente el índice de absorción de estos materiales, interfiriendo negativamente en el comportamiento del hormigón fresco y endurecido.

El papel de la absorción en el árido es decisivo en la confección de hormigones en tanto que si no se tratan adecuadamente le resta agua de amasado a la pasta de cemento, mermando así la resistencia mecánica final del producto elaborado con ellos. Para paliar este problema, algunos investigadores (Tam, Wang et al. 2008, Tam, Tam 2008) han hecho mucho hincapié en la medición de la absorción, no sólo a las 24h, sino a 10 y 30 minutos (Evangelista, de Brito 2010, Mas, Cladera et al. 2011, Djerbi Tegguer 2012), para observar el comportamiento de los materiales granulares reciclados en contacto con el agua y desarrollar modelos de premojado (González-Fonteboa, Martínez-Abella 2008, Tam, Gao et al. 2005) que mejoren las prestaciones finales del hormigón. Se considera que con la técnica de premojar el árido reciclado, antes de su mezcla con el resto de componentes del hormigón, se forma una zona de transición pasta-árido más densa (Barra de Oliveira, Vazquez 1996, Kou, Poon et al. 2011), ya que por una parte, se crea una reserva de agua interna capaz de reducir la retracción por secado que experimentan los cementos durante su fraguado y endurecimiento; mientras que por la otra, se evita que los áridos reciclados absorban parte del agua de amasado

que se añade a la mezcla, que puede disminuir la trabajabilidad necesaria del hormigón (Corinaldesi 2010, Domingo-Cabo, Lázaro et al. 2009).

En este sentido, en la bibliografía consultada, se han encontrado diferentes experimentos conducentes a que los áridos reciclados presenten menos actividad durante el proceso de amasado. Uno de los procedimientos más usados es el que utilizan Etxeberria and Vázquez (Etxeberria, Vázquez 2010) que preparan el hormigón reciclado incorporando el árido reciclado premojado al 80% de la humedad correspondiente a su absorción de agua. Debieb and Kenai (Debieb, Kenai 2008) proponen un premojado del árido grueso reciclado manteniéndolo en saturación de agua durante 24h antes de ser usado, es decir más que un premojado, se considera un presaturado en agua. Katz (Katz 2003) propone la mezcla previa del árido reciclado con el total del agua de amasado durante un periodo de 15 minutos, para continuar posteriormente con el procedimiento de dosificación que garantice la mezcla uniforme del hormigón. En algunos casos, se ha llegado incluso a intentar eliminar gran parte del mortero adherido, responsable en gran medida de la absorción de agua, al introducirlo en tres tipos diferentes de ácidos (Tam, Tam et al. 2007).

Los valores de absorción al agua del árido grueso reciclado procedente de hormigón establecidos en las normas y guías de recomendaciones consultadas, según se observa en la Tabla 54, se diferencian en dos grupos: los más restrictivos, que la establecen entre 5-7% (EHE-08 2008, JIS A 5022 2006, JIS A 5023 2007, NBR 15116 2005, NEN 5905 2010, Shanghai Construction Standard Society (SCSS) 2007), y los menos restrictivos, que lo hacen entre 9-10 %, llamando la atención el valor establecido por los países asiáticos del 3% máximo. Sin embargo, las normas japonesas JIS A (JIS A 5021 2005, JIS A 5022 2006, JIS A 5023 2007) recomiendan valores entre 3% y 7% dependiendo del uso del hormigón.

En relación con el árido reciclado procedente de albañilería (RMA) la mayoría de las normas coinciden en el valor menos restrictivo, de como máximo el 20% de absorción, destacando la norma belga que lo establece en un 9% máximo. Las recomendaciones para el árido reciclado mixto (MRA) arrojan valores porcentuales entre el 8% (Sagoe-Crentsil, Brown 1998) y el 20% máximo (NB 26 2003), con un valor intermedio del 15% en el caso de la norma alemana. En este sentido, la norma brasileña (NBR 15116 2005) es la única que establece un valor máximo para los áridos finos reciclados mixtos del 17%.

Según se puede observar de la Tabla 55 a la Tabla 63, el valor porcentual de absorción de los áridos reciclados, al contrario de lo que ocurre con el parámetro de la densidad, es mayor cuanto más pequeño es el tamaño del árido (Barbudo, Agrela et al. 2012, Corinaldesi, Moriconi 2009, Debieb, Kenai 2008, Müller 2004, Kou, Poon et al. 2011, Poon, Kou et al. 2007), siendo más alto en el caso del material cerámico (Agrela, Sánchez de Juan et al. 2011, Becerra Cabral, Schalch et al. 2010, Debieb, Kenai 2008, Yang, Du et al. 2011, WRAP 2007) que en el árido reciclado mixto (Evangelista, de Brito 2007, Evangelista, de Brito 2010, Katz 2003, Kou, Poon 2009, Martín-Morales, Zamorano et al. 2011, Zega, Di Maio 2011) y en

el árido procedente de hormigón reciclado (Becerra Cabral, Schalch et al. 2010, Kou, Poon et al. 2011, Miranda, Selmo 2006, Sim, Park 2011).

El coeficiente de absorción de los áridos reciclados, medido a las 24h, varía entre 0.57% y 13.2% en los áridos reciclados todo uno (Tam, Le 2007, WRAP 2007), entre 1.21% (Angulo, Ulsen et al. 2004) y 15.62% (Becerra Cabral, Schalch et al. 2010) en los áridos reciclados gruesos y entre 2.0% (Miranda, Selmo 2006) y 30.9% (Poon, Chan 2007) en las arenas recicladas. Destacan notablemente, con índices de absorción de agua inferiores al 1%, los áridos gruesos reciclados procedentes de cerámica sanitaria (Medina, Sánchez de Rojas et al. 2011) y de material cerámico para electricidad (Senthamarai, Manoharan et al. 2011) dada la alta compacidad que presentan los materiales de procedencia (ver Tabla 59).

Como resultado de la comparación de los valores de absorción de agua obtenidos de los diferentes estudios consultados con respecto de la limitación establecida en la regulación técnica, se puede decir que este parámetro es uno de las especificaciones físicas más importantes a tener en cuenta en los áridos reciclados. La absorción puede variar dependiendo del tipo y tamaño del árido reciclado, siendo difícil de cumplir incluso si se atiende a los valores menos restrictivos indicados en las normas y regulaciones, y agravándose incluso el problema en el caso del árido reciclado fino.

4.6.2.3. Porosidad

La porosidad es uno de los parámetros que no incluye implícitamente ninguna de la normativa consultada, pero que está totalmente vinculada con la densidad y la absorción. Este parámetro en los áridos reciclados aumenta significativamente con la cantidad de pasta de cemento adherido, que es siempre mayor cuanto más pequeño es el tamaño del grano (Katz 2003).

Significativo es el hecho de que algunos autores consideren su estudio y, aunque no existe un número de resultados suficiente como para confirmarlo, se puede observar (Tabla 55 a Tabla 63) como los áridos reciclados procedentes de material cerámico (RMA) son los que presentan mayores porosidades (59.54%) (Debieb, Kenai 2008). En el lado opuesto, con el menor índice de porosidad, 0.32%, se encuentra de nuevo la cerámica sanitaria (Medina, Sánchez de Rojas et al. 2011), de diferente grado de compacidad que la cerámica arcillosa tradicional. Finalmente, no se encuentran diferencias notables entre el RCA (8.46%) (Kou, Poon et al. 2011) y el MRA, con valores entre 9.13% y 14.86% (Etxeberria, Vázquez 2010, Gómez-Soberón 2002, González-Fontebova, Martínez-Abella 2008, Kou, Poon et al. 2011, Poon, Kou et al. 2007).

4.6.2.4. Pérdidas por calcinación

En cuanto a la pérdida por calcinación (LOI), no es una especificación propia de los áridos reciclados, ni es limitada por ninguna normativa, salvo la Guide Specifications for Recycled Aggregates in Concrete Construction australiana

CSIRO (Sagoe-Crentsil, Brown 1998). No obstante, este parámetro ha sido considerado por algunos autores, probablemente para evaluar la respuesta de los componentes del árido reciclado frente a altas temperaturas, y cuya experimentación ha arrojado resultados de entre 2.6% y 12.9% (Angulo, Ulsen et al. 2004, Müller 2004, Sagoe-Crentsil, Brown et al. 2001). Sólo Angulo et al. (Angulo, Ulsen et al. 2004) vincula las pérdidas por calcinación a la cantidad de cemento que contenga el árido reciclado.

4.6.3. Comportamiento mecánico de los áridos reciclados

El comportamiento mecánico de los áridos reciclados influye decisivamente en la resistencia mecánica del hormigón endurecido (Ajdukiewicz, Kliszczewicz 2002). La diferente normativa y recomendaciones técnicas consultadas definen las propiedades mecánicas de los áridos a través de tres parámetros: el coeficiente de Los Ángeles, el valor del 10% de finos (TFV: ten per cent value) y la pérdida de peso por sulfato magnésico. Por indicación expresa de los procedimientos experimentales normalizados, son ensayos que se le practican exclusivamente a la fracción gruesa de los áridos, por lo que dichos resultados se pueden extrapolar a la fracción fina y, por tanto, al conjunto de los áridos estudiados.

Tabla 65. Propiedades mecánicas del árido reciclado de acuerdo las normas y guías de recomendaciones

ÁMBITO DE APLICACIÓN	NORMA/GUÍA	COEFICIENTE DE LOS ÁNGELES	VALOR DEL 10 % DE FINOS (TFV) (KN)	PÉRDIDA DE PESO (%)
Alemania	DIN 4226-100	●■+		
Australia	CSIRO			●
Bélgica	PTV-406	●■+		
China	DG/TJ07/008			●
Corea	KS F2573	●		●
España	EHE-08	●		●
Europa	EN 12620	●		
Holanda	NEN 5905	●		
Hong Kong	WBTC 12		●	
Italia	NTC	●+		●+
Portugal	LNEC E 471	●		
● RCA; ■ RMA; + MRA				

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 65 recoge las propiedades mecánicas contempladas por las diferentes normas y guías de recomendaciones consultadas, observándose que muchas de ellas no tienen en cuenta estos parámetros a la hora de establecer la idoneidad de los áridos reciclados en la elaboración de hormigón, como la norma brasileña (NBR 15116 2005), las recomendaciones holandesas (CUR 1984, CUR 1986, CUR 1994), las normas japonesas (JIS A 5021 2005, JIS A 5022 2006, JIS A 5023 2007), la holandesa (NEN 5905 2010) y noruega (NB 26 2003), además de

ninguna de la regulación establecida al respecto en Suiza (OT 70085 2000, SIA bulletin MB 2030 2010) o el Reino Unido (BS 8500-2:2006 2006, Collins 1998, RILEM, Technical Committee TC 121 1994).

En la Tabla 66 se presentan los valores entre los cuales se encuentran cada prescripción física según la norma o guía de recomendaciones más o menos restrictiva.

Tabla 66. Límites de los requisitos mecánicos del árido reciclado de acuerdo con las normas y guías de recomendaciones

PRESCRIPCIÓN	TIPO DE ÁRIDO	LÍMITES	NORMA/GUÍA MÁS RESTRICTIVA	NORMA/GUÍA MENOS RESTRICTIVA
Coef. de Los Angeles	RCA	≤ 40-50	EHE-08; NEN 5905	LNEC E 471
10% de finos (kN)	RCA	>100kN	WBTC 12	
Pérdida de peso (%)	RCA	≤ 9-18% AG	CSIRO	DG/TJ07/008; EHE-08
		≤ 10% AF	KS F2573	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 67. Comportamiento mecánico de los áridos reciclados todo en uno según las normas y guías de recomendaciones

AUTOR	TIPO DE ÁRIDO	COEF. DE LOS ÁNGELES	10% DE FINOS (TFV) (kN)
Barbudo et al., 2012	0/40 RCA	32-34	
Jiménez et al., 2011	0/40 RCA	33-34	
Padmini et al., 2009	RCA 10	46-48	
Padmini et al., 2009	RCA 20	33-38	
Padmini et al., 2009	RCA 40	29-30	
WRAP, 2007	RCA-10	40	
WRAP, 2007	RCA-35	35	
WRAP, 2007	RCA-60	29	
Barbudo et al., 2012	0/40 RMA	30-43	
WRAP, 2007	ladrillo RMA	48-60	
Barbudo et al., 2012	0/40 MRA	31-45	
González-Fonteboia and Martínez-Abella, 2008	0/40 MRA	32-34	
Jiménez et al., 2011	0/40 MRA	31-41	
Tam and Le, 2007	0/10 MRA		61.36-189.38
Tam and Le, 2007	0/20 MRA		61.36-189.38
WRAP, 2007	RCA + ladrillo RMA	36-53	
WRAP, 2007	MRA	30-36	

Fuente: Elaboración propia

Los resultados de los requisitos mecánicos que se han obtenido de la revisión de las aproximadamente 60 investigaciones consultadas se muestran desde la Tabla 67 a la Tabla 69. Igual que en el caso de los requisitos físicos, los resultados se han diferenciado por tamaños de los áridos, así como por los tipos de áridos reciclados que se han propuesto al inicio de este capítulo.

Tabla 68. Comportamiento mecánico de los áridos gruesos reciclados mixtos (MRA) según las normas y guías de recomendaciones

AUTOR	TIPO DE ÁRIDO	COEF. DE LOS ÁNGELES	10% DE FINOS (TFV) (kN)	PÉRDIDA DE PESO (%)
Alaejos and Sánchez de Juan, 2004	4/16	35.1-41.7		
Bairagi et al., 1992	4.75/20	27		
Domingo-Cabo et al, 2009	4/20	40.22		
Fonseca et al, 2011		42.7		
Gokce et al., 2004				18.4-48.3
González-Fonteboa and Martínez-Abella, 2005	5/40	39.65		
González-Fonteboa et al., 2011	4/20	34		
Kou et al., 2011 (b)	10		126	
Kou et al., 2011 (b)	20		126	
Marinkoviç et al., 2010	4/8	28.3		1.8
Marinkoviç et al., 2010	8/16	30.4		1.4
Marinkoviç et al., 2010	16/31.5	33.1		1.2
Martín-Morales et al., 2011	16/63	29		
Mas et al., 2011	8/40	43-44		
Poon et al., 2002			159.7	
Poon et al., 2007	4/10		126	
Poon et al., 2007	4/20		126	
Sánchez de Juan and Alaejos, 2004	4/16	38.9		
Yoon et al, 2007		17.4		
Zhu et al., 2011		27.9-37.8		

Fuente: Elaboración propia

4.6.3.1. Resistencia a la fragmentación de Los Ángeles

La resistencia a la fragmentación del árido grueso se puede medir mediante el coeficiente de Los Ángeles o el llamado coeficiente de resistencia al impacto (AIV: aggregate impact value). Un alto coeficiente indicaría que los áridos, durante su manipulación, presentan baja resistencia a ser fragmentados. A pesar de ser un parámetro fundamental en los áridos, por su contribución en la resistencia mecánica del hormigón, son pocas las normas que lo contemplan para el árido reciclado procedente de hormigón (DIN 4226-100 2002, EHE-08 2008, prEN 12620 2013, KS F 2573 2011, LNEC E 471 2009, Ministero delle Infrastrutture 2008, NEN 5905 2010, PTV 406 2003), y sólo la alemana y la belga (DIN 4226-100

2002, PTV 406 2003) lo hacen para el árido reciclado cerámico y mixto, y la italiana (Ministero delle Infrastrutture 2008) para el mixto.

Tabla 69. Comportamiento mecánico de los áridos gruesos reciclados de hormigón (RCA) y cerámicos (RMA) según las normas y guías de recomendaciones

AUTOR	TIPO DE ÁRIDO	COEFICIENTE DE LOS ÁNGELES	10% DE FINOS (TFV) (kN)
Casuccio et al., 2008	4/40 RCA	34	
Casuccio et al., 2008	5/40 RCA	39	
Kou et al., 2011 (a)	RCA 10		110
Kou et al., 2011 (a)	RCA 20		110
Limbachiya et al., 2000	RCA		160
Sim and Park, 2011	RCA	21.5	
Debieb and Kenai, 2008	RMA ladrillo	31.6	
Medina et al., 2011	4/12.5 cerámica sanitaria	20	

Fuente: Elaboración propia

Según se observa en la Tabla 65, las normas española y holandesa son las únicas que contemplan este parámetro físico en los áridos reciclados procedentes de hormigón, con un coeficiente de Los Ángeles máximo de 40 y 50. Sin embargo, del mismo modo que para otras prescripciones, el proyecto de norma europea prEN 12620 (prEN 12620 2013) establece que cuando las normas no incluyan el valor límite de esta prescripción, el fabricante debe realizar el ensayo correspondiente y declarar la categoría asignada al árido en función del valor obtenido del ensayo. En consecuencia, las normas europeas con el fin de completar su proceso de armonización con aquella, están introduciendo este protocolo de declaración de categoría. En el caso concreto del árido reciclado procedente de hormigón, el fabricante debe declarar la categoría que se le asigna cuando el resultado del ensayo de Los Ángeles esté comprendido en el rango 10-60.

El coeficiente de Los Ángeles en los áridos reciclados resulta más alto que en el árido natural, debido al mortero adherido (Domingo-Cabo, Lázaro et al. 2009) que se va desprendiendo del árido primitivo durante el proceso del ensayo y por tanto lo hará durante el amasado del hormigón reciclado, provocando un aumento considerable en el contenido en finos. Este coeficiente (ver Tabla 67 a Tabla 69) oscila entre 29 y 53 (Padmini, Ramamurthy et al. 2009, WRAP 2007) para los áridos reciclados todo uno y entre 17.4 (Yoon, Seo et al. 2007) y 44 (Mas, Cladera et al. 2011) para los áridos gruesos reciclados. Prácticamente todos los tipos de áridos reciclados presentan coeficientes de Los Ángeles muy similares, sobre todo en cuanto a los áridos reciclados de hormigón (RCA) y los mixtos (MRA). En este sentido, se ha establecido una alta correlación entre el contenido en material cerámico, la presencia de yeso y la baja resistencia a la fragmentación del árido reciclado (IHOBE 2011).

Según lo observado en los resultados de los estudios consultados (Tabla 67 a Tabla 69) la resistencia que presentan los áridos reciclados ante la fragmentación

según el ensayo de Los Ángeles, es un parámetro de fácil cumplimiento por parte de estos materiales granulares. No obstante, a pesar de que en algunos casos no se alcanza el grado de cumplimiento necesario, son los áridos reciclados procedentes de hormigón los que mayor grado de cumplimiento alcanzarían, lo que viene a corroborar la necesaria mejora el proceso de selección y tratamiento de los residuos de construcción y demolición (Collins 2003, Corinaldesi, Giuggiolini et al. 2002, Tam, Le 2007).

4.6.3.2. Valor del 10% de finos

El valor del 10% de finos (TFV), es otra manera de medir la capacidad resistente de los áridos, que sólo se limita al árido reciclado procedente de residuos de hormigón en la normativa de Hong Kong (WBTC 12/2002 2002). Mediante este ensayo, aplicable tanto a áridos frágiles como duros, se obtiene la resistencia que presentan a ser triturados. La WBTC 12 lo limita a un valor mínimo de 100kN, oscilando los pocos resultados de las investigaciones consultadas entre 61.36 y 189.38 kN (Tam, Le 2007).

La guía británica WRAP (WRAP 2007), haciéndose eco de este parámetro, establece una posible relación entre un alto TFV y el contenido en hormigón del árido reciclado.

A falta de un mayor número de estudios que lo corroboren, igual que en la prescripción anterior, se podría establecer la idoneidad del árido reciclado desde el punto de vista mecánico de este parámetro, abundando en la necesidad de mejorar la selección y el tratamiento en planta de reciclado de los residuos de construcción y demolición de los que se va a obtener el árido reciclado (Collins 2003, Corinaldesi, Giuggiolini et al. 2002).

4.6.3.3. Pérdida de peso por sulfato magnésico

Mediante este ensayo se determina la pérdida de peso a través de la resistencia a la desintegración por la meteorización que puede sufrir el árido expuesto a la intemperie, en particular frente a los ciclos hielo-deshielo. En las normas y recomendaciones donde ha sido mencionado este parámetro, sólo está recomendado su estudio en el árido reciclado de hormigón (EHE-08 2008, Ministero delle Infrastrutture 2008, Sagoe-Crentsil, Brown 1998, Shanghai Construction Standard Society (SCSS) 2007). No obstante, esta pérdida de peso no ha sido estudiada en profundidad para el árido reciclado, puesto que en principio, por su marcada absorción al agua, se considera a estos materiales granulares como no resistentes a las heladas (Barra de Oliveira, Vazquez 1996).

De acuerdo con la Tabla 66, la pérdida de masa del árido reciclado, cuando es sometido a la cristalización de sales, está limitada a un máximo de 9% o 18% para el árido grueso reciclado de hormigón, salvo que se considere la norma coreana que especifica un límite del 12%. Esta misma, contempla esta prescripción para el árido fino procedente de hormigón, limitándola a una pérdida de masa del 10%

máximo. Así mismo, igual que ocurre con la resistencia a la fragmentación de Los Ángeles, el productor debe declarar la categoría asignada al árido reciclado según el valor que se obtenga de la ejecución del correspondiente ensayo cuando, no limitándolo específicamente en la normativa, el árido reciclado procedente de hormigón (prEN 12620 2013, Ministero delle Infrastrutture 2008) y el mixto (Ministero delle Infrastrutture 2008) presenten una pérdida de peso en el rango entre 1% y 50%.

Aunque los datos que se disponen no pueden ser utilizados para afirmarlo con rotundidad, ya que mientras Gokce et al. (Gokce, Nagataki et al. 2004) obtienen resultados muy por encima de la limitación establecida (18.4-48.3), atribuidos al desprendimiento del mortero adherido, el estudio de Marinković et al. (Marinković, Radonjanin et al. 2010) arroja resultados muy positivos (1.2-1.8).

En consecuencia, no se puede establecer una conclusión al respecto del comportamiento de estos materiales granulares ante la pérdida de peso que puedan experimentar al ser sometidos a la cristalización de sales. No obstante, por los resultados que se conocen en cuanto a la capacidad de absorción de agua, parece que no resulta necesario practicar este ensayo sobre los áridos reciclados, pues de antemano se le presume un mal comportamiento frente a los procesos en los que intervengan cualquier tipo de fluido.

4.6.4. Aptitud química de los áridos reciclados

Los requisitos químicos que han de mostrar los áridos reciclados para presentar la calidad necesaria en la elaboración de hormigón se resumen a: (i) el contenido en cloruros y sulfatos, por su posible contribución a la corrosión de armaduras y al deterioro del hormigón endurecido, (ii) la presencia de determinadas partículas que pueden resultar perjudiciales en el fraguado y endurecimiento del hormigón, como los terrones de arcilla, las partículas blandas y las partículas ligeras, y (iii) la presencia de materia orgánica. La mayoría de la normativa, así como las guías de recomendaciones contemplan la limitación en cuanto a sulfatos y cloruros totales, y solubles en agua o en ácido. Al contrario que en las especificaciones mecánicas, los procedimientos experimentales se realizan fundamentalmente a la fracción fina de los áridos, por lo que dichos resultados se pueden extrapolar a la fracción gruesa de los mismos y por tanto al conjunto del árido.

La Tabla 70 recoge la diferente normativa y guías de recomendaciones que contemplan cada uno de los requisitos químicos estudiados, observándose que son las prescripciones más exigidas de todas en las diferentes regulaciones, debido a su contrastada y peligrosa presencia en el hormigón. Sorprendentemente, normas como la coreana (KS F 2573 2011) no contempla ningún requisito químico en sentido estricto, mientras que la australiana (Sagoe-Crentsil, Brown 1998) o las japonesas (JIS A 5021 2005, JIS A 5022 2006, JIS A 5023 2007) limitan exclusivamente los cloruros totales.

Tabla 70. Requisitos químicos de los áridos reciclados contemplados en las normas y guías de recomendaciones

Ámbito de aplicación	Norma/guía	Sulfatos sol. en agua (%)	Sulf. sol. en ácido(%)	Sulfatos totales (%)	Cloruros sol. agua(%)	Cloruros sol. ácido(%)	Cloruros totales(%)	Partículas ligeras(%)	Terrones arcilla(%)	Materia organ. (%)
Alemania	DIN 4226-100	■+	●		■+	●■+	■+			
Australia	CSIRO						+			●+
Bélgica	PTV-406	■+	●	●■+	■+	●■+		●■		●■+
Brasil	NBR 15116	●		+	●+			+	●+	●
China	DG/TJ07/008		●			●				●
Corea	KS F2573								●	●
España	EHE-08		●	●	●		●	●	●	
Europa	EN 12620	●	●	●						
Holanda	NEN 5905			●		●				●
	CUR	■	●			●■		●		●■
Hong Kong	WBTC 12	●			●			●		
Italia	NTC	●	●+	●+		+				
Japón	JIS A 5021/2/3				●					●
Noruega	NB 26						+	●+		●
Portugal	LNEC E 471	●	●+	●+	+	●+	+	●+		●
Reino Unido	BRE Digest 433		●	■	■					
	BS 8500-2	■	●■	+				●■		
	RILEM	●	■		■			●■		●■
Suiza	SIA 2030	●	●	+		+	●+			
	OT 70085		●+			●	+			

● RCA; ■ RMA; + MRA

Tabla 71. Límites de los requisitos químicos del árido reciclado de acuerdo con las normas y guías de recomendaciones

PRESCRIPCIÓN	ÁRIDO	LÍMITES	NORMA/GUÍA MÁS RESTRICTIVA	NORMA/GUÍA MENOS RESTRICTIVA
Sulfatos soluble en agua (%)	RCA	≤ 0.2- 1%	LNEC E 471	RILEM (Type II); WBTC 12; NBR 15.116
	RMA	≤ 1%	RILEM (Type I)	
	MRA	≤ 0.2-1%	LNEC E 471	NBR 15.116
Sulfatos soluble en ácido (%)	RCA	≤ 0.8-1%	DIN 4226-100; EHE-08; LNEC E 471	BS 8500; BRE digest 433; CUR; DG/TJ07/008 ; OT 70085
	RMA	≤ 0.8-1%	DIN 4226-100	BS 8500-2; CUR
	MRA	≤ 0.8-1%	DIN 4226-100; LNEC E 471	OT 70085
Sulfatos totales (%)	RCA	≤ 1%	EHE 08; prEN 12620; NEN 5905; NTC; LNEC E 471	
	RMA	≤ 1%	BRE Digest 433	
	MRA	≤ 1%	NTC; LNEC E471; BRE Digest 433; SIA 2030	
Cloruros sol. en agua (%)	RCA	≤ 0.03-1%	EHE-08	NBR 15.116 Class A
Cloruros soluble en ácido (%)	RCA	≤ 0.03-0.25%	OT 70085	DG/TJ07/008 Type I
	RMA	≤ 0.04-0.06%	DIN 4226-100 Type 3	PTV-406
	MRA	≤ 0.04-1%	DIN 4226-100 Type 2	NBR 15.116 Class A
Cloruros totales (%)	RCA	≤ 0.03-0.15%	EHE-08; SIA 2030	EHE-08

Fuente: Elaboración propia

Tabla 72. (Continuación) Límites de los requisitos químicos del árido reciclado de acuerdo con las normas y guías de recomendaciones

PRESCRIPCIÓN	ÁRIDO	LÍMITES	NORMA/GUÍA MÁS RESTRICTIVA	NORMA/GUÍA MENOS RESTRICTIVA
Partículas ligeras (%)	RCA	≤ 0.1-1%	CUR; NB 26 Type 2	EHE 08; LNEC E 471
	RMA	≤1%	PTV-406; RILEM Type I; BS 8500-2	
	MRA	≤1%	LNEC E 471	
Terrones de arcilla (%)	RCA	≤ 0.2-2%	KS F2573	NBR 15.116
	MRA	≤ 2%	NBR 15.116	
Materia orgánica (%)	RCA	≤ 0.10-2%	CUR; NEN 5905	NBR 15.116 Class A
	RMA	≤ 0.5-1%	PTV-406	RILEM Type I; CUR
	MRA	≤ 0.15-2%	CSIRO Class 1B	LNEC E471; NBR 15.116 Class A

Fuente: Elaboración propia

Tabla 73. Requisitos químicos de los áridos reciclados todo uno

AUTOR	TIPO DE ÁRIDO	SULFATOS SOLUBLES EN AGUA (%)	SULFATOS SOLUBLES EN ÁCIDO (%)	SULFATOS TOTALES (%)	CLORUROS SOLUBLES EN AGUA (%)	CLORUROS SOLUBLES EN ÁCIDO (%)	CLORUROS TOTALES (%)	PARTÍCULAS BLANDAS (%)	PARTÍCULAS LIGERAS (%)	MATERIA ORGÁNICA (%)
Barbudo et al., 2012	0/40 RCA	0.25-0.38	0.47-0.8							0.15-0.66
Jiménez et al., 2011	0/40 RCA			0.6-0.8					0	
WRAP, 2007	RCA 10		0.4		0.00	0.03				
WRAP, 2007	RCA 35		0.5		0.00	0.06				
WRAP, 2007	RCA 60		0.5		0.00	0.08				
Barbudo et al., 2012	0/40 MRA	0.01-1.56	0.32-2.67							0.24-0.95
González-Fonteboa and Martínez-Abella, 2008	0/40 MRA		0.18	0.56			0.0056	20.36	0.04	
Jiménez et al., 2011	0/40 MRA			1-6					0.0-0.1	
Tam and Le, 2007	0/10 MRA			0.003-0.031			0.008-0.0976			
Tam and Le, 2007	0/20 MRA			0.003-0.031			0.0016-0.0902			
WRAP, 2007	RCA + ladrillo		0.1-1.7		0.00	0.00-0.03				
WRAP, 2007	MRA		0.5		0.00	0.07-0.08				
Barbudo et al., 2012	0/40 RMA	0.02-3.93	0.73-6.19							0.21-0.89
WRAP, 2007	Ladrillo		0.0-1.9		0.00	0.00				

Fuente: Elaboración propia

Tabla 74. Requisitos químicos de los áridos gruesos reciclados

AUTOR	TIPO DE ÁRIDO	SULFATOS SOLUBLES EN AGUA (%)	SULFATOS SOLUBLES EN ÁCIDO (%)	SULFATOS TOTALES (%)	CLORUROS SOLUBLES EN AGUA (%)	CLORUROS TOTALES (%)	TERRONES DE ARCILLA (%)	PARTÍCULAS BLANDAS (%)	PARTÍCULAS LIGERAS (%)
Agrela et al, 2011	MRA		0.04-1.71	0.15-0.93					
Alaejos and Sánchez de Juan, 2004	4/16 MRA		0.1-0.42	0.15-0.58	0.0006-0.005	0.0008-0.005	0.04-0.62		0.06-5.85
Gonzalez-Fonteboa and Martínez-Abella, 2005	5/40 MRA		0.2	0.55		0.0055	0	20.36	0.04
Marinkoviç et al., 2010	4/8 MRA			in traces		0			
Marinkoviç et al., 2010	8/16 MRA			in traces		0			
Marinkoviç et al., 2010	16/31.5 MRA			in traces		0			
Mas et al., 2011	8/40 MRA	0.13-0.15	2.21-6.98	0.29-2.45	0.010-0.13		0.03-0.22		0.7-4.8
Agrela et al, 2011	RCA		0.33-0.44	0.22-0.27					
Agrela et al, 2011	RMA		0.56-4.45	0.27-1.9					

Fuente: Elaboración propia

Tabla 75. Requisitos químicos de los áridos finos reciclados

AUTOR	TIPO DE ÁRIDO	SULFATOS SOLUBLES EN AGUA (%)	SULFATOS SOLUBLES EN ÁCIDO (%)	SULFATOS TOTALES (%)	CLORUROS SOLUBLES EN AGUA (%)	CLORUROS TOTALES (%)
Calvo Pérez et al., 2002	0/4 MRA	0.00	0.38	0.52	0.00	
Calvo Pérez et al., 2002	0/2 MRA	0.00	0.33	0.39	0.00	
Martín-Morales et al., 2011	0/4 MRA	1.52			0.053	
Mas et al., 2011	0/8 MRA	0.13-0.14	2.90-3.66	0.98-1.5	0.024-0.025	
Müller, 2004	RMA			0.6		0.017

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 71 y la Tabla 72 se presentan los valores entre los cuales se encuentran cada prescripción química según la norma o guía de recomendaciones más o menos restrictiva. Se puede observar que prácticamente no existe diferencia alguna en los valores límite que se le exigen a los distintos tipos de áridos reciclados.

De la Tabla 73 a la Tabla 75 se recogen los resultados de los requisitos químicos obtenidos de la revisión de los trabajos de investigación consultados, cuyo cumplimiento resulta ser de lo más limitante para establecer los posibles usos del árido reciclado, especialmente en lo que concierne al alto contenido en compuestos de azufre.

4.6.4.1. Compuestos de azufre

Los compuestos de azufre se consideran perjudiciales para el hormigón porque pueden provocar reacciones expansivas con el cemento, afectando decisivamente a la durabilidad del hormigón. La presencia de estos compuestos en el árido reciclado, en cantidades lo suficientemente peligrosas, es un hecho altamente demostrado, debido fundamentalmente a la contaminación que presentan los áridos reciclados por el yeso que se utiliza en construcción. En este sentido, el trabajo experimental llevado a cabo por IHOBE (IHOBE 2011) pone de manifiesto que la alta solubilidad de los sulfatos de los RA está confirmada por el estudio termogravimétrico, que detecta la presencia de yeso, ettringita y portlandita en el árido reciclado. Así mismo, muestra que existe una alta correlación entre el contenido en yeso granular y el contenido en sulfatos, sea cual sea su presentación, y en menor medida con el contenido en material cerámico, aunque la guía WRAP (WRAP 2007) lo contradiga.

Según se observa de la Tabla 71, prácticamente todas las normas y guías de recomendaciones consultadas limitan los compuestos azufre, siendo los que más se prescriben los sulfatos solubles en ácido. Por el contrario, son pocos los estudios que recogen datos sobre el contenido en estos compuestos, quizás porque se conoce previamente que en la mayoría de las ocasiones no se alcanza su cumplimiento. En los estudios llevados a cabo por Jiménez et al. (Jiménez, Agrela et al. 2011) se recomienda tamizar los residuos de construcción y demolición de procedencia mixta antes de su trituración, de manera que se reduzca el contenido en compuestos de azufre. Sin embargo, concluyen que en el caso de los residuos procedentes de hormigón, el precibado previo no tiene ningún efecto en la calidad de los áridos reciclados resultantes.

Según se observa en la Tabla 71, los valores máximos permitidos en cuanto a sulfatos solubles en agua que presenten los áridos reciclados en todas las normas consultadas, no deben alcanzar el 1% del peso del árido, salvo la norma portuguesa que, muy restrictivamente, los limita al 0.2% máximo en el caso de los RCA y MRA. Es más, cuando la norma no incluya limitación a este parámetro en ambos tipos de áridos, el productor debe declarar la categoría asignada al árido en función de su contenido en sulfatos solubles en agua, cuando se presenten, a

resultas del ensayo correspondiente, en el rango entre 0.2% y 1.3% (prEN 12620 2013, Ministero delle Infrastrutture 2008).

Por su parte, los áridos reciclados no deben manifestar un contenido en sulfatos solubles en ácido superior a 0.8% o 1%, estando igualmente obligados los productores a declarar la categoría asignada cuando se presenten entre 0.2% y 1% en el árido reciclado de hormigón (prEN 12620 2013, Ministero delle Infrastrutture 2008, PTV 406 2003), el cerámico (PTV 406 2003) y el mixto (Ministero delle Infrastrutture 2008, PTV 406 2003).

Finalmente, los compuestos totales de azufre en los áridos reciclados para hormigón, independientemente del tipo y de la procedencia del árido, se limitan unánimemente a un máximo del 1%. Estando obligados nuevamente a declarar la categoría asignada en el rango entre 1% y 2%.

En las diferentes formas en las que se muestran los compuestos de azufre en los áridos reciclados estudiados (ver Tabla 73 a Tabla 75), se pone de manifiesto que su presencia es variable, encontrándose valores para los compuestos totales que oscilan entre 0.003% (Tam, Le 2007) y 6.0% (Jiménez, Agrela et al. 2011) en el MRA. Para los sulfatos solubles en ácido los valores se mueven entre 0.00% (WRAP 2007) y 6.98% (Mas, Cladera et al. 2011), mientras que los solubles en agua van desde 0.00% (Calvo Pérez, Parra y Alfaro et al. 2002) a 3.93% (Barbudo, Agrela et al. 2012). Los valores más altos corresponden con los áridos reciclados más finos (Soutsos, Tang et al. 2011) y los que más en contacto han estado con el yeso en las obras de construcción, que se caracterizan por su alta solubilidad en medios alcalinos (IHOBE 2011).

En consecuencia, los compuestos de azufre con valores que exceden ampliamente los límites establecidos, son uno de los puntos débiles en el árido reciclado estudiado debido a la contaminación de los residuos de construcción y demolición, por la presencia de los productos a base de yeso (Tam, Wang et al. 2008). Si bien con el fomento de la demolición selectiva y la limpieza manual previa a la trituración de los residuos de construcción y demolición, se eliminaría gran parte de estos productos, mejorando considerablemente la calidad de los materiales granulares reciclados (Collins 2003, Corinaldesi, Giuggiolini et al. 2002, Tam, Le 2007). En todo caso, el lavado del árido reciclado puede resultar interesante para eliminar parte de los productos a base de yeso (Fueyo Casado 2012, Sánchez de Juan, Alaejos Gutiérrez 2005, Sri Ravindrarajah, Tam 1987). No obstante, se suele aconsejar el empleo de cementos resistentes a los mismos, si se quiere conseguir un hormigón, no sólo resistente mecánicamente, sino durable.

4.6.4.2. Cloruros

Los cloruros contenidos en el árido, en presencia de humedad, pueden llegar hasta la armadura del hormigón y participar en los procesos de corrosión. Es por lo que la mayoría de las normas y recomendaciones fijan un límite muy restrictivo para los cloruros solubles en ácido al árido reciclado para hormigón (CUR 1984, CUR 1986, CUR 1994, DIN 4226-100 2002, OT 70085 2000, WBTC 12/2002

2002) salvo la china (Shanghai Construction Standard Society (SCSS) 2007). Los cloruros solubles en agua son prescritos exclusivamente por la EHE-08 y la SIA 2030. Sin embargo, la EHE-08 en su anejo 15 recomienda realizar el ensayo de cloruros totales al árido reciclado, ya que puede haber ciertos cloruros combinados que en determinadas circunstancias puedan ser reactivos y ataquen a las armaduras. En el árido reciclado mixto (MRA) y en el cerámico (RMA) el contenido en cloruros solubles en ácido tiene prácticamente las mismas limitaciones (CUR 1984, CUR 1986, CUR 1994, DIN 4226-100 2002, PTV 406 2003), siendo más permisivas para el MRA las normas alemanas (DIN 4226-100 2002) y brasileñas (NBR 15116 2005).

De acuerdo con la Tabla 71, el máximo contenido en cloruros solubles en agua en el RCA oscila entre 0.04% (JIS A 5021 2005) y 0.05% (EHE-08 2008, WBTC 12/2002 2002). Aunque hay que destacar que en la Instrucción EHE-08 el límite establecido para los cloruros, dependiendo de si el hormigón es en masa, armado o pretensado, se establece en 0.15%, 0.05% o 0.03% respectivamente. En contraste con la norma brasileña que establece un límite bastante permisivo, del 1% máximo, en el caso del árido reciclado que se emplee en la elaboración de hormigón para uso no estructural.

En referencia a los cloruros solubles en ácido, para todos los áridos reciclados, las diferentes regulaciones establecen un valor límite entre 0.03% y 0.06%, destacando la norma DG/TJ07/008 que, muy permisivamente, recomienda un valor para este parámetro que no supere el 0.25% del peso del árido. Además, para el árido reciclado mixto se recomienda que no exceda de 0.15% (DIN 4226-100, 2002) y 1% (NBR 15116, 2005). Aunque no está recogido en la norma europea, la portuguesa recomienda que se declare la categoría asignada a los áridos reciclados de hormigón y mixtos.

Por último, en cuanto a los cloruros totales, la EHE-08 los limita en la misma cuantía que los cloruros solubles en agua, mientras la SIA 2030 es mucho más restrictiva en el caso de hormigón en masa y armado, con un 0.12% y 0.03% máximo respectivamente, coincidiendo este último con el límite establecido por la EHE-08 para el hormigón pretensado.

De los estudios consultados (ver Tabla 73 a Tabla 75), se puede concluir que el contenido en cloruros solubles en ácido de los áridos reciclados oscila entre 0.00% y 0.08% en los áridos reciclados todo uno de hormigón y mixtos (WRAP 2007), mientras que los cloruros solubles en agua alcanzarían valores entre 0.00% (WRAP 2007) y 0.13% para el árido grueso reciclado mixto (Mas, Cladera et al. 2011) y, por último, los cloruros totales llegarían a encontrarse entre 0.00% y 0.17% en el árido fino cerámico (Müller 2004).

En conclusión, aunque algunos de los valores obtenidos de los estudios consultados presenten cantidades ligeramente superiores a los límites establecidos para los cloruros en cantidades inferiores a las limitadas, se puede dar lugar a la corrosión de las armaduras embebidas en el hormigón, lo cual tendría un impacto extremadamente negativo en la durabilidad del hormigón

(Tam, Wang et al. 2008), y por tanto resulta crucial controlar la presencia de estos componentes en el árido para hormigón. No obstante, la aparición de cloruros en el árido reciclado, a diferencia de los sulfatos, no está vinculada al tipo de árido sino a factores como el uso de ciertos aditivos, la exposición a ambientes marinos o a hormigones expuestos a heladas con sales fundentes (Debied, Courad et al. 2010, Sánchez de Juan, Alaejos Gutiérrez 2006), por lo que algunos autores consideran que un adecuado proceso de inmersión en agua del árido reciclado contribuiría también a bajar el nivel de cloruros presentes (Sánchez de Juan, Alaejos Gutiérrez 2005, Sri Ravindrarajah, Tam 1987), mejorando considerablemente la calidad del árido reciclado (Debieb, Courard et al. 2009).

4.6.4.3. Sustancias peligrosas

Los terrones de arcilla, las partículas blandas y las partículas ligeras son considerados sustancias perjudiciales que pueden contener algunos áridos, cuya presencia puede alterar el fraguado del hormigón, afectando decisivamente en su resistencia y durabilidad. Son prescripciones sólo contempladas por los estudios sobre árido reciclado llevados a cabo por investigadores españoles (ver Tabla 73 a Tabla 75), ya que eran prescripciones que se encontraban tradicionalmente regulados hasta la anterior norma española sobre hormigón EHE (EHE 1998).

Los terrones de arcilla se encuentran limitados en el árido reciclado de hormigón al 0.2% (KS F 2573 2011), 0.6% (EHE-08 2008) y 2% (NBR 15116 2005), mientras que el árido reciclado mixto en la norma brasileña presentaría el mismo valor límite. En los estudios consultados, los terrones de arcilla presentan valores en el árido grueso mixto de entre el 0.00% (González-Fonteboa, Martínez-Abella 2005) y 0.22% (Mas, Cladera et al. 2011), por lo que este parámetro presenta un grado de cumplimiento prácticamente total, incluso para la normativa más restrictiva.

Las partículas ligeras, limitadas al árido reciclado procedente de hormigón (CUR 1984, CUR 1986, CUR 1994, EHE-08 2008, LNEC E 471 2009, NB 26 2003, PTV 406 2003, RILEM, Technical Committee TC 121 1994, WBTC 12/2002 2002), al cerámico (BS 8500-2:2006 2006, PTV 406 2003, RILEM, Technical Committee TC 121 1994) y al mixto (LNEC E 471 2009, NB 26 2003, NBR 15116 2005), en valores que oscila desde el 0.1% al 1%, alcanzarían valores en los estudios consultados del 0.00% (Jiménez, Agrela et al. 2011) al 5.85% en el árido grueso mixto (Alaejos, Sánchez de Juan 2004).

Finalmente, las partículas blandas, limitadas sólo al árido grueso en la antigua EHE (EHE 1998) alcanzan, en el único árido estudiado, el 20.36% (González-Fonteboa, Martínez-Abella 2005).

Por lo que, al igual que en el resto de requisitos químicos, se puede concluir que el árido reciclado mejoraría notablemente su calidad si se procede a utilizar técnicas de demolición selectiva y se realiza una selección manual previa a la trituración de los residuos de construcción y demolición (Collins 2003, Corinaldesi, Giuggiolini et al. 2002, Tam, Le 2007).

4.6.4.4. Materia orgánica

La materia orgánica presente en el árido puede producir retardos en el fraguado del cemento llegando incluso a paralizarlo, en consecuencia muchas de las normas y guías de recomendaciones la limitan en el árido reciclado procedente de hormigón (CUR 1984, CUR 1986, CUR 1994, NBR 15116 2005, PTV 406 2003), en el cerámico (CUR 1984, CUR 1986, CUR 1994, RILEM, Technical Committe TC 121 1994) y en el mixto (LNEC E 471 2009, NBR 15116 2005, Sagoe-Crentsil, Brown 1998). Según la Tabla 71, su contenido oscila entre el 0.1% y 2% para todos los tipos de áridos reciclados.

Con los escasos resultados cuantitativos que se disponen (ver Tabla 73 a Tabla 75), que arrojan resultados entre 0.15 y 0.95% (Barbudo, Agrela et al. 2012), aunque resultarían admisibles en la mayoría de los casos, no se podría establecer la idoneidad de los áridos reciclados en base a este parámetro. En otros estudios (Martín-Morales, Zamorano et al. 2011) se establece cualitativamente la conformidad del árido reciclado estudiado en base a la comparación de color respecto de una sustancia patrón (UNE-EN 1744-1 1999).

No obstante lo anterior, se propone mejorar la calidad del árido reciclado en base a este parámetro actuando en el sentido que se viene exponiendo en este capítulo, en cuanto a los procedimientos de demolición selectiva y limpieza manual previa a la trituración (Collins 2003, Corinaldesi, Giuggiolini et al. 2002, Tam, Le 2007).

4.6.5. Requisitos granulométricos de los áridos reciclados

El cumplimiento de las exigencias granulométricas de los áridos reciclados en cuanto a tamaño, forma y distribución granulométrica, son esenciales para que éstos presenten la calidad necesaria para ser utilizados en la elaboración de hormigón.

La Tabla 76 muestra los requisitos geométricos de las normas y guías de recomendaciones de acuerdo con el tipo de árido reciclado. Como se puede observar, los límites más frecuentemente especificados son los relativos al contenido en finos e índice de lajas. En contraste, el tamaño máximo del árido y el porcentaje de partículas trituradas apenas está limitado. Finalmente, son varias las regulaciones que no incluyen ningún tipo de estos requerimientos al árido reciclado (Collins 1998, CUR 1984, CUR 1986, CUR 1994, NB 26 2003, OT 70085 2000, SIA bulletin MB 2030 2010).

En la Tabla 77 se presentan los valores entre los cuales se encuentran cada prescripción química según la norma o guía de recomendaciones más o menos restrictiva.

De la Tabla 78 a la Tabla 82 se recogen los resultados de los requisitos granulométricos que presentan los áridos reciclados objeto de estudio de los documentos consultados, agrupados por tipo y tamaño de árido.

Tabla 76. Requisitos geométricos de los áridos reciclados en las normas y guías de recomendaciones

	NORMA/GUÍA	TAMAÑO MÁX.(mm)	ARENA (%)	COEF.DE FORMA (%)	ÍNDICE DE LAJAS (%)	PART. TRITUR.(%)	EQUIVALENTE DE ARENA	FINOS (%)	CONCHAS (%)
Alemania	DIN 4226-100							●■+	
Australia	CSIRO			●+		●+			
Bélgica	PTV-406				●■+			●■	●■+
Brasil	NBR 15116							●+	
China	DG/TJ07/008		●		●	●			
Corea	KS F2573	●						●	
España	EHE-08		●		●		●	●	
Europa	prEN 12620			●	●		●	●	
Holanda	NEN 5905								●
Hong Kong	WBTC 12		●		●			●	
Italia	NTC		+	●+	●+		●	●+	
Japón	JIS A 5021/2/3							●	
Noruega	NB 26								
Portugal	LNEC E 471		+		●			●+	+
Reino Unido	BS 8500-2	●■						●■	
	RILEM		●■					●■	

● RCA; ■ RMA; + MRA

Fuente: Elaboración propia

Tabla 77. Límites de los requisitos químicos del árido reciclado de acuerdo con las normas y guías de recomendaciones

PRESCRIPCIÓN	TIPO DE ÁRIDO	LÍMITES	NORMA/GUÍA MÁS RESTRICTIVA	NORMA/GUÍA MENOS RESTRICTIVA
Tamaño máximo (mm)	RCA	≤ 20-25mm	BS 8500-2	KS F 2573
	RMA	≤ 20	BS 8500-2	
Arena reciclada (< 4mm) (%)	RCA	≤ 5%	DG/TJ07/008 Type I; EHE 08; WBTC 12; RILEM Type II	
	RMA	≤ 5%	RILEM Type II	
Coeficiente de forma (%)	RCA	≤ 35%	CSIRO	
	MRA	≤ 35%	CSIRO	
Índice de lajas (%)	RCA	≤ 15-50%	DG/TJ07/008	LNEC E 471
	MRA	≤ 50%	LNEC E 471	
Partículas trituradas (%)	RCA	≤ 30%	CSIRO; DG/TJ07/008 Type I	
	MRA	≤ 30%	CSIRO	
Índice de equivalente de arena	RCA	>70-75	EHE-08	
Finos (< 0.063 mm) (%)	RCA	≤6-16% FA	EHE-08	
		≤1-10% CA	JIS A 5021; KS F 2573	NBR 15116
	RMA	10% FA	DIN 4226-100	
		3-5% CA	RILEM Type I; BS 8500-2	PTV-406
	MRA	≤10-20% FA	DIN 4226-100 Type 2	
		≤3-10% CA	LNEC E 741	NBR 15116 Class A
Contenido en conchas (%)	RCA	<10%	PTV-406; NEN 5905	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 78. Requisitos geométricos de los áridos reciclados todo uno

AUTOR	TIPO DE ÁRIDO	TAMAÑO MÁXIMO (mm)	COEFICIENTE DE FORMA (%)	ÍNDICE DE LAJAS (%)	PARTÍCULAS TRITURADAS (%)	MÓDULO DE FINURA	FINOS (%)
González-Fonteboa and Martínez-Abella, 2008	0/40 MRA	40	0.20-0.23	8-12		9.87-13.25	<0.2
Martín-Morales et al., 2011	0/63 MRA	63					1.17
Tam and Le, 2007	0/10 MRA	10		10.44-28.27			
Tam and Le, 2007	0/20 MRA	20		5.70-29.52			
WRAP, 2007	RCA + ladrillo			10.2-18.2			
Padmini et al., 2009	RCA 10	10			30-32		
Padmini et al., 2009	RCA 20	20			23-26		
WRAP, 2007	RCA-10	10		9.50-18.5			
WRAP, 2007	RCA-35	35		8.50-15.0			
WRAP, 2007	RCA-60	60		5.50-15.0			
WRAP, 2007	Ladrillo			24			

Fuente: Elaboración propia

Tabla 79. Requisitos geométricos de los áridos gruesos reciclados de hormigón y cerámicos

AUTOR	TIPO DE ÁRIDO	TAMAÑO MÁXIMO (mm)	ÍNDICE DE LAJAS (%)	PARTÍCULAS TRITURADAS (%)	MÓDULO DE FINURA	FINOS (%)
Sim and Park, 2011						0.71
Medina et al., 2011	4/12.5 cerámica sanitaria	12.5	23		6.17	0.16
Senthamarai et al., 2011	Cerámica para electricidad 20	20		27		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 80. Requisitos geométricos de los áridos gruesos reciclados mixtos

AUTOR	TIPO DE ÁRIDO	TAMAÑO MÁXIMO (mm)	ARENA (<4mm) (%)	COEFICIENTE DE FORMA (%)	ÍNDICE DE LAJAS (%)	PARTÍCULAS TRITURADAS (%)	MÓDULO DE FINURA	FINOS (%)
Alaejos and Sánchez de Juan, 2004	4/16 MRA	16			8.8-22.5		6.7-7.2	0.28-1.14
Bairagi et al., 1990	4.75/20 MRA	20				26.04	6.57	
Bairagi et al., 1992	4.75/20 MRA	20			12	23	6.59	
Barra de Oliveira and Vazquez, 1996	5/10 MRA	10					6.00	
Barra de Oliveira and Vazquez, 1996	10/20 MRA	20					7.00	
Deshpande and Kulkarni, 2011					14.7-6.2	21.67-29.8		
Gokce et al., 2004						1.73-5.19	6.39-6.67	
Gómez-Soberón, 2002	10/20 MRA	20		0.363	6		7.2	
Gómez-Soberón, 2002	5 /10 MRA	10		0.466	15		6.2	
Gonzalez-Fonteboa and Martínez-Abella, 2005	5/40 MRA	40	0.6-4.7	0.20-0.23	8-12		9.87-13.25	0.1-0.2
Gonzalez-Fonteboa et al., 2011	4/20 MRA	20			7			
Katz, 2003						24.3-25.4		
Marinkoviç et al., 2010	4/8 MRA	8				16.7		0.38
Marinkoviç et al., 2010	8/16 MRA	16				23.8		0.29
Marinkoviç et al., 2010	16/31.5 MRA	31.5				29.2		0.36
Martín-Morales et al., 2011	16/63 MRA	63						0.10
Martín-Morales et al., 2011	4/16 MRA	16						0.17
Mas et al., 2011	8/40 MRA	40		0.25-0.27	19-21			
Poon et al., 2002						23.34		
Rahman et al., 2009					19.40	28.57		
Sánchez de Juan and Alaejos, 2004	4/16 MRA	16			13.3		6.67	0.63

Fuente: Elaboración propia

Tabla 81. Requisitos geométricos de los áridos finos reciclados mixtos

AUTOR	TIPO DE ÁRIDO	TAMAÑO MÁXIMO (mm)	COEFICIENTE DE FORMA (%)	ÍNDICE DE LAJAS (%)	MÓDULO DE FINURA	FINOS (%)	ÍNDICE DE EQUIVALENTE DE ARENA
Barra de Oliveira and Vazquez, 1996	0/5	5			3.13		
Calvo Pérez et al., 2002	0/4	4		8.57			
Calvo Pérez et al., 2002	0/2	2		4.11			
Chen et al., 2003					2.68-2.61		
Corinaldesi and Moriconi, 2009						0.5	
Deshpande and Kulkarni, 2011					3.983	3.60	
Evangelista and de Brito, 2007 and 2010					2.38		
Gómez-Soberón, 2002	0/5	5			3.8		93.6
González-Fonteboa and Martínez-Abella, 2005	0/5	5			5.81	8.8	64.75
Kou and Poon, 2009					2.38		
Martín-Morales et al., 2011	0/4	4				4.1	69.33
Mas et al., 2011	0/8	8	0.07-0.19	7-11			
Zega and di Maio, 2011					3.15	4.0	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 82. Requisitos geométricos de los áridos finos reciclados de hormigón y cerámicos y de los finos reciclados

AUTOR	TIPO DE ÁRIDO	MÓDULO DE FINURA	FINOS (%)	ÍNDICE DE EQUIVALENTE DE ARENA
Miranda and Selmo, 2006	RCA	1.78	33	
Sim and Park, 2011	RCA		1.5	
Debieb and Kenai, 2008	RMA	3.91		84.02
Miranda and Selmo, 2006	RMA	1.27	46	
Miranda and Selmo, 2006	finos	0.74	34	

Fuente: Elaboración propia

4.6.5.1. Tamaño del árido

El tamaño del árido debe ser el mayor posible ya que a mayor tamaño de grano más resistencia mecánica va a presentar, contribuyendo decisivamente en la resistencia mecánica del hormigón. De la normativa consultada, como se puede comprobar en la Tabla 77, tan sólo la coreana (KS F 2573 2011) y la británica (BS 8500-2:2006 2006) imponen limitación al tamaño máximo del árido reciclado de hormigón, así como para el cerámico (BS 8500-2:2006 2006). No recomendando en ambos casos para la elaboración de hormigón tamaños de árido superiores a 20-25mm. En todo caso, la elección del tamaño máximo está condicionada por el efecto tamiz que puede producir la armadura y los encofrados, factor a tener en cuenta a la hora de solicitar al proveedor el tamaño máximo adecuado.

Como se puede observar de la Tabla 78 a la Tabla 82, el tamaño máximo de los áridos todo en uno y grueso reciclado en muchas ocasiones no cumpliría la limitación establecida, no obstante, las plantas de reciclado disponen de las mallas necesarias en los equipos de cribado para la obtención de los tamaños deseados.

4.6.5.2. Contenido en arena

El contenido en arena reciclada se limita por su alta responsabilidad en la elaboración de hormigón, pues provoca la reducción de la resistencia a compresión del hormigón reciclado (Padmini, Ramamurthy et al. 2009, Sim, Park 2011). La mayoría de la normativa no permite el empleo de árido reciclado fino en la elaboración de hormigón. No obstante, según se observa en la Tabla 77, algunas normas y recomendaciones permiten la presencia de arena en el árido reciclado procedente de hormigón (EHE-08 2008, RILEM, Technical Committee TC 121 1994, Shanghai Construction Standard Society (SCSS) 2007, WBTC 12/2002 2002), en el mixto (RILEM, Technical Committee TC 121 1994) y el mixto (LNEC E 471 2009, Ministero delle Infrastrutture 2008). En general, se prescribe un contenido en arena reciclada inferior al 5%.

La utilización de arena natural siempre mejora las propiedades mecánicas del hormigón reciclado (Ajdukiewicz, Kliszczewicz 2002), aunque algunos autores como Corinaldesi y Moriconi (Corinaldesi, Moriconi 2009) o Evangelista y de Brito (Evangelista, de Brito 2007) indican que se puede conseguir un ratio de sustitución de hasta el 30% de arena natural por reciclada sin comprometer las propiedades mecánicas del hormigón estructural. Esta indicación abunda en la exposición de Katz (Katz 2003) que explica el mantenimiento de la resistencia a compresión del hormigón reciclado en base a los altos niveles de cemento que se consigue en la mezcla (hidratado y no hidratado), y que alcanzarían hasta el 25% de su peso; así como en la de Limbachiya y sus colegas (Limbachiya, Meddah et al. 2012) que determinan el aumento de la expansión del hormigón por los sulfatos presentes, en mayor medida, en la fracción arena de los áridos reciclados.

Por el contrario, Becerra-Cabral (Becerra Cabral, Schalch et al. 2010) propone el uso de arena reciclada de procedencia cerámica para incrementar la resistencia del hormigón, debido a su atribuida capacidad puzolánica (Khatib 2005), puesta de manifiesto por la fijación de altos contenidos de portlandita por parte de los finos cerámicos, durante los primeros días de reacción (IHOBE 2011). Además, el material cerámico al ser triturado, produce un árido reciclado más grueso y anguloso que es el deseado para la producción de un buen hormigón (Hansen 1986).

Atendiendo estrictamente a la normativa y recomendaciones no se podría utilizar ninguno de los áridos reciclados clasificados granulométricamente como arena o árido todo uno (Tabla 78 a Tabla 82).

Este parámetro, que condiciona de manera importante la calidad del hormigón reciclado, realmente no se presenta como un problema para las plantas recicladoras, ya que, como se ha comentado anteriormente, con un simple control técnico en la planta se puede obtener la granulometría deseada (Collins 2003, Corinaldesi, Giuggiolini et al. 2002, Tam, Le 2007).

4.6.5.3. Coeficiente de forma

El coeficiente de forma se obtiene mediante el ensayo establecido para medir la forma del árido grueso que indica lo redondeado que puede ser. De las normas y guías de recomendaciones consultadas (Tabla 77), consideran este índice como un parámetro de calidad del árido reciclado la guía australiana CSIRO, el proyecto de norma europea prEN 12620 y la norma italiana NTC, además de la derogada Instrucción de Hormigón Estructural EHE (1998).

Este parámetro debe presentar un valor máximo del 35% tanto para el árido reciclado de hormigón como para el mixto, además de establecerse la obligación de que el productor asigne categoría a los áridos reciclados (DIN 4226-100 2002, prEN 12620 2013, Ministero delle Infrastrutture 2008) cuando el resultado del ensayo esté comprendido entre 15% y 35%.

A pesar de ser una prescripción poco contemplada en la normativa, el coeficiente de forma de los áridos reciclados sí que es considerado por diferentes autores consultados (Tabla 78 a Tabla 82), cuyos estudios arrojan resultados que van desde 0.07% en el árido fino mixto (Mas, Cladera et al. 2011) a 0.47% en el grueso (Gómez-Soberón 2002), cumpliéndose ampliamente lo establecido en la normativa. No obstante, las características geométricas que va a presentar el árido reciclado van a depender del sistema de procesamiento que se desarrolle en la planta (Padmini, Ramamurthy et al. 2009) y fundamentalmente del tipo de trituradora empleada (Marmash, Elliott 2000), lo que dará lugar a áridos normalmente con formas más irregulares y de superficie más rugosa que los naturales, que van a demandar una mayor cantidad de agua para ser mojados antes de ponerlos en contacto con la pasta de cemento.

4.6.5.4. Índice de lajas

El índice de lajas es el ensayo necesario para medir la forma del árido grueso que, al contrario del anterior, se hace contabilizando la cantidad de partículas alargadas y planas que presenta. La normativa y recomendaciones que contemplan este índice, según se observa en la Tabla 77, establecen valores límite muy distintos. En el caso del árido reciclado procedente de hormigón, el porcentaje de partículas trituradas debe presentar valores máximo que van desde el 35% (EHE-08 2008, LNEC E 471 2009) al 40% (WBTC 12/2002 2002), mientras que para el árido mixto se permite hasta el 50% (LNEC E 471 2009). Además, el productor debe declarar la categoría asignada al árido reciclado de acuerdo con este parámetro para el RCA (prEN 12620 2013, Ministero delle Infrastrutture 2008, PTV 406 2003), el RMA (PTV 406 2003) y el MRA (PTV 406 2003, Ministero delle Infrastrutture 2008) cuando el ensayo no sea requerido por la norma y el índice de lajas esté comprendido entre 10% y 50%.

Aunque no hay un número suficiente de datos en los estudios consultados (Tabla 78 a Tabla 82), los áridos reciclados mixtos y cerámicos presentan generalmente un índice de lajas mayor que los obtenidos de residuos de hormigón, siendo mayor cuanto más pequeño es el tamaño del árido (Gómez-Soberón 2002, WRAP 2007). Los valores porcentuales oscilan entre 5.50% del árido reciclado de hormigón (WRAP 2007) al 29.52% del mixto (Tam, Le 2007), por lo que en base a este parámetro, los áridos reciclados estudiados son perfectamente aptos para su uso en la elaboración de hormigón.

No obstante, el índice de lajas no es un parámetro en el que intervenga exclusivamente el tipo de árido reciclado. El método de trituración utilizado tiene un efecto significativo sobre la forma del árido reciclado que se consigue (Padmini, Ramamurthy et al. 2009).

4.6.5.5. Porcentaje de partículas trituradas

Este parámetro, que cuantifica el porcentaje de partículas trituradas, apenas está contemplado en la normativa. Sólo la recomendación australiana CSIRO lo limita

tanto para el árido reciclado procedente de hormigón como para el mixto, estando además limitado por la DG/TJ07/008 para el árido reciclado de hormigón, siendo el valor máximo en ambos casos del 30% (ver Tabla 77).

Por consiguiente, al estar poco limitado en la normativa, también se encuentra poco reflejado en los estudios consultados (Tabla 78 a Tabla 82) y los resultados disponibles arrojan valores tan dispersos como el 1.73% en el árido grueso mixto (Gokce, Nagataki et al. 2004) y el 32% del árido todo en uno de hormigón (Padmini, Ramamurthy et al. 2009), verificándose que cuanto mayor es el tamaño del árido menor es el porcentaje de partículas trituradas.

4.6.5.6. Módulo de finura

El módulo de finura, también llamado módulo granulométrico, se obtiene de calcular el porcentaje retenido y acumulado de material en los tamices 0.125, 0.25, 0.5, 1, 2, 4, 8, 16, 31.5 y 63, dividido entre 100. Este módulo no indica cual es la distribución granulométrica de los áridos, pero da una idea del tamaño que posee el árido según su tamaño máximo (Fernández Cánovas 1989, Jiménez Montoya, García Meseguer et al. 2000), de manera que cuanto más bajo sea este índice, más pequeños resultará el conjunto de los granos del árido.

Tabla 83. Módulos de finura de los áridos reciclados de los estudios consultados

TIPO DE ÁRIDO	TAMAÑO MÁXIMO (mm)	MÍNIMO	MÁXIMO	ÓPTIMO
Todo uno	40	9.87 (González-Fonteboa and Martínez-Abella, 2008)	13.25 (González-Fonteboa and Martínez-Abella, 2008)	6.09
Grueso	20	6.57 (Bairagi et al., 1990)	7.2 (Gómez-Soberón, 2002)	5.14
	16	6.67 (Alaejos and Sánchez de Juan, 2004)	7.2 (Alaejos and Sánchez de Juan, 2004)	4.80
	12.5	6.17 (Medina et al., 2011)	6.17 (Medina et al., 2011)	4.51
	10	6.00 (Barra de Oliveira and Vázquez, 1996)	6.20 (Gómez-Soberón, 2002),	4.22
Fino	5	3.13 ((Barra de Oliveira and Vázquez, 1996)	5.81 (Gonzalez-Fonteboa and Martínez-Abella, 2005)	3.33
	4	1.78 (Miranda and Selmo, 2006)	3.98 (Deshpande and Kulkarni, 2011)	3.01
Finos	0.075	0.74 (Miranda and Selmo, 2006)	0.74 (Miranda and Selmo, 2006)	0.083

Fuente: Elaboración propia

El módulo de finura no está limitado por ninguna normativa. No obstante existe un número bastante representativo de resultados, según se ha podido comprobar de la revisión documental realizada que se recogen en la Tabla 83, en la que se puede comprobar como los áridos todo uno y gruesos presentan tamaños de conjunto muy gruesos, según el módulo óptimo establecido en función de su

tamaño máximo. En cambio, el árido fino y los finos presentan valores similares al módulo de finura óptimo.

No obstante, el módulo granulométrico de los áridos no es un hándicap para su uso. Los diferentes métodos granulométricos de referencia permiten la combinación de distintas fracciones de áridos para corregir su tamaño y distribución granulométrica, de manera que el módulo granulométrico del árido obtenido sea lo más parecido al que se desea.

4.6.5.7. Contenido en finos

El contenido en finos, es decir en partículas de menos de 0.063mm (en algunos casos se consideran finos las partículas inferiores a 0.075mm o a 0.080mm) se limita más en la fracción gruesa del árido que en la fina y no solamente en cuanto a cantidad sino a calidad. Desde el punto de vista granulométrico, un adecuado contenido en finos de buena calidad, es decir de naturaleza no arcillosa, contribuye a mejorar la docilidad y la cohesión del hormigón en estado fresco, y la impermeabilidad y durabilidad en estado endurecido, todo ello sin una mayor necesidad de agua ni de cemento.

Prácticamente todas las normativas y guías de recomendaciones limitan cuál es la cantidad adecuada de finos (ver Tabla 76). En el árido grueso se limita en el intervalo 1% (JIS A 5021 2005, KS F 2573 2011) a 10% (NBR 15116 2005) mientras que en el fino la permisividad es mayor, limitándolos entre 6% (EHE-08 2008) al 20% (NBR 15116 2005).

En los estudios consultados (Tabla 78 a Tabla 82), su contenido oscila entre 0.2% (González-Fonteboá, Martínez-Abella 2005) y el 1.17% (Martín-Morales, Zamorano et al. 2011) para los áridos reciclados todo uno, y entre el 0.1% (González-Fonteboá, Martínez-Abella 2005) y el 1.14% (Alaejos, Sánchez de Juan 2004) para los gruesos. Los resultados más desfavorables, se encuentran en los áridos finos reciclados con porcentajes que oscilan entre el 0.5% (Corinaldesi, Moriconi 2009) y el 46% (Miranda, Selmo 2006).

No obstante, como en la mayoría de las prescripciones granulométricas, la adecuación de ésta a norma no es complicada, basta con un adecuado proceso de producción en planta para eliminar tanto el tipo como la cantidad de partículas no deseadas en el árido reciclado (Collins 2003, Corinaldesi, Giuggiolini et al. 2002, Tam, Le 2007).

4.6.5.8. Índice de equivalente de arena

El índice de equivalente de arena, por su parte, es el parámetro que mide la calidad de los finos contenidos en el árido fino, es decir si son de naturaleza arcillosa o no. Según se observa en la Tabla 76, sólo la normativa española (EHE-08 2008) establece que los áridos para hormigón no deben tener un equivalente de arena inferior a 70 y a 75 en función de la clase de exposición. Además, el

proyecto de norma europea prEN 12620 (prEN 12620 2013) establece nuevamente la asignación de categoría a los áridos reciclados en función de este parámetro cuando en índice de equivalente de arena que presenten tras el ensayo correspondiente esté comprendido entre 30 y 65 (ver Tabla 77).

A resultas de la escasa incidencia en las normas y guías de recomendaciones revisadas, muy pocos son los estudios que lo contemplan (Tabla 78 a Tabla 82). Así para la fracción 0/2mm el árido fino reciclado se presenta un índice de 64.75 (González-Fonteboa, Martínez-Abella 2005) a 93.6 (Gómez-Soberón 2002).

En consecuencia, no se disponen de datos suficientes para aseverar que los finos incluidos en el árido reciclado son perjudiciales para el hormigón. Estos finos estarían compuestos fundamentalmente por los finos desprendidos del mortero adherido y por los finos cerámicos procedentes de la trituración de los escombros de albañilería. En éste caso concreto, a pesar de ser de naturaleza arcillosa, su perjudicial y excesiva capacidad de retención de agua queda neutralizada durante la cocción de la arcilla en la confección de las piezas cerámicas. No obstante, aquellos que se producen por el desprendimiento del mortero adherido, cargados de hidróxido cálcico, presentan una alta solubilidad al entrar en contacto con el agua, tanto más cuanto más fino es el árido (Sri Ravindrarajah, Tam 1987).

5. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1. Introducción

El trabajo experimental llevado a cabo en esta investigación podría diferenciarse en tres fases.

La primera fase comienza con un estudio de caracterización realizado sobre el árido reciclado procedente de obras de construcción y demolición producido en la planta de ECOINERTES S.L., cuya toma de muestras se realizó durante 15 días distintos desde febrero de 2006 a febrero de 2008. Esta caracterización se llevó a cabo conforme a la normativa técnica española referente al árido para su posible aplicación tanto en la elaboración de hormigón, según la Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08(EHE-08 2008), como a su uso en obras de carreteras, según el Pliego General de obras de Carreteras PG-3 (PG-3 1975).

Una vez caracterizado el árido reciclado se emprendió la segunda fase de trabajo en la cual se realizaron las pruebas oportunas sobre distintos morteros para conseguir en laboratorio las prestaciones físicas que desarrollan los prefabricados no estructurales elaborados con árido natural.

La tercera fase de trabajo consistió en la fabricación en la planta de prefabricados de la empresa FORJADOS TRIUNFO de distintas piezas elaboradas con árido reciclado y en el estudio de su viabilidad técnica y económica.

5.2. Caracterización del árido reciclado

5.2.1. Toma de muestras

Las muestras que se procesaron en la fase de caracterización del árido reciclado están compuestas de tres tipos distintos de material: tierras de excavación, escombros triturados y hormigón triturado, conseguidos diferenciadamente por el propio sistema de obtención en la planta a través de dos procedimientos: por separación del material que recogen en planta mediante trómel, por el cual se obtienen las tierras de excavación, y por la posterior trituración del material que no pasa por el trómel, que produce el escombros y el hormigón triturados.

La caracterización del árido reciclado se ha realizado por tanto sobre 15 muestras procedentes de tierras de excavación, 15 muestras obtenidas de la trituración de escombros en general, que incluye una alta proporción de material cerámico, mortero adherido, yesos y otros inertes de obra, y 3 muestras derivadas de la trituración de hormigón recuperado selectivamente, que se incorporaron al proceso de producción de la planta en los últimos momentos del muestreo.

Los áridos reciclados que se van a emplear en esta fase de trabajo podrían ser clasificados según la Orden MAM/304/2002 (Orden MAM/304/2002 2002) como:

- 17 05, las tierras de excavación,
- 17 01 01, los RCD procedentes de hormigón, y
- 17 01 07, los RCD procedentes de escombros.

Según el criterio utilizado en el apartado 4.6.1., en el que se simplificó la nomenclatura empleada en los diferentes estudios consultados para designar a los áridos reciclados, el árido reciclado procedente de la trituración de residuos de construcción y demolición de hormigón se denominaría RCA y el procedente de escombros o mixto MRA.

Tras la obtención en planta de reciclado de la cantidad suficiente de material de las distintas muestras de árido reciclado producidas, se procedió a un primer procesamiento de las mismas en las instalaciones del Laboratorio de Materiales de Construcción del Departamento de Construcciones Arquitectónicas de la Universidad de Granada, obteniéndose las tradicionales fracciones grava y arena del árido reciclado procedente del escombros y hormigón respectivamente. Dichas fracciones resultaron útiles para el ulterior procesamiento de las mismas en función de los diferentes ensayos a realizar. La tierra de excavación no fue separada en fracciones pues, por el método de obtención, presenta un tamaño de granos inferior a 10 mm, que lo hace viable para la obtención de resultados a través de los distintos ensayos.

Este estudio se ha realizado sobre el material reciclado producido en la planta de tratamiento procedente de tierras de excavación, escombros y hormigón triturados que, una vez procesado en laboratorio, han dado lugar a las siguientes fracciones:

- Fracción 001, la fracción grava del escombros triturado,
- Fracción 002, la fracción arena del escombros triturado,
- Fracción 003, la tierra de excavación que ha pasado por el trómel, y
- Fracción 004, las muestras 001 y 002 sin separar.
- Fracción H-001, la fracción grava del hormigón triturado,
- Fracción H-002, la fracción arena del hormigón triturado,
- Fracción H, las muestras H-001 y H-002 sin separar.

Posteriormente hubo que procesar las distintas fracciones según los requerimientos de los distintos métodos de ensayo (Figura 3), surgiendo así las fracciones 005, correspondientes a la reducción de las muestras 004 para obtener una muestra con el tipo de granulometría adecuada para realizar los ensayos de compactación próctor; y la fracción 006, con un tamaño granulométrico necesario para realizar el ensayo de fragmentación de Los Ángeles.

Figura 3. Procesado de las muestras por cuarteo según UNE-EN 932-2



Fuente: Elaboración propia

5.2.2. Descripción de la planta de valorización

El material granular reciclado utilizado en el estudio desarrollado en la presente Memoria de Tesis Doctoral ha sido producido en la planta de tratamiento de residuos de construcción y demolición gestionada por la empresa ECOINERTES S.L., que está ubicada en el municipio de Granada. La planta situada en una superficie de 6000m² tiene una capacidad de producción de 30 a 200tn/h, en función de las características de entrada y salida del material.

La planta de valorización tiene una composición y distribución similar a la de las plantas que producen áridos naturales, pudiéndose considerar clasificada en el nivel tecnológico 2 según el informe Symonds de febrero de 1999 (Symonds Group 1999), ya que cuenta con equipo móvil de trituración, equipo de cribado con sistema de clasificación y separador de metales. A pesar de la capacidad de desplazamiento que tienen los equipos móviles, por su ubicación permanente en un emplazamiento cerrado, se puede considerar como una planta fija, según lo establecido en el II PNRC D 2007-2015 (Ministerio de Medioambiente y Medio Rural y Marino 2008). Al ser una planta ubicada en una zona industrial cuenta con pantallas para atenuar el ruido y dispositivos pulverizadores de agua para minimizar la generación de polvo.

Los RCD generados en las obras de construcción son transportados para su valorización a la planta de tratamiento donde tras un proceso de separación, limpieza, trituración y cribado, son transformados en árido reciclado.

Una vez que el material llega a planta es recepcionado e inspeccionado visualmente en la zona de admisión mediante cámara y pesaje. Posteriormente es descargado en playa (Figura 4), acopiándose por separado los residuos procedentes de albañilería, hormigón y aglomerado asfáltico, respectivamente. Normalmente, en los contenedores suele llegar el residuo contaminado, por lo que, en este momento se realiza una nueva inspección visual al objeto de separar elementos valorizables como papel, plástico, madera, metales e impropios de

diversa naturaleza. Todos ellos serán derivados al correspondiente gestor autorizado.

Figura 4. Descarga en planta y acopio del residuo de construcción y demolición (RCD) y alimentación del trómel



Fuente: Elaboración propia

El proceso de valorización del RCD seleccionado comienza con su carga mediante pala hidráulica en el trómel donde se separa mediante cintas transportadoras, por un lado, el material de menos de 10mm en playa de árido y, por otro, el residuo que posteriormente será procesado (Figura 5).

Figura 5. Separación del material de tamaño inferior a 10mm y salida hacia la cinta de triaje



Fuente: Elaboración propia

Mientras que el material acopiado en playa de árido, compuesto fundamentalmente por tierras de excavación, ha finalizado en este momento su proceso de valorización y, por tanto se encuentra disponible para su utilización, el residuo de mayor tamaño es dirigido, tras su salida del trómel, hacia un proceso de limpieza. Ésta consiste, en primer lugar, en una aspiración del polvo, seguida de una limpieza manual en la cinta de triaje ubicada en altura, para separar plásticos, madera, yeso y metales no férricos, que se irán depositando en los contenedores inferiores (Figura 6), para finalizar con una separación mecánica, con la atracción del material férrico mediante un potente electroimán, denominado overband, situado al final del recorrido de la misma (Figura 7).

Figura 6. Aspiración de polvo y limpieza manual en cinta de triaje



Fuente: Elaboración propia

A continuación, el material es dirigido mediante cinta transportadora a la trituradora de mandíbulas donde, en función del ajuste de tamaños de entrada y salida, se produce un árido reciclado del tamaño de salida requerido. A la salida de la trituradora un nuevo electroimán separa el material férreo residual que se haya podido desprender, y una criba separa el material granular por tamaños requeridos con un simple cambio de paños de cribado (Figura 7).

Figura 7. Separación de material férreo antes de la trituración y trituración, cribado y limpieza de metales férricos a la salida de la trituradora



Fuente: Elaboración propia

Finalmente, los áridos reciclados producidos son acopiado, en función de su granulometría, en los correspondientes trojes cubiertos para evitar su contaminación. En la

Figura 8 se observa la diferencia entre el material que entra en la planta (centro), la tierra vegetal separada por el trómel (izquierda) y el árido reciclado que se produce tras el proceso de valorización (derecha).

Figura 8. Residuos de construcción y demolición y áridos reciclados producidos en planta



Fuente: Elaboración propia

5.2.3. Ensayos realizados al árido reciclado en la fase primera de caracterización

Los ensayos realizados a las distintas muestras son los recogidos en la Tabla 84. Estos ensayos se escogieron por ser los más representativos en cuanto a la caracterización de las propiedades geométricas, físico-mecánicas y químicas exigidas a los áridos tanto para su aplicación en la elaboración de hormigón estructural como en obras de carreteras.

5.2.3.1. Determinación de la granulometría de las partículas. Método de Tamizado

La granulometría del árido, su forma y tamaño afectarán considerablemente a las propiedades del hormigón tanto en estado fresco (consistencia, docilidad, homogeneidad y densidad del hormigón) como endurecido (densidad, compacidad, permeabilidad y resistencia al desgaste) (Fernández Cánovas 1989, García Meseguer 2001, Jiménez Montoya, García Meseguer et al. 2000); así como en la capacidad del mismo para conformar un suelo o para ser utilizado en obras de carreteras (porosidad, permeabilidad, resistencia mecánica, deformación, compactación) (Delibes Liniers 1993).

La distribución granulométrica del conjunto del árido tiene una importancia decisiva en las características del hormigón. Su estudio se realiza mediante el análisis de la curva granulométrica determinada cribando el árido según determinan el conjunto de normas UNE-EN 932 y UNE-EN 933 (UNE EN 932-1 1997, UNE EN 932-2 1999, UNE EN 933-1 1998, UNE-EN 933-1 1998, UNE-EN 933-1:1998/A1 2006, UNE EN 933-3 1997) a través de una serie normalizada de tamices establecidos en la UNE-EN 7050 (UNE 7050-2 1997) cuyas aberturas se encuentran en progresión geométrica de razón dos (Figura 9).

Tabla 84. Ensayos realizados conforme a su correspondiente normativa.

PROPIEDADES GEOMÉTRICAS	
ENSAYO	NORMA DE ENSAYO
Determinación de la granulometría de las partículas. Método de Tamizado	UNE-EN 933-1:1998 UNE-EN 933-1:1998/A1:2006 UNE-EN 933-2:1996 UNE-EN 933-2/1M:1999
Evaluación de los finos. Ensayo del equivalente de arena	UNE-EN 933-8:2000
PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS	
ENSAYO	NORMA DE ENSAYO
Resistencia a la fragmentación. Ensayo de Los Ángeles	UNE-EN 1097-2:1999 UNE-EN 1097-2:1999/A1:2007
Determinación del límite líquido de un suelo. Método del aparato de Casagrande	UNE-103103:1994
Determinación del límite plástico de un suelo	UNE-103104:1993
Ensayo de compactación. Próctor normal	UNE-103500:1994
Ensayo de compactación. Próctor modificado	UNE-103501:1994
PROPIEDADES QUÍMICAS	
ENSAYO	NORMA DE ENSAYO
Contenido de materia orgánica	UNE-EN 1744-1:1999
Determinación de los sulfatos solubles en agua	UNE-EN 1744-1:1999

Fuente: Elaboración propia

La curva granulométrica traduce la distribución ponderada de los áridos elementales que componen un árido determinado d/D , siendo d , el tamaño mínimo y D , el máximo del árido considerado. Si se admite que la densidad de los granos que constituyen el árido analizado es siempre igual, a pesar del tamaño de los granos, la distribución volumétrica es igual que la distribución ponderada.

Según Jiménez Montoya (Jiménez Montoya, García Meseguer et al. 2000) los parámetros que determinan las características granulométricas de un árido para confeccionar hormigón son fundamentalmente: el tamaño máximo del árido, la compacidad y el contenido en granos finos. De manera que:

- Cuanto mayor sea el tamaño máximo, menor serán las cantidades de cemento y agua en el hormigón, resultando más económico para la misma resistencia.

Figura 9. Procedimiento de tamizado según normas UNE-EN 932 y UNE-EN 933



Fuente: Elaboración propia

- La compacidad del árido, entendida como la relación entre su volumen real y aparente, aumenta con el coeficiente de forma de la grava, mientras que la arena la disminuye. Cuanto mayor sea la compacidad del árido menor es el volumen de huecos que queda entre sus granos y por tanto menor será la pasta de cemento necesaria para rellenarlos. Las granulometrías de compacidad elevada por tanto se consiguen con mezclas relativamente pobres en arena y gran proporción de granos gruesos, por lo que requieren poca cantidad de agua de amasado, dando lugar a masas poco trabajables que se disgregan con facilidad, pero si se disponen de buenos medios de puesta en obra dan hormigones muy resistentes, de mucha durabilidad y poca retracción.
- Para que un hormigón sea dócil, trabajable y no se disgregue durante su transporte, puesta en obra y compactación, la granulometría debe aportar un contenido óptimo en granos finos. Al aumentar el contenido en granos finos disminuye la compacidad del árido y será necesario aumentar las cantidades de cemento y agua de amasado.

En todo caso una granulometría adecuada tendrá que solucionarse adoptando un criterio que satisfaga ambos aspectos, parcialmente contradictorios: la compacidad del árido y el contenido óptimo en finos.

De manera general no se puede establecer una curva granulométrica óptima. Existen varios métodos granulométricos tradicionalmente empleados para obtener curvas adecuadas a cada campo de aplicación. Unos se refieren a granulometrías continuas, en las que se encuentran representados todos los tamaños de los granos, y otros a granulometrías discontinuas, en los que faltan algunos de los tamaños intermedios. Las granulometrías continuas son las conducentes a la obtención de hormigones dóciles, y las discontinuas, con un máximo de elemento gruesos y un mínimo de arena, a hormigones menos dóciles pero con mayores resistencias a compresión, más durables y con menor retracción (Fernández Cánovas 1989, Dreux 1981).

En todo caso, las curvas granulométricas de las fracciones a estudiar pueden considerarse ajustadas a las curvas teóricas de referencia de los distintos autores, de forma que no es necesario que coincidan exactamente las proporciones del árido para cada tamiz con los correspondientes a las curvas teóricas de referencia, sino que basta con que las áreas existentes entre la curva hallada y la teórica de referencia, situadas por encima y por debajo de ésta, coincidan, lo que indica de que ambas tienen el mismo módulo granulométrico.

En la elaboración del hormigón el árido debe tener una distribución granulométrica con una cantidad variada de tamaños tal que den lugar al menor número posible de huecos entre ellos, con lo cual la necesidad de pasta de cemento será menor, impidiendo que se filtre entre los huecos cuando se realice la compactación. Además, se necesita de una cantidad adecuada de finos, tanto mayor cuanto menos dosificación de cemento se emplee. Por tanto, la distribución del tamaño de las partículas del árido utilizado para la fabricación de hormigón es importante ya que afecta a su trabajabilidad (Tam, Tam 2008, Etxeberria, Vázquez et al. 2007).

Complementariamente, el conjunto total de árido en el hormigón debe representar una cantidad lo más elevada posible, ya que económicamente es más barato que la pasta de cemento y, técnicamente, le proporciona menos retracción y fluencia. Desde el punto de vista de la resistencia, ésta aumentará con el volumen relativo que ocupen los áridos, por lo que cuanto mayor sea el tamaño máximo, mayor resistencia mecánica (Jiménez Montoya, García Meseguer et al. 2000).

En el comportamiento de un suelo intervienen, según Jiménez Salas (Jiménez Salas, de Justo Alpañés 1975), además de la distribución granulométrica, la compacidad, la composición mineralógica, el tamaño de los granos y su forma, siendo la granulometría la propiedad más característica del mismo. Esto sucede hasta el punto de que todas las clasificaciones de suelos determinan las distintas tipologías en base al tamaño de las partículas.

El estudio de las curvas granulométricas de un suelo, contemplado dentro de los llamados ensayos básicos de identificación, pone de manifiesto el comportamiento del mismo, de manera que los suelos que presenten distribuciones granulométricas similares tendrán análogo comportamiento, salvo en los que predomina la fracción fina, en los que las propiedades del suelo las dictamina su estudio mineralógico. En los suelos de grano grueso la forma y redondeamiento de las partículas determinan su capacidad filtrante.

Desde el punto de vista granulométrico los suelos se distinguen por la cantidad de granos que presenta cada tamaño, influyendo de manera decisiva en la porosidad, permeabilidad y resistencia a esfuerzos cortantes que va a presentar dicho suelo (Kraemer, Pardillo et al. 2009).

5.2.3.2. Evaluación de los finos. Ensayo del equivalente de arena

El ensayo de equivalente de arena, determinado según la norma UNE-EN 933-8 (UNE-EN 933-8 2000), indica la calidad de los finos de los áridos. El resultado de este ensayo, que se determina sobre la fracción 0/4, debe ser inferior a 70 para la obras sometidas a la clase general de exposición I, IIa o IIb y que no estén sometidas a ninguna clase específica de exposición, o a 75 en el resto de los casos (EHE-08 2008) (Figura 10).

Figura 10. Ensayo de equivalente de arena según la norma UNE-EN 933-8



Fuente: Elaboración propia

La Instrucción EHE-08, en cuanto a la granulometría del árido, incide especialmente en la calidad de los finos que lo conforman, pues contribuyen de manera decisiva en la calidad del árido. Por ello, la naturaleza de los finos debe ser tal que no demande mucho agua, y por tanto se incrementa la necesidad de cemento, con el consiguiente aumento de la retracción, manteniendo la cohesión y compacidad del hormigón en estado fresco, y mejorando la impermeabilidad del mismo en estado endurecido, lo que contribuirá a una mejora de su durabilidad. Son por tanto los finos de naturaleza no arcillosa, en cantidades adecuadas, los beneficiosos a la hora de confeccionar un hormigón. Éstos, si superan las limitaciones impuestas, al rodear la grava ocupando el lugar del cemento, impedirán la adherencia de la pasta de cemento con el árido grueso. Un contenido óptimo en finos no arcillosos garantiza que el hormigón en estado fresco sea dócil y trabajable y no se disgregue durante el transporte, puesta en obra y compactación (Jiménez Montoya, García Meseguer et al. 2000).

En cuanto al uso del árido para obras de carreteras, un aspecto fundamental para el buen comportamiento de los áridos en cualquier capa de firme, es su limpieza, ya que se pretende garantizar que en presencia de agua, la capa de la que forman parte conserve sus características resistentes y que no haya problemas de adhesividad con los ligantes hidrocarbonatos en su caso. Por ello, el ensayo que se utiliza en muchos países para caracterizar el árido fino (partículas inferiores a 2 mm en el caso de obras de carreteras), que está comprendido dentro del grupo de los ensayos complementarios de identificación de suelos, es el equivalente de arena. Un valor inferior a 20 corresponde a áridos muy contaminados que, en general, no deben utilizarse en capas de firme, mientras que valores superiores a 50 reflejan un grado de limpieza suficiente para la mayor parte de las aplicaciones. Por lo que, el ensayo de equivalente de arena, puede incluso sustituir al clásico ensayo de plasticidad (Kraemer, Pardillo et al. 2009), ya que es capaz de distinguir el comportamiento de los suelos que presentan baja plasticidad.

5.2.3.3. Resistencia a la fragmentación. Ensayo de Los Ángeles

El ensayo de resistencia a la fragmentación mediante el ensayo de Los Ángeles se determina según las normas UNE-EN 1097-2:1999 y UNE-EN 1097-2:1999/A1:2007 (UNE-EN 1097-2 1999, UNE-EN 1097-2/A1:2007 2007), sobre una fracción de árido procesada en la que el tamaño de sus granos quede comprendido entre 14 y 10mm (Figura 11 y Figura 12). En las muestras estudiadas, a esta fracción se le ha denominado H-006, en el caso de hormigón reciclado, y 006, en el caso de escombros reciclados.

La Instrucción EHE-08 (EHE-08 2008) establece como requisito físico-mecánico que el árido grueso presente una resistencia a la fragmentación inferior a 40, ya que a medida que aumenta este coeficiente lo hace la deformación bajo carga del hormigón y puede producirse una bajada de resistencia.

Este parámetro es determinante en el comportamiento mecánico que presenta para su empleo en firmes de carreteras, así como para evaluar la degradación de

dicho comportamiento a lo largo del tiempo. En el caso de las capas granulares, por la ausencia de ligantes o de conglomerados, las partículas del árido llegan a soportar unos importantes esfuerzos puntuales, mayores que en una capa tratada, por lo que es importante que tengan una resistencia mecánica apreciable.

Figura 11. Muestra preparada para el ensayo de Los Ángeles según la norma UNE-EN 1097-2



Fuente: Elaboración propia

Figura 12. Resultado de la muestra de ensayo procesada según la norma UNE-EN 1097-2



Fuente: Elaboración propia

Un índice superior a 40, indica la mala calidad y escasa resistencia al desgaste de un árido, lo que le hace inservible para la construcción de capas de firme, mientras que coeficientes inferiores a 20 corresponden a áridos con una elevada resistencia mecánica, suficiente para cualquier posible aplicación, y en particular, para capas de rodadura bituminosas que hayan de soportar un tráfico pesado de elevada intensidad (PG-3 1975).

5.2.3.4. Determinación de la plasticidad de un suelo

La plasticidad de un suelo, que es un ensayo básico de los correspondientes a la identificación de los suelos, se obtiene mediante los ensayos de determinación del límite líquido (LL) y límite plástico (LP) realizados según las normas UNE 103103 y UNE 103104 respectivamente (UNE 103103 1994, UNE 103104 1993).

La existencia de partículas arcillosas en el suelo, debido al comportamiento de sus componentes minerales, influyen de manera decisiva en las propiedades físicas del mismo, concretamente en la variación de su estado de consistencia en función de la humedad que contenga el suelo, o sea en su plasticidad.

El valor de límite líquido obtenido indica el contenido de humedad que debe contener el suelo para que su consistencia pase del estado plástico al líquido y, por ende, si el suelo contiene la humedad suficiente para superar la fricción y cohesión interna, parámetros que determinan su resistencia portante.

Cuando el suelo pasa de semi-sólido a plástico, porque contiene humedad suficiente, se dice que ha traspasado su límite plástico. La resistencia del suelo disminuye rápidamente al aumentar el contenido de humedad más allá del límite plástico.

El índice de plasticidad (IP), es un parámetro físico obtenido que se relaciona con la facilidad de manejo del suelo, por una parte, y con el contenido y tipo de arcilla presente en el suelo, por otra. Se obtiene de la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico (Figura 13), de manera que si es mayor que 10 el suelo es plástico, y si el suelo presenta un IP menor que 10, indica que no es plástico.

Figura 13. Ensayo de plasticidad según UNE 103103 y UNE 103104



Fuente: Elaboración propia

5.2.3.5. Ensayo de compactación. Próctor normal y próctor modificado

La compactación de un suelo se establece según los ensayos próctor normal y modificado a través de los métodos normalizados recogidos en las normas UNE 103500 y UNE 103501 (UNE 103501 1994, UNE 103500 1994) (Figura 14). Ambos métodos son de igual factura, variando fundamentalmente las dimensiones del molde de ensayo y la energía de compactación, de manera que con el ensayo próctor modificado se obtiene una mayor densificación del suelo en laboratorio con una menor cantidad de agua.

Figura 14. Ensayo próctor modificado según UNE 103501



Fuente: Elaboración propia

Estos métodos de ensayo se engloban dentro de los ensayos de caracterización del comportamiento de los suelos, empleándose para determinar la densidad seca máxima que se alcanza en un suelo con una cantidad de humedad, llamada humedad óptima, y una determinada energía de compactación. El índice que se obtiene se utiliza para evaluar la capacidad de carga de los suelos en tanto que una adecuada compactación proporciona un suelo resistente y poco compresible.

El comportamiento de un suelo frente a la compactación depende del si es de naturaleza granular o cohesivo, obteniéndose una mejora significativa en los suelos de grano fino muy plásticos ensayados por el procedimiento de próctor modificado frente al normal, que no se distingue tanto en los suelos granulares bien graduados (Kraemer, Pardillo et al. 2009).

5.2.3.6. Contenido en materia orgánica

La determinación de la existencia de material orgánica en el árido se realiza mediante el ensayo cualitativo establecido en la norma UNE-EN 1744-1 (UNE-EN 1744-1 1999) que indica si el árido presenta materia orgánica en cantidad suficiente para resultar perjudicial en el hormigón (Figura 15).

El contenido en materia orgánica resulta perjudicial para el fraguado y endurecimiento del hormigón, pues ésta hace que la adherencia disminuya, con las consecuencias correspondientes de baja resistencia y durabilidad, pudiendo

llegar incluso a paralizar irremediablemente las reacciones de fraguado de los cementos.

Figura 15. Ensayo de materia orgánica según UNE-EN 1744-1



Fuente: Elaboración propia

En cuanto al uso para carreteras, el contenido en materia orgánica influye en el comportamiento a largo plazo de un suelo en cuanto a posibles variaciones de volumen y asientos secundarios. Este ensayo se considera complementario a los ensayos realizados para identificar un suelo.

5.2.3.7. Determinación del contenido en sulfatos solubles en ácido

La determinación del contenido en sulfatos solubles en ácido se realiza mediante el ensayo establecido en la norma UNE-EN 1744-1 (UNE-EN 1744-1 1999).

La presencia de sulfatos en el árido pone de manifiesto la inestabilidad potencial del mismo al reaccionar con los componentes del cemento, generando reacciones expansivas.

La determinación de los sulfatos solubles en los suelos pertenece al rango de ensayos básicos de identificación de los mismos, y su determinación está basada fundamentalmente en los problemas de inestabilidad manifiestos comentados anteriormente, además de los condicionados por la posible lixiviación.

En ambos casos, ante la existencia de un contenido elevado en sulfatos, se deberían adoptar las medidas necesarias, tales como el empleo de cemento sulforresistentes.

5.2.4. Ensayos no realizados al árido reciclado en la fase primera de caracterización

Durante la primera fase experimental en la que se realizaron los ensayos de caracterización del material granular obtenido de la planta ECOINERTES para

establecer su idoneidad como árido reciclado en la elaboración de hormigón así como en obras de carreteras, hubo una serie de ensayos granulométricos, físicos, mecánicos y químicos que no se realizaron. De la labor bibliográfica realizada con anterioridad a esta fase de trabajo, se pudo comprobar que la mayoría de los áridos reciclados alcanzaban el cumplimiento normativo, por lo que su estudio sólo venía a confirmar su idoneidad. En otros casos, resulta obvio el grado de incumplimiento, por lo que, ante el elevado número de muestras, el esfuerzo realizado no daría lugar a nuevos hallazgos que modificasen las teorías al respecto de estos materiales reciclados.

A continuación se justifica, según la normativa española, y prescripción por prescripción, por qué no se han considerado en esta fase de trabajo.

5.2.4.1. Ensayos no realizados según la Instrucción EHE-08

Los ensayos físicos no realizados en la primera fase de caracterización han sido la determinación de la densidad y la absorción de agua. El primero no se realizó, ya que a pesar de estar contemplado en la mayoría de la normativa consultada, en el caso de la Instrucción EHE-08 (EHE-08 2008), no se hace mención alguna a la citada prescripción. Además, prácticamente todos los estudios consultados cumplen esta prescripción, para casi todas las normativas, o es fácil que la cumplan con un adecuado tratamiento en planta de reciclaje. Respecto de la absorción, conscientes de que es un parámetro difícil de conseguir su cumplimiento en la mayoría de los casos, no se trató en este momento pero sí en la segunda fase de trabajo donde, por las particularidades de la dosificación empleada, hubo que determinar este coeficiente al objeto de establecer la cantidad de agua de premojado que necesita el árido reciclado.

En cuanto a los ensayos mecánicos correspondientes a los áridos según la normativa española, se encuentra la pérdida de peso, como ensayo acelerado de hielo-deshielo al someter al árido a una disolución de sulfato magnésico. Este ensayo no está prácticamente contrastado en la bibliografía consultada pero, como se ha comentado con anterioridad, resulta de difícil cumplimiento por la alta capacidad de absorción al agua que presenta el árido reciclado.

De los ensayos químicos preceptivos al árido, sólo se practicaron el contenido en sulfatos soluble en ácido, que son los que mayor grado de incumplimiento presentan en el árido reciclado, y la determinación de la presencia de materia orgánica. Respecto del resto de prescripciones químicas es fácil conseguir el grado de cumplimiento en el árido reciclado. Los compuestos de cloro raramente se encuentran presentes en el árido reciclado, salvo que haya estado expuesto a determinados ambientes cargados de cloruros o procedan los áridos de residuos de construcción y demolición en los que se han empleado determinados tipos de aditivos; algo bastante improbable en el tipo de árido reciclado que se recibe en la planta estudiada. Respecto del resto de sustancias peligrosas, aparecen más como contaminantes del árido natural que del reciclado y, en el caso de que apareciesen en éste, la solución pasa por un adecuado tratamiento de limpieza en planta.

En cuanto a la reactividad potencial del árido con los álcalis del cemento, se considera que estos materiales granulares suelen favorecer la reacción al incorporar un mayor contenido en alcalinos que, en presencia de humedad, son susceptibles de reaccionar dando lugar a un compuesto gelatinoso que puede producir expansiones.

Finalmente, los ensayos geométricos no practicados al árido reciclado estudiado en esta fase de la investigación fueron los relativos al coeficiente de forma, índice de lajas y partículas trituradas, así como a la determinación de la presencia de finos a través del ensayo de azul de metileno. Por un lado, respecto de los tres primeros, prácticamente todos los áridos reciclados estudiados en la bibliografía consultada cumplen los requisitos establecidos en la normativa (Fueyo Casado 2003, Sánchez de Juan 2004, Tam, Tam 2008) y en caso contrario, su grado de cumplimiento se puede alcanzar con un adecuado ajuste en el procesamiento en planta. Por otro lado, el ensayo de azul de metileno no tiene lugar en los áridos reciclados ya que, en caso de incumplimiento del ensayo de equivalente de arena, éste no se va a deber a la presencia de finos de naturaleza arcillosa, cuya actividad perjudicial ha quedado neutralizada en el momento de la cocción de la arcilla cerámica.

5.2.4.2. Ensayos no realizados según el Pliego PG-3

Además de algunos de los parámetros justificados anteriormente, en la ejecución de capas granulares y firmes de carreteras, el Pliego PG-3 (PG-3 1975) contempla una serie de ensayos específicos, de los cuales no se han realizado los que se argumentan a continuación.

Entre los ensayos mecánicos no realizados a los materiales granulares reciclados en esta fase de estudio se encuentra la medida de la capacidad portante del soporte a través del índice CBR que, como se ha contrastado en otras investigaciones, es capaz de superar ampliamente el valor límite impuesto (Martín-Morales, Cuenca Moyano et al. 2013).

Otros ensayos físicos como angulosidad, porcentaje de partículas redondeadas e índice de lajas, que aunque no se ha ensayado experimentalmente, su cumplimiento queda corroborado por los resultados de otras investigaciones.

De los ensayos químicos preceptivos de los materiales granulares, según este Pliego, no se han llevado a la práctica la determinación del contenido en yeso y sales solubles, cuyos parámetros, no alcanzan el cumplimiento en prácticamente ninguna ocasión, debido fundamentalmente a la alta presencia de materiales a base de yeso que, durante el proceso de la trituración, contaminan sobremanera al árido reciclado obtenido.

El Pliego contempla la determinación de la calidad del material granular a través de su limpieza al objeto de garantizar la estabilidad de las capas, debiendo estar exentas de terrones de arcilla, margas, materia orgánica o cualquier otra que pueda afectar a su durabilidad. Este objetivo se consigue a través de un

parámetro considerado dentro de las prescripciones químicas, llamado coeficiente de limpieza (CL), y otro parámetro granulométrico, el índice de equivalente de arena (EA). De ellos, el primero no se ha realizado, al entenderse que el árido reciclado al estar exento de materia orgánica y no presentar plasticidad, carece de arcillas perjudiciales que puedan provocar deformaciones en las capas compactadas.

5.3. Fase 2: Elaboración de morteros en laboratorio

La segunda fase del trabajo experimental consistió en el estudio de las dosificaciones óptimas que posteriormente se utilizarían en la tercera fase de trabajo. Partiendo de la dosificación estándar para las piezas prefabricadas no estructurales proporcionada por la empresa de prefabricados PÉREZ LÁZARO, se realizaron varias modificaciones conducentes a adaptarla al tipo de árido reciclado empleado.

En esta fase de trabajo se emplea la palabra mortero en vez de hormigón por dos razones. La primera y fundamental, se debe a la elección del tipo de probeta a fabricar en laboratorio: probetas normalizadas de mortero de 4x4x16mm, según el método establecido en la norma UNE-EN 196-1 (UNE-EN 196-1 2005), que especifica el método de ensayo para la obtención de la resistencia a compresión, y opcionalmente a flexión, de morteros de cemento. En segundo lugar, por el tamaño del árido empleado en la fabricación de las piezas prefabricadas, que aunque alcanza los 8mm, está prácticamente considerado como arena.

Hay que incidir en el hecho de que se va a emplear un árido reciclado que, desde el punto de vista de su composición granulométrica, se encuentra prohibido para cualquier aplicación según la Instrucción EHE-08, tanto en su artículo 28, como en sus anejos 15 y 18. No obstante, hemos considerado la posibilidad de que no sólo el árido grueso reciclado, sino también el fino, entre a formar parte total o parcialmente en hormigones para aplicaciones no estructurales.

Para la elaboración de los morteros, operación que también se ha desarrollado íntegramente en el Laboratorio del Departamento de Construcciones Arquitectónicas de la Universidad de Granada, se utilizaron los siguientes componentes:

- El árido natural con el que se elaboran los prefabricados no estructurales en la fábrica.
- El árido reciclado procedente de hormigón triturado, con el mismo tamaño máximo y granulometría similar al natural.
- El árido reciclado procedente de escombros triturados, igualmente con el mismo tamaño máximo y granulometría similar al natural.
- Un aditivo compuesto con regulador de la viscosidad, que está diseñado para facilitar la puesta en obra del hormigón mediante máquinas extrusionadoras (Frioplasr-P de SIKA), reduciendo el agua de amasado, aumentando la homogeneidad y el curado interno, y facilitando la extrusión.

- Un aditivo de alta capacidad de compactación, que está indicado para hormigones secos y semisecos con bajo contenido en cemento (SikaPaver HC-1 de SIKA), idóneo para fabricar hormigones con máquinas vibrocompactadoras de desmoldeo instantáneo, y que fundamentalmente mejora la compactación y por tanto la densidad del producto acabado.
- Un cemento CEM I 42.5 R proporcionado, así mismo, por la planta de prefabricados.

Al respecto de los materiales componentes de los morteros hay que indicar que el árido procedente de la tierra vegetal reciclada no se ha utilizado en esta segunda fase pues, debido a su procedencia, es el que peores características físicas y químicas presenta para cualquier aplicación con materiales ligantes. Así mismo, los aditivos se emplearon con el fin de intentar mejorar la compacidad y el desmoldeo de las piezas, tanto en laboratorio, como posteriormente durante la elaboración de las piezas prefabricadas en planta, ya que en estos casos de piezas moldeadas se requiere poca cantidad de agua, pues la trabajabilidad no es importante, aunque se tenga que aumentar por el nivel de absorción del material cerámico y el mortero adherido que tiene el árido reciclado utilizado (Poon, Chan 2007).

Tabla 85. Ensayos realizados en la segunda fase de trabajo conforme a su correspondiente normativa.

ENSAYOS REALIZADOS LOS ÁRIDOS	
ENSAYO	NORMA DE ENSAYO
Determinación de la granulometría de las partículas. Método de tamizado	(UNE EN 933-1 1998, UNE-EN 933-1:1998/A1 2006, UNE-EN 933-2 1996, UNE-EN 933-2/1M 1999)
Determinación de la densidad de las partículas	(UNE-EN 1097-6:2001 2001, UNE-EN 1097-6:2001/A1:2006 2006)
Ensayo de absorción de agua	(UNE-EN 1097-6:2001 2001, UNE-EN 1097-6:2001/A1:2006 2006)
Clasificación de los componentes de los áridos gruesos reciclados	(UNE EN 933-11 2009)
ENSAYOS REALIZADOS A LAS PROBETAS	
ENSAYO	NORMA DE ENSAYO
Elaboración de probetas de mortero de cemento	(UNE-EN 196-1 2005)
Determinación de las resistencias mecánicas	(UNE-EN 196-1 2005)
Determinación de la compacidad (Volumen aparente)	(UNE 103108 1996)

Fuente: Elaboración propia

Durante esta fase de trabajo se realizaron distintos tipos de combinaciones entre los áridos, al objeto de conseguir las dosificaciones óptimas conducentes a obtener

los morteros de mayor resistencia mecánica y compacidad, pero manteniendo siempre fija la dosificación propuesta por la planta. En este sentido, se fabricaron probetas de mortero con el árido natural para servir de patrón. Posteriormente se elaboraron probetas de mortero con los áridos reciclados elegidos, procedentes de la trituración de hormigón y escombros respectivamente, a las que posteriormente se incorporaron dos tipos de aditivos. Finalmente, se procedió a la sustitución parcial de árido natural por reciclado en distintas proporciones.

Los ensayos realizados durante esta fase de trabajo están recogidos en la Tabla 85.

5.4. Fase 3: Fabricación de piezas prefabricadas de hormigón

El objetivo principal del proyecto de Tesis Doctoral es la elaboración de diferentes piezas prefabricadas de hormigón para uso no estructural, con la sustitución total o parcial de árido natural por árido reciclado, lo que dará lugar a la producción de una serie de piezas con unas prestaciones técnicas similares a las que poseen las piezas prefabricadas de hormigón tradicional, a lo que se le suman las ventajas medioambientales del reciclaje y la reutilización de un producto, como es el residuo de construcción y demolición (RCD), que inicialmente es considerado como residuo y puede ser tratado adecuadamente para ponerlo en valor en el mercado general de los áridos. Por lo que, en esta tercera y última fase, se procedió a la fabricación de las piezas prefabricadas de hormigón en base a los resultados obtenidos en las fases anteriores.

Previamente hubo de hacerse la selección del tipo de piezas prefabricadas de hormigón no estructural. En principio, se había considerado la fabricación de bloques, bovedillas y bordillos de hormigón, con diferentes porcentajes de sustitución del árido natural por los correspondientes reciclados, e incluso considerando la sustitución exclusivamente de la fracción gruesa, en cumplimiento del anejo 15 de la Instrucción EHE-08 (EHE-08 2008), que prohíbe la incorporación de árido reciclado de tamaño inferior a 4mm.

Llegado el momento de la fabricación en planta, el Grupo PÉREZ LÁZARO, que había proporcionado los materiales y dosificaciones tipo, ante la tremenda situación económica acontecida, se vio obligado a vender todos los equipos, por lo que se tuvo que proceder a buscar una nueva empresa que elaborase las piezas prefabricadas. Tras una serie de rechazos por parte de las empresas geográficamente cercanas, cuya situación económica era similar a la anterior, encontramos a la empresa FORJADOS TRIUNFO que, ubicada también en el término municipal de Padul (Granada), confió en la propuesta de trabajo presentada. No obstante, hay que agradecer el enorme esfuerzo realizado por su parte, que sin apenas personal, han puesto en marcha sus instalaciones para este proyecto.

Esta circunstancia hizo que el alcance inicialmente planteado en esta fase de trabajo haya resultado menos ambicioso de lo que hubiésemos deseado. Tan sólo se han podido fabricar bloques y bovedillas, algo novedoso por otra parte ya que,

como ha quedado contatado en el apartado 4.3.2., prácticamente no se encuentran trabajos de investigación en los que se haya utilizado el árido reciclado en la elaboración de piezas prefabricadas de hormigón con fines no estructurales y, en los escasos documentos disponibles, se han aplicado sobre productos completamente macizos.

Para la ejecución de las piezas en las instalaciones de FORJADOS TRIUNFO se ha seguido utilizando el árido reciclado que produce la planta de ECOINERTES, con las dosificaciones elegidas en la fase anterior, pero utilizando el árido natural y el cemento que se emplea en sus prefabricados convencionales, y el aditivo plastificante-aireante que se utilizó en el laboratorio.

Antes de proceder a la ejecución de las piezas seleccionadas se tuvieron que ajustar las dosificaciones obtenidas en el laboratorio al proceso productivo a escala industrial. Para ello se disminuyó el volumen de hormigón de la amasada convencional de manera que la mezcladora produjese una masa que cumpliera los requisitos de trabajabilidad y homogeneidad necesarios. Por lo que la cantidad de hormigón elaborado en planta se redujo a la mitad de una amasada convencional.

5.4.1. Descripción de la planta de prefabricados

Las piezas prefabricadas, objeto de estudio de la presente Memoria de Tesis Doctoral, han sido elaboradas en la planta de prefabricados FORJADOS TRIUNFO ubicada en el término municipal de Padul (Granada). La planta, instalada en una superficie de 45000 m² está compuesta por dos unidades de producción dedicadas a la elaboración de prefabricados de hormigón estructurales y no estructurales.

El núcleo de la planta de elementos prefabricados de hormigón no estructurales es el equipo vibrocompactador de moldes cambiables, en función del tipo de pieza a fabricar: bloques, bovedillas, bordillos o adoquines, de diferentes dimensiones. Los moldes suelen sustituirse cada 160000 ciclos de trabajo al objeto de que presenten la suficiente resistencia y rigidez que garantice el cumplimiento de las tolerancias dimensionales, así como para resistir sin deformaciones las acciones que se produzcan en el proceso de hormigonado, según lo exigido en el artículo 65 de la EHE-08 (EHE-08 2008).

En la Figura 16 se observan sendas tablas de bloques de 40x20x20cm y bovedillas de 25cm recién fabricados.

En torno a el equipo vibrocompactador gira el resto de la instalación. La alimentación de hormigón se realiza a través de una cinta transportadora en altura, que transporta el hormigón fabricado en una amasadora planetaria de eje vertical (Figura 17), alimentada a su vez por los diferentes tipos de áridos y cementos, almacenados en sus correspondientes tolvas y silos.

Figura 16. Bloques y bovedillas recién fabricadas



Fuente: Elaboración propia

Figura 17. Amasado del hormigón y alimentación al equipo de vibrocompactación



Fuente: Elaboración propia

Mediante una línea de trabajo continua, el equipo vibrocompactador se encuentra alimentado de las tablas sobre las que “pone” las piezas prefabricadas (Figura 18). Cada ciclo de producción se llena una tabla de piezas, 7.5 bloques de 400x200x200 o 4 bovedillas de 25.

Las tablas llenas de piezas son desplazadas hasta colocarlas alineadas verticalmente sobre el carro que, una vez lleno de tablas, son trasladadas hasta la cámara de curado, donde permanecerán hasta que finalice el proceso de curado de las piezas (Figura 19). El curado se produce por el calor de fraguado del cemento que provoca la evaporación de parte del agua que contienen las piezas, el vapor de agua condensa sobre la tabla superior, o el techo de la bóveda, en el caso de la tabla más alta, cayendo finalmente en forma de lluvia sobre las piezas.

El tiempo de curado oscila entre 24 y 48h de manera que se garantice, durante el fraguado y primer periodo de endurecimiento del hormigón, el mantenimiento de la humedad, según lo indicado en el artículo 74 de la EHE-08.

Figura 18. Equipo de vibrocompactación fabricando bloques



Fuente: Elaboración propia

Figura 19. Carro contenedor vertical y traslado de tablas a la cámara de curado



Fuente: Elaboración propia

Una vez finalizado el curado en cámara, el carro se desplaza hacia la zona de flejado donde se atan las piezas de cada tabla, que son apiladas sobre un palet de madera y trasladadas mediante una carretilla a la zona de almacenamiento.

La planta está completamente automatizada y controlada mediante un dispositivo informático desde el cual se manejan los mecanismos de los equipos y las dosificaciones establecidas para cada tipo de producto producido, de manera que se puede conseguir una producción de hasta 2800 ciclos al día en jornadas de 8h de trabajo, con un control de producción por laboratorio homologado con una frecuencia de 1.5 meses.

5.4.2. Ensayos realizados a las piezas prefabricadas de hormigón no estructural

La norma UNE-EN 13369 (UNE-EN 13369:2006 2006, UNE-EN 13369:2006/A1:2006 2006, UNE-EN 13369:2006/AC:2008 2008) establece las reglas comunes para los productos prefabricados de hormigón, contemplando los requisitos generales comunes aplicables a una amplia variedad de productos prefabricados de hormigón producidos en fábrica. No obstante, la norma indica que servirá de referencia para otras normas permitiendo un enfoque de normalización más coherente en el campo de los productos prefabricados de hormigón y reduciendo las diferencias entre el gran número de normas elaboradas en paralelo por diferentes grupos de expertos, y que si un producto tiene su correspondiente norma específica, dicha norma tiene preferencia frente a esta general.

Por lo que a continuación se presentan los ensayos prescritos por las correspondientes normas para los productos prefabricados elaborados.

5.4.2.1. Ensayos realizados a los bloques prefabricados de hormigón no estructural

La norma UNE-EN 771 en su parte 3 (UNE-EN 771-3:2011 2011) es la que establece las especificaciones y los requisitos prestacionales de los bloques de hormigón elaborados con áridos densos y ligeros, o una combinación de ambos, para las que los principales usos previstos son en fábrica de revestir, vista o expuesta, tanto en aplicaciones autoportantes y no autoportantes de edificación, como de ingeniería civil. Según la norma, las piezas son adecuadas para todo tipo de muros, incluyendo los de una sola hoja, las paredes exteriores de chimeneas, con cámara de aire, las divisiones, los de contención y de sótano. Así mismo, pueden proporcionar protección contra incendios, y aislamiento térmico y acústico.

En la Tabla 86 se especifican los requisitos y propiedades que la norma UNE-EN 771-3 exige a estos productos y que los define en términos de los métodos de ensayo y otros procedimientos referenciados. Así mismo, se ha considerado determinar otros parámetros como la absorción por inmersión total, la resistencia a hielo-deshielo y el envejecimiento de la pieza en cámara con atmósfera salina que, no estando contemplados en la norma, resultan de interés para determinar el comportamiento de dichas piezas frente a determinados ambientes, como así lo atestigua el Código Técnico de la Edificación CTE (Real Decreto 314/2006 2006) en su Documento Básico DB SE-F Seguridad Estructural. Fábricas. Además, en cuanto al coeficiente de absorción, se ha considerado su ensayo ya que como norma general el CTE en el DB SE-F establece que durante la ejecución de muros se humectarán las piezas por aspersión o inmersión durante unos minutos, con la cantidad necesaria para que no varíe la consistencia del mortero al succionar o incorporar parte del agua de amasado contacto con la pieza.

Tabla 86. Ensayos realizados a los bloques prefabricados de hormigón según UNE-EN 771-3

REQUISITOS		NORMA
Dimensiones		(UNE-EN 772-3:1999 1999)
Tolerancias dimensionales	Tolerancias	(UNE-EN 772-16:2011 2011) método a
	Planicidad de las caras de apoyo	(UNE-EN 772-20:2001 2001)
	Paralelismo de las caras de apoyo	(UNE-EN 772-16:2011 2011) método d
Configuración y aspecto	Configuración	(UNE-EN 1996-1-1:2011 2011) (Eurocódigo 6)
Densidad	Densidad aparente en seco de las piezas	(UNE-EN 772-13:2001 2001)
	Densidad seca absoluta del hormigón	(UNE-EN 772-13:2001 2001)
Absorción de agua	Por capilaridad	(UNE-EN 772-11:2011 2011)
	Por inmersión total	(*)
Resistencia mecánica	Resistencia a compresión	(UNE-EN 772-1:2011 2011)
Durabilidad	Resistencia a hielo-deshielo	(**)
	Envejecimiento por niebla salina	(***)
(*) Requisito no contemplado		
(**)Requisito no contemplado. Realizado según (UNE-EN 13198:2004 2004)Anexo A		
(***)Requisito no contemplado. Realizado según (UNE-EN 14147:2004 2004)		

Fuente: Elaboración propia

5.4.2.2. Ensayos realizados a las bovedillas prefabricadas de hormigón no estructural

La norma UNE-EN 15037 en su parte 2 (UNE-EN 15037-2:2009+A1:2011 2011, UNE-EN 15037-2:2009+A1:2011. ERRATUM:2011 2011) establece las especificaciones que han de cumplir las bovedillas de hormigón. Esta norma contempla los requisitos y criterios básicos de comportamiento de las bovedillas fabricadas con hormigones de peso normal o con áridos ligeros, utilizadas conjuntamente con viguetas de hormigón prefabricado, con o sin losa de hormigón in situ, para la construcción de sistemas de forjado y cubierta de vigueta y bovedilla (ver Tabla 87).

Tabla 87. Ensayos realizados a las bovedillas prefabricadas de hormigón

REQUISITOS		NORMA
Propiedades geométricas	Tolerancias de fabricación	(UNE-EN 15037-2:2009+A1:2011 2011, UNE-EN 15037-2:2009+A1:2011. ERRATUM:2011 2011)
	Dimensiones mínimas	(UNE-EN 15037-2:2009+A1:2011 2011, UNE-EN 15037-2:2009+A1:2011. ERRATUM:2011 2011)
Resistencia mecánica	Resistencia a cargas concentradas	(UNE-EN 15037-2:2009+A1:2011 2011, UNE-EN 15037-2:2009+A1:2011. ERRATUM:2011 2011)
	Resistencia a flexión	(UNE-EN 15037-2:2009+A1:2011 2011, UNE-EN 15037-2:2009+A1:2011. ERRATUM:2011 2011)
Resistencia y reacción al fuego ¹	Reacción al fuego	(UNE-EN 13369:2006 2006, UNE-EN 13369:2006/A1:2006 2006, UNE-EN 13369:2006/AC:2008 2008)
Densidad seca bruta	Densidad seca absoluta	(UNE-EN 772-13:2001 2001)
Retracción por secado del hormigón ligero		(UNE-EN 772-14:2002 2002)
¹ Los productos prefabricados de hormigón con base de cemento, fabricados sin materias orgánicas, se pueden declarar como clase A.1 de resistencia al fuego sin necesidad de ensayo		

Fuente: Elaboración propia

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1. Análisis de resultados de los ensayos realizados al árido reciclado en la primera fase de caracterización y discusión

6.1.1. Introducción

En este apartado se estudia la viabilidad del árido reciclado para su aplicación en hormigón estructural y obras de carreteras y puentes. Para ello se ha hecho uso de algunas de las especificaciones químicas, físicas y mecánicas establecidas en la Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08 (EHE-08 2008) en su artículo 28.4; en el anejo 15, sobre las recomendaciones de utilización de hormigones reciclados; en el anejo 18, sobre hormigón no estructural; en la norma española UNE-EN 12620 “Áridos para hormigón” (UNE-EN 12620:2003+A1 2009, prEN 12620 2013); y en el Pliego General para Obras de Carreteras y Puentes PG-3 (PG-3 1975).

Aclarar que, para esta primera etapa de caracterización, se han ensayado las especificaciones más representativas que puede presentar el árido reciclado, justificándose bibliográficamente aquellas que no se han estudiado. No obstante, en la tercera fase del estudio, donde se estudiará la viabilidad del árido reciclado en la elaboración de prefabricados de hormigón no estructural, al árido reciclado se le practicarán todos los ensayos necesarios para establecer su uso.

Uno de los parámetros de enorme influencia en las posibles aplicaciones del árido reciclado es la granulometría que presenta, por lo que se recoge un extenso estudio de la gradación por tamaños de árido reciclado, para lo cual se ha seguido el procedimiento descrito en la norma UNE-EN 933-2:96 (UNE EN 933-3 1997) en el que se ha utilizado la Serie Básica de tamices, a la que se le ha incluido la Serie 2, que tradicionalmente se ha empleado en España, tal y como se especifica en la norma UNE 7050-2:1997 (UNE 7050-2 1997). Además, para su aplicación en la elaboración de hormigón estructural, se han considerado también distintos métodos granulométricos avalados por autores como Fuller, Bolomey, Dreux (Dreux 1981, Fernández Cánovas 1989, García Meseguer 2001, Jiménez Montoya, García Meseguer et al. 2000), por la norma ASTM C 33-11 (ASTM C 33-11 2011) y la DIN 1045-1 (DIN 1045-1 2008). No obstante, es necesario indicar, antes de proceder al extenso estudio de la aptitud granulométrica de los áridos reciclados estudiados, que cualquier tipo de árido que no cumpla las prescripciones establecidas, puede ser convenientemente conducido al cumplimiento, a través de su mezclado con otras fracciones para corregir los defectos que presenten (Martín-Morales, Sánchez-Roldán et al. 2013).

Los resultados arrojados representan la media aritmética de los valores del ensayo en cada una de las fracciones del árido reciclado objeto del estudio.

6.1.2. Análisis de resultados y discusión para la aplicación de árido reciclado en hormigón estructural

6.1.2.1. Designación de los áridos según la Instrucción EHE-08 y la norma UNE-EN 12620

La Instrucción EHE-08 (EHE-08 2008) en su artículo 28.2, establece el criterio general para la designación de los áridos de acuerdo con el formato que a continuación se indica, en el cual GR son siglas que corresponden con el grupo de árido (AG, árido grueso; AF, árido fino; FN, finos), d, es el tamaño mínimo del árido en mm, D, el tamaño máximo del árido en mm, IL, la forma de presentación (R, rodado, T, triturado, M, mezcla), N, la naturaleza del árido (C, calizo, S, silíceo, D, dolomítico, A, artificial, R, reciclado).

GR-d/D-IL-N

En la Tabla 88 se recoge la designación que le correspondería a las distintas fracciones del árido reciclado consideradas en este estudio.

Tabla 88. Designación de los áridos según artículo 28.2 EHE-08 y norma UNE-EN 12620

MUESTRA	DESIGNACIÓN		
	EHE-08	UNE-EN 12620	
		TAMAÑO	TIPO
H	AG-1/31.5-T-R	$D > 4$ y $d \geq 1$	Árido grueso
H-001	AG-4/31.5-T-R	$D > 4$ y $d \geq 1$	Árido grueso
H-002	AF-0/4-T-R	$D \leq 4$ y $d = 0$	Árido fino
001	AG-4/63-T-R	$D > 4$ y $d \geq 1$	Árido grueso
002	AF-0/4-T-R	$D \leq 4$ y $d = 0$	Árido fino
003	AG-0.125/16-T-R	$D > 4$ y $d = 0$	Árido todo en uno
004	AG-0.25/63-T-R	$D > 4$ y $d = 0$	Árido todo en uno

Fuente: Elaboración propia según EHE-08 y UNE-EN 12620

Es necesario aclarar que con la actual Instrucción EHE-08, por definición, el tamaño máximo resulta en algunos casos superior al obtenido según el criterio de la anterior Instrucción EHE (EHE 1998) del año 1998. Ésta definía el tamaño máximo de un árido como “la mínima abertura de tamiz que deja pasar más del 90% en peso del árido”, mientras que la actual añade dos requisitos más. En el caso de árido cuyo tamaño máximo sea superior a 4mm el tamaño máximo será la máxima abertura de tamiz que retenga y acumule menos del 10% del peso del árido, cumpliéndose además que el tamiz de doble luz de malla no retenga nada y el de 1.4 veces el tamaño máximo elegido retenga menos de un 2% del peso del árido. Estas dos restricciones añadidas suponen, en la mayoría de las ocasiones, que aunque la cantidad de granos retenidos por los tamices 2D y 1.4D sean de poca cuantía, el tamaño máximo se eleve al de la luz del tamiz superior.

De acuerdo con la consideración del tipo de árido realizada por la norma UNE-EN 12620 (UNE-EN 12620:2003+A1 2009, prEN 12620 2013) las distintas fracciones granulométricas ensayadas se denominarán según los requisitos granulométricos como se indica en la Tabla 88, donde a diferencia del criterio establecido por la Instrucción EHE-08, las fracciones 003 y 004 se considerarán árido todo en uno por tener un tamaño máximo superior a 4 y un tamaño mínimo inferior a uno, que se puede considerar igual a 0.

6.1.2.2. Requisitos granulométricos del árido grueso según la Instrucción EHE-08 y la norma UNE-EN 12620

La Instrucción EHE-08 (EHE-08 2008) no establece ningún tipo de requerimiento granulométrico hacia el árido grueso salvo los requisitos generales de los tamaños máximo (D) y mínimo (d) del árido y la limitación de su tamaño máximo, en función de las dimensiones y forma de la pieza a hormigonar y la cuantía y disposición de la armadura. Tan sólo se especifica que el contenido máximo en finos no debe superar el 1.5% (Tabla 28.4.1.a EHE-08) y ninguna de las muestras ensayadas de árido grueso reciclado tiene un contenido en finos superior a éste (ver Tabla 89).

Además al árido grueso se le exige que su forma, expresada mediante el índice de lajas (IL) determinado conforme a la norma UNE-EN 933-3 (UNE EN 933-3 1997), sea inferior a 35 y, aunque se ha demostrado que el árido natural presenta un mayor índice de lajas que el árido reciclado (Sánchez de Juan 2004, Tam, Tam 2008), dado que el mortero que queda adherido en las partículas tiende a redondear las zonas más angulosas de las mismas, la propia Instrucción EHE-08 en su Anejo 15 admite que las plantas productoras de árido reciclado consiguen en general una fracción gruesa con un coeficiente de forma, índice de lajas y una granulometría adecuadas dentro de los husos recomendables para su empleo en hormigón estructural.

Diferentes estudios efectuados al árido reciclado (Sánchez de Juan 2004, Fueyo Casado 2003), ponen de manifiesto que el sistema empleado en la trituración del árido influye de manera decisiva en la forma de las partículas, siendo las trituradoras de impactos las que proporcionan formas más adecuadas, en cuanto a forma y angulosidad, que las trituradoras de mandíbulas.

La forma del árido reciclado estudiado no resultaría perjudicial para la buena manejabilidad del hormigón, por lo que no sería necesario el uso de una mayor cantidad de agua amasado para el mojado del árido que afectase posteriormente a la resistencia del hormigón.

La norma UNE-EN 12620 asigna categoría al árido grueso en función de que su tamaño máximo sea mayor a 4 y el tamaño mínimo sea menor o igual a 1 y además cumpla las limitaciones establecidas en la Instrucción.

La Tabla 90 recoge los requisitos generales en forma de límites granulométricos fijados para el árido, en tanto por ciento, según los tamaños D, 2D, 1.4D, d y d/2,

así como los valores obtenidos en las diferentes muestras ensayadas, en la que se ha incluido una última columna complementaria que indica la categoría que la UNE-EN 12620 (UNE-EN 12620:2003+A1 2009, prEN 12620 2013) le asigna al árido.

Se puede comprobar que todas las muestras de árido grueso reciclado estudiadas cumplen los requisitos granulométricos y por tanto se les puede asignar la categoría $G_C 90/10$ como árido grueso a las fracciones H, H-001 y 001.

En la Tabla 91 se recogen los requisitos granulométricos que debe cumplir el árido que debe pasar por los tamices 2D, 1.4D, D, d y d/2 y las correspondientes desviaciones estándar que presentan un valor del 0.00% salvo las que representan los valores medios para el tamaño máximo d que oscilan entre el 1.74% y el 3.51% lo que indica una notable variación de tamaños dentro de las muestras estudiadas.

También se les podrían asignar los requisitos adicionales al porcentaje que pasa por el tamiz de tamaño intermedio, reflejados en la

Tabla 92, según los cuales todas las granulometrías deben quedar dentro de los límites generales, para dichos tamaños intermedios, que se recogen en la Tabla 91. El fabricante debe documentar y, a petición, declarar la granulometría típica que pasa el tamiz del tamaño medio y las tolerancias seleccionadas de las categorías de la

Tabla 92. Según estos límites y tolerancias seleccionadas en la UNE 12620 se puede comprobar que es posible asignar categoría $G_{20/17.5}$ a todas las muestras de árido grueso.

Respecto del contenido en finos, la norma UNE-EN 12620 también establece una asignación de categoría a los áridos en función del porcentaje que pasa por el tamiz de 0.063mm. En la Tabla 89, que refleja el contenido en finos que presentan todas las muestras de árido reciclado y la categoría asignada a cada una de ellas, podemos observar que todas las muestras de árido grueso reciclado tienen asignada la categoría $f_{0.5}$ por presentar un porcentaje en finos inferior al 1.5%

Tabla 89. Contenido máximo en finos de los áridos según EHE-08 y UNE-EN 12620

TIPO DE ÁRIDO	MUESTRA	PORCENTAJE QUE PASA POR EL TAMIZ 0.063mm	LIMITACIÓN EHE-08	CATEGORÍA
Grueso	H	0.21%	1.5%	$f_{0.5}$
	H-001	0.00%	1.5%	$f_{0.5}$
	001	0.00%	1.5%	$f_{0.5}$
Fino	H-002	1.04%	6-16%	f_3
	002	4.54%	6-16%	f_5
Todo uno	003	1.53%	1.5%	f_3
	004	1.87%	1.5%	f_3

Fuente: Elaboración propia según EHE-08 y UNE-EN 12620

Tabla 90. Requisitos generales granulométricos del árido según EHE-08 y UNE- EN 12620

Muestra (media)	d/D	Tamaño	PORCENTAJE QUE PASA										Categoría G	
			2Di		1,4Di		Di		Di		di/2			
			Límite	Result.	Límite	Result.	Límite	Result.	Límite	Result.	Límite	Result.		
H	1/ 31.5	D>4 y d≥1	100%	100%	98- 100%	100%	80-99% 85-99% 90-99%	97.38%	0-10% 0-15% 0-20%	5.60%	0-2% 0-5%	3.37%	G _{C 90/10}	Cumple
H-001	4/ 31.5	D>4 y d≥1	100%	100%	98- 100%	100%	80-99% 85-99% 90-99%	97.73%	0-10% 0-15% 0-20%	0%	0-2% 0-5%	0%	G _{C 90/10}	Cumple
H-002	0/4	D≤4 y d=0	100%	100%	85- 100%	97.05 %	85-99%	95.07%	-	-	-	-	G _{F 85}	Cumple
001	4/63	D>4 y d≥1	100%	100%	98- 100%	98.01 %	80-99% 85-99% 90-99%	96.64%	0-10% 0-15% 0-20%	0%	0-2% 0-5%	0%	G _{C 90/10}	Cumple
002	0/4	D≤4 y d=0	100%	100%	85- 100%	99.29 %	85-99%	98.82%	-	-	-	-	G _{F 85}	Cumple
003	0.125/1 6	D>4 y d=0	100%	100%	98- 100%	99.85 %	75-99% 80-99% 85-99%	99.48%	-	-	-	-	G _{A 85}	Cumple
004	0.25/ 63	D>4 y d=0	100%	100%	98- 100%	98.82 %	75-99% 80-99% 85-99%	97.95%	-	-	-	-	G _{A 85}	Cumple

Nota: Según el artículo 28,3 de la EHE-08, el porcentaje en masa que pase por el tamiz D podrá ser superior a 99%, pero en tales casos el suministrador deberá documentar y declarar la granulometría representativa, incluyendo los tamices D, d, d/2 y los tamices intermedios entre d y D de la serie básica más la serie 1, o de la serie básica más la serie 2. Se podrán excluir los tamices con una relación menor a 1,4 veces el siguiente tamiz más bajo.

Fuente: Elaboración propia según EHE-08 y UNE-EN 12620

Tabla 91. Requisitos granulométricos del árido, indicando la desviación. EHE-08 y UNE- EN 12620

Muestra (media)	D(máx)	Tamaño	2Di		1,4Di		Di		di		di/2	
			% QP	Desviación	% QP	Desviación	% QP	Desviación	% QP	Desviación	% QP	Desviación
H	31.5	D>4 y d≥1	100%	0.00%	100%	0.00%	97.38%	1.74%	5.60%	0.16%	3.37%	0.35%
H-001	31.5	D>4 y d≥1	100%	0.00%	100%	0.00%	97.73%	2.35%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
H-002	4	D≤4 y d=0	100%	0.00%	97.05%	0.00%	95.07%	8.55%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
001	63	D>4 y d≥1	100%	0.00%	98.01%	0.00%	96.64%	3.51%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
002	4	D≤4 y d=0	100%	0.00%	99.29%	0.00%	98,82%	2.63%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
003	16	D>4 y d=0	100%	0.00%	99.85%	0.00%	99,48%	1.68%	5,01%	2.85%	1,53%	1.02%
004	63	D>4 y d=0	100%	0.00%	100%	0.00%	100%	2.17%	12.35%	3.51%	7.31%	2.15%

Fuente: Elaboración propia según EHE-08 y UNE-EN 12620

Tabla 92. Categoría para los áridos gruesos, según las limitaciones de los tamices intermedios según UNE-EN 12620

Muestra	D/d	Tamaño medio limitación	Tamaño medio muestra	% QP	Desviación (%)	Límites generales	Tolerancias	Categoría
H	≥4	D/2	16	70.10%	4.73%	20-70	±17.5	G _{20/17.5}
H-001	≥4	D/2	16	62.82%	6.94%	20-70	±17.5	G _{20/17.5}
001	≥4	D/2	31.5	84.49%	9.49%	20-70	±17.5	G _{20/17.5}

Fuente: Elaboración propia según EHE-08 y UNE-EN 12620

Tabla 93. Categoría para los áridos finos y todo uno, según las limitaciones de los tamices intermedios según UNE- EN 12620

Muestra (media)	D(máx)	Di			Di/2			0.063mm			0.250mm			Categoría
		% QP	Tol	Desv	% QP	Tol	Desv	% QP	Tol	Desv	% QP	Tol	Desv	
H-002	4	95.07%	±5	8.55%	60.50%	±10	5.83%	1.04%	±3	0.60%	9.94%	±20	1.88%	G _{TC10}
002	4	98.82%	±5	2.63%	68.15%	±10	9.69%	4.54%	±3	2.29%	19.29%	±20	5.05%	G _{TC10}
003	16	99.48%	±5	1.68%	88.93%	±10	9.21%	1.53%	±3	1.02%	-	-	-	G _{TC10}
004	63	97.95%	±5	2.17%	90.08%	±10	7.02%	1.87%	±3	1.16%	-	-	-	G _{TC10}

Fuente: Elaboración propia según EHE-08 y UNE-EN 12620

6.1.2.3. Requisitos granulométricos del árido fino según la Instrucción EHE-08 y la norma UNE-EN 12620

La Instrucción EHE-08 (EHE-08 2008) en su artículo 28 recomienda que la arena utilizada para confeccionar hormigón armado cumpla con los requisitos granulométricos definidos en el apartado anterior además de los indicados en la Tabla 89 respecto al contenido máximo en finos según el tipo de árido y el ambiente de exposición.

La norma asigna categoría al árido fino en función de que su tamaño máximo sea menor o igual a 4 y el tamaño mínimo sea 0, y además cumplan las limitaciones establecidas en la Instrucción.

El contenido máximo en finos del árido fino reciclado oscila entre el 1.04% para el árido fino procedente de hormigón triturado y el 4.54% para el procedente de escombros triturados, por lo que según las limitaciones de la Tabla 89 ambos podrían ser utilizados en la fabricación de hormigón estructural en cualquier tipo de ambiente de exposición, asignándoles la UNE-EN 12620 (UNE-EN 12620:2003+A1 2009, prEN 12620 2013) las categorías f_3 y f_5 respectivamente. Resulta significativa la diferencia porcentual en el contenido en finos de ambas muestras que indican la mayor resistencia y menor friabilidad del hormigón respecto del escombros.

Atendiendo a las especificaciones que establece la norma UNE-EN 12620 (UNE-EN 12620:2003+A1 2009, prEN 12620 2013) respecto a los requisitos granulométricos del árido fino correspondientes a los distintos tamaños D, 2D, 1.4D, d y d/2 y que quedan reflejados en la Tabla 90, se puede comprobar que las muestras de árido fino reciclado estudiadas cumplen todos los requisitos y por tanto se les puede asignar la categoría $G_F 85$ como árido fino.

Los valores porcentuales medios de material que pasa por los tamices indicados en la Tabla 91 reflejan una desviación estándar que de 0.00% salvo en los tamaños máximos D que presenta 2.63% y 8.55% para las fracciones 002 y H-002 respectivamente, que indican una considerable variación de tamaños dentro de las muestras estudiadas.

Con respecto a los requisitos adicionales al porcentaje que pasa por el tamiz de tamaño intermedio, reflejados en la Tabla 92 y la Tabla 93, se observa que se le puede asignar la categoría $G_{TC} 10$ a todas las muestras de árido fino.

6.1.2.4. Requisitos granulométricos del árido todo uno según la Instrucción EHE-08 y la norma UNE-EN 12620

La Instrucción EHE-08 (EHE-08 2008) no establece ningún requisito granulométrico al árido todo uno, considerándolo como el que es suministrado en forma de mezcla de áridos finos y gruesos, mientras que la norma UNE-EN 12620 (UNE-EN 12620:2003+A1 2009, prEN 12620 2013) asigna categoría al árido todo

uno en función de que su tamaño máximo sea mayor a 4 y el tamaño mínimo sea igual a 0 y además cumpla las limitaciones establecidas la Tabla 93, además de las establecidas en la Instrucción.

Respecto de los requisitos granulométricos que la UNE-EN 12620 le asigna al árido todo uno, la Tabla 90 recoge los límites granulométricos fijados en tanto por ciento, según los tamaños D, 2D, 1.4D, d y d/2, así como los valores obtenidos en las diferentes muestras ensayadas, comprobándose que alcanzando el cumplimiento de todos ellos, las muestras 003 y 004 denominadas árido todo uno obtienen la categoría G_A 85.

En la Tabla 91 se reflejan los valores porcentuales medios de material que pasa por los tamices 2D, 1.4D, D, d y d/2 y las correspondientes desviaciones estándar que oscilan entre 0.00% y 2.85%, indicando una considerable variación de tamaños.

Asignándoles los requisitos adicionales al porcentaje que pasa por el tamiz de tamaño intermedio, apuntados en la Tabla 93, es posible asignar categoría G_{Tc}10 a todas las muestras de árido todo uno.

Como árido todo uno, la Instrucción EHE-08 no especifica la limitación que ha de tener en cuanto a su contenido en finos, aunque la norma UNE-EN 12620 sí indica que hay que declarar su categoría, resultando para ambos tipos de árido todo uno la categoría de su contenido en finos como f₃ (Ver Tabla 89).

6.1.2.5. Recomendaciones para la utilización de hormigones reciclados según el anejo 15 de la Instrucción EHE-08

El anejo 15 de la Instrucción EHE-08 (EHE-08 2008) especifica que se puede elaborar hormigón estructural con árido reciclado procedente del machaqueo de residuos de hormigón, siempre que se limite su uso al 20% máximo de árido grueso reciclado sobre el total de árido grueso empleado; y sólo en hormigones armados o en masa de resistencias inferiores a 40 MPa. Excluye expresamente áridos reciclados de naturaleza distinta del hormigón, el árido reciclado obtenido de hormigón que haya presentado algún tipo de patología o el procedente de hormigones especiales.

La limitación que impone del 20% máximo es la aceptada por la gran parte de la normativa internacional (EHE-08 2008, LNEC E 471 2009, CUR 1984, CUR 1986, CUR 1994, NEN 5905 2010, BS 8500-2:2006 2006, WBTC 12/2002 2002) en referencia a estudios de investigación, como el desarrollado por Levy (Levy, Helene 2004), que se basan en el hecho de que hasta un 20% de sustitución no modifica prácticamente las propiedades físicas y mecánicas del hormigón confeccionado con árido reciclado. Otros autores apuestan por subir esa limitación de un 30% aun 50% para el caso de la grava (Chakradhara Rao, Bhattacharyya et al. 2011, Corinaldesi, Letelier et al. 2011, González-Fonteboa, Martínez-Abella 2007, Limbachiya, Marrocchino et al. 2007, Marmash, Elliott 2000) e incluso algunos hasta un 20% en el caso de la arena (Corinaldesi, Moriconi 2009, Evangelista, de

Brito 2007, Katz 2003, Li 2008, Marmash, Elliott 2000) sin que las propiedades finales del hormigón se vean mermadas significativamente. Inciden para ello en el cuidado de otros factores como el aumento del contenido en cemento o el control de la calidad del hormigón original.

Además de lo especificado en el artículo 28 de la Instrucción, desde el punto de vista de la granulometría, los áridos reciclados deberán presentar un contenido de desclasificados inferiores menor o igual al 10% y un contenido de partículas que pasan por el tamiz de 4 mm no superior al 5%. Se prevé que el contenido de desclasificados inferiores del árido reciclado suele ser superior al de los áridos naturales, debido a que éstos pueden generarse después del tamizado, durante el almacenamiento y transporte, por su mayor friabilidad. Además, la fracción fina reciclada se caracteriza por presentar un elevado contenido de mortero, lo cual origina unas peores propiedades que afectan negativamente a la calidad del hormigón. Esta es la principal causa de restringir su uso en la aplicación de hormigón estructural.

Por lo que según este anejo sólo podría utilizarse en la elaboración de hormigón estructural la fracción gruesa de árido reciclado procedente de hormigón triturado H-001.

6.1.2.6. Recomendaciones para la utilización de hormigones reciclados según el anejo 18 de la Instrucción EHE-08

Según el anejo 18 de la EHE-08 (EHE-08 2008), en la elaboración de hormigones con fines no estructurales, tanto los denominados hormigón de limpieza (HL) como hormigón no estructural (HNE), está permitido la utilización de hasta un 100% de árido grueso reciclado, siempre que éste cumpla lo especificado en el anejo 15. Por lo que según lo indicado en el apartado anterior, sólo la fracción gruesa de árido reciclado procedente de hormigón triturado tendría validez para ser utilizada en estas aplicaciones.

Tabla 94. Métodos granulométricos y muestras a las que se le han aplicado

Muestra	Método granulométrico						
	FULLER	BOLOMEY	DIN 1045-1	Abrams	EHE-08	ASTM C 33-11	DREU X
H	X	X	X	X			
H-001				X			
H-002				X	X	X	X
001				X			
002				X	X	X	X
003				X	X	X	X
004	X	X	X	X			

Fuente: Elaboración propia

6.1.2.7. Requisitos granulométricos del árido según otros autores

En la valorización granulométrica del árido reciclado, además de la Instrucción EHE-08 (EHE-08 2008) y la norma UNE-EN-12620 (UNE-EN 12620:2003+A1 2009, prEN 12620 2013), se ha tenido en cuenta el cumplimiento de distintos husos granulométricos establecidos por diferentes autores como métodos de caracterización granulométrica del árido. La Tabla 94 presenta los diferentes métodos estudiados y las muestras a los que se han aplicado cada uno de ellos.

6.1.2.7.1. Método granulométrico de Fuller

La curva granulométrica de Fuller (Dreux 1981, Fernández Cánovas 1989, García Meseguer 2001, Jiménez Montoya, García Meseguer et al. 2000) representa gráficamente el árido ideal que proporcionaría a un hormigón la máxima compacidad y trabajabilidad en función de su tamaño máximo y que corresponde a la representada por la Ecuación 1, donde: y , es el tanto por ciento de árido que pasa por el tamiz d ; d , el diámetro de cada tamiz; y D , el tamaño máximo del árido.

$$y = 100 \sqrt{\frac{d}{D}}$$

Ecuación 1. Expresión de Fuller para la obtención de la curva granulométrica ideal

Según Fuller se obtienen buenas granulometrías continuas con áridos redondeados de tamaño máximo 50 ± 20 mm con un contenido en cemento superior a 300 kg/m^3 . Cuando se pretende utilizar este método para áridos de machaqueo, hay que aumentar la cantidad de finos convenientemente.

Si la curva del árido estudiado se asemeja a la de Fuller se puede afirmar que es un árido con una buena distribución granulométrica. En caso contrario el árido tendría que ser modificarlo mediante su mezcla con otras fracciones de distinto tamaño.

Para considerar que una curva está ajustada, no es necesario que coincidan las proporciones del árido con las correspondientes a la curva teórica de referencia, basta con que las áreas existentes entre ambas curvas, situadas por encima y por debajo de la de Fuller, estén compensadas. Además deben ajustarse lo más posible la zona de la curva correspondiente a la arena por la importancia que la misma tiene en las propiedades del hormigón.

6.1.2.7.2. Método granulométrico según Bolomey

El método de Bolomey (Dreux 1981, Fernández Cánovas 1989, García Meseguer 2001, Jiménez Montoya, García Meseguer et al. 2000) responde a una curva granulométrica de referencia basada en la Ecuación 2:

$$p = A + (100 - A)\sqrt{\frac{d}{D}}$$

Ecuación 2. Expresión de Bolomey para la obtención de la curva granulométrica ideal

Siendo p , el porcentaje en peso que pasa por cada tamiz d ,
 d , la abertura de cada tamiz,
 D , el tamaño máximo del árido.
 A , variable en función de la consistencia del hormigón y tipo de árido que varía entre 10 y 14.

Dicha curva tiene en cuenta el tipo de árido empleado y la consistencia del hormigón, introduciendo en la misma el contenido en cemento empleado en la dosificación del hormigón. Por tanto las curvas de Bolomey respecto de las de Fuller, para el mismo tamaño máximo, quedan siempre por encima de ésta.

6.1.2.7.3. Método granulométrico según la norma alemana DIN 1045-1

La norma DIN 1045-1 (DIN 1045-1 2008) establece los dominios granulométricos en donde pueden situarse las curvas granulométricas utilizables en función de su tamaño máximo, incluidos también en el Código Modelo DEB-FIP (Comité Euro Internacional del Hormigón, García Meseguer et al. 1995), de manera que:

- Las granulometrías resultantes entre las curvas A-B son de tipo continuo y corresponden a la zona favorable de utilización, que proporcionaría a masas dóciles y trabajables que dan lugar a un hormigón resistente.
- Las comprendidas entre B-C con granulometrías de tipo continuo y aún utilizable, aunque no deseable, pues daría lugar a hormigones poco resistentes y con retracción.
- No son convenientes las curvas por encima de la línea C por demandar demasiada agua de amasado, ni las que queden por debajo de la línea U, por ser masas de difícil puesta en obra.
- Las curvas que se ajusten al límite de trazos entre U-C son de tipo discontinuo.

Una de las principales cualidades que debe presentar un árido para confeccionar un hormigón que alcance los requisitos de resistencia mecánica y durabilidad, es la continuidad de su curva granulométrica. Granulometrías continuas proporcionan hormigones dóciles, en estado fresco, y resistentes y durables, una vez que hayan endurecido (Tam, Gao et al. 2008). Una granulometría continua indica además que el árido aporta una adecuada cantidad de granos de todos los tamaños, que proporcionan un buen apilamiento de sus granos, cerrando los granos más pequeños los huecos que dejan los de mayor tamaño, dejando los mínimos huecos posibles, ya que los finos y la lechada de cemento se ocupan de

rellenarlos, y les confiere la cohesión y la relativa homogeneidad que se le exige a un hormigón endurecido.

6.1.2.7.4. Módulo granulométrico de Abrams

Para un árido o una fracción del mismo de tamaño máximo determinado, Abrams obtiene un valor numérico, denominado *módulo granulométrico de finura* que representa el área por encima de la curva granulométrica y que queda comprendida entre los valores de los tamices 0,125 y el tamaño máximo (Dreux 1981, Fernández Cánovas 1989, García Meseguer 2001, Jiménez Montoya, García Meseguer et al. 2000).

Fuller adopta este método y le denomina *módulo granulométrico ideal*, de gran utilidad cuando se pretenden determinar las proporciones de la mezcla de distintas fracciones de árido necesarias para que la granulometría resultante se ajuste a la referida curva granulométrica ideal de Fuller.

El módulo granulométrico de un árido se obtiene como resultado de dividir por 100 la suma de los porcentajes retenidos y acumulados de la muestra en la serie de tamices 0.125-0.25-0.5-1-2-4-8-16-31.5-63 y 125. Por tanto, el árido más grueso será el que tenga el módulo granulométrico mayor.

Para estos autores no es necesario ceñirse exactamente a una curva granulométrica teórica, sino que basta con que el módulo granulométrico del árido sea el mismo que el de la curva teórica adoptada, a igualdad de consistencia, ya que todas las mezclas con el mismo módulo granulométrico demandarán la misma cantidad de agua para producir hormigones de la misma docilidad y resistencia, siempre que se emplee la misma cantidad de cemento.

Los módulos granulométricos óptimos determinados por Abrams según el tamaño máximo del árido están indicados en la Tabla 95. No obstante, con este método se puede obtener el módulo granulométrico de una mezcla de dos o más fracciones de árido a través de un sistema de dos ecuaciones con dos incógnitas, lo que permitirá corregir el árido que no presente el tamaño deseado.

Tabla 95. Módulos granulométricos de Abrams que siguen la parábola de Fuller

Tamaño máximo D	125	63	40	31.5	20	16	12.5	10	8	5	4
Módulo granulométrico	7.61	6.68	6.09	5.73	5.10	4.80	4.51	4.22	3.89	3.33	3.01

Fuente: Elaboración propia

Así mismo, en la Tabla 96 se muestran los módulos granulométricos que deben presentar las muestras estudiadas según su tamaño máximo, comprobándose que el árido grueso procedente de hormigón (H-001) es el que presenta un módulo granulométrico lo más parecido al ideal, mientras que la arena de la misma procedencia (H-002) es un 36% mayor en tamaño de lo deseado.

No obstante, con este método se puede obtener el módulo granulométrico de una mezcla de dos o más fracciones de árido a través de un sistema de dos ecuaciones con dos incógnitas, lo que permitirá corregir el árido que no presente el tamaño deseado.

Tabla 96. Módulos granulométricos de las muestras estudiadas para el tamaño máximo D

Muestra	D	MG	MG Fuller	MG/MG Fuller
H	31.5	6.39	5.73	1.12
H-001	31.5	5.92	5.73	1.03
H-002	4	4.08	3.01	1.36
001	63	7.50	6.68	1.12
002	4	3.27	3.01	1.09
003	16	4.07	4.80	0.85
004	63	5.99	6.68	0.90

Fuente: Elaboración propia

6.1.2.7.5. Método granulométrico de la norma ASTM C 33-11

La norma Americana ASTM C-33(ASTM C 33-11 2011), limita el dominio de las arenas dentro de dos curvas, la superior que sería la correspondiente a la arena fina, y la inferior, que apropiada a la arena gruesa. La granulometría recomendada por esta norma tendría que estar comprendida entre ambas. En la Tabla 97 se recogen los valores que limitan el dominio de las arenas.

Tabla 97. Valores que limitan el dominio de las arenas según la norma ASTM C 33-11

Tamiz mm.	% en peso acumulado que pasa por el tamiz	Tamiz serie básica + serie 2, mm.	% en peso acumulado que pasa por el tamiz
9.50	100	8	98.42 - 100
4.75	95-100	4	83.43 - 100
2.36	80-100	2	70.84 - 95.42
1.18	50-85	1	42.24 - 77.24
0.60	25-60	0.5	18.33-50
0.30	5-30	0.25	8.33-23.33
0.15	0-10		

Fuente: Elaboración propia según la norma ASTM C 33-11

6.1.2.7.6. Husos granulométricos de las arenas según la EHE-08

La Instrucción EHE-08 (EHE-08 2008) establece en el artículo 28 que el árido fino debe cumplir los requisitos granulométricos generales de la

Tabla 98 que especifica los límites dentro de los cuales deben presentarse los porcentajes retenidos acumulados del árido fino.

Tabla 98. Husos granulométricos del árido fino según la Instrucción EHE-08

Límites	MATERIAL RETENIDO ACUMULADO EN % EN PESO EN LOS TAMICES						
	4 mm	2 mm	1 mm	0,5 mm	0,25 mm	0,125 mm	0,063 mm
Superior	0	4	16	40	70	77	(1)
Inferior	15	38	60	82	94	100	100
(1) será: 94% - para áridos redondeados, - para áridos de machaqueo no calizos en obras sometidas a las clases de exposición IIIa, IIIb, IIIc, IV o bien que estén sometidas a alguna clase específica de exposición. 90% - para áridos de machaqueo calizos para obras sometidas a las clases de exposición IIIa, IIIb, IIIc, IV o bien que estén sometidas a alguna clase específica de exposición. - para áridos de machaqueo no calizos para obras sometidas a las clases de exposición I, IIa o IIb y que no estén sometidas a ninguna clase específica de exposición. 84% - para áridos de machaqueo calizos para obras sometidas a las clases de exposición I, IIa o IIb y que no estén sometidas a ninguna clase específica de exposición.							

Fuente: Elaboración propia según la Instrucción EHE-08

6.1.2.7.7. Método granulométrico DREUX.

Los dominios granulométricos que recomienda la bibliografía francesa, adoptados por Dreux (Dreux 1981, Fernández Cánovas 1989, García Meseguer 2001, Jiménez Montoya, García Meseguer et al. 2000), están basados en el módulo granulométrico que debe poseer la arena de manera que su curva quede comprendida dentro de las siguientes zonas:

- Zona A, representa arenas con un módulo granulométrico comprendido entre 2.20 y 2.80. Son las llamadas arenas preferentes, cuyas características que proporcionan al hormigón son buena docilidad y resistencia con riesgos limitados de segregación.
- Zona B, representa arenas con un módulo granulométrico entre 1.80 y 2.20. Denominadas arenas finas y, aun siendo interesante su uso, provocarán una cierta pérdida de resistencia en el hormigón.
- Zona C, representa arenas con un módulo entre 2.80 y 3.20. Son las arenas gruesas que se pueden utilizar para confeccionar hormigones de más altas resistencias aunque con riesgo de segregación y menor docilidad.

6.1.2.8. Aptitud granulométrica del árido reciclado según otros autores

6.1.2.8.1. Muestras de árido grueso reciclado H

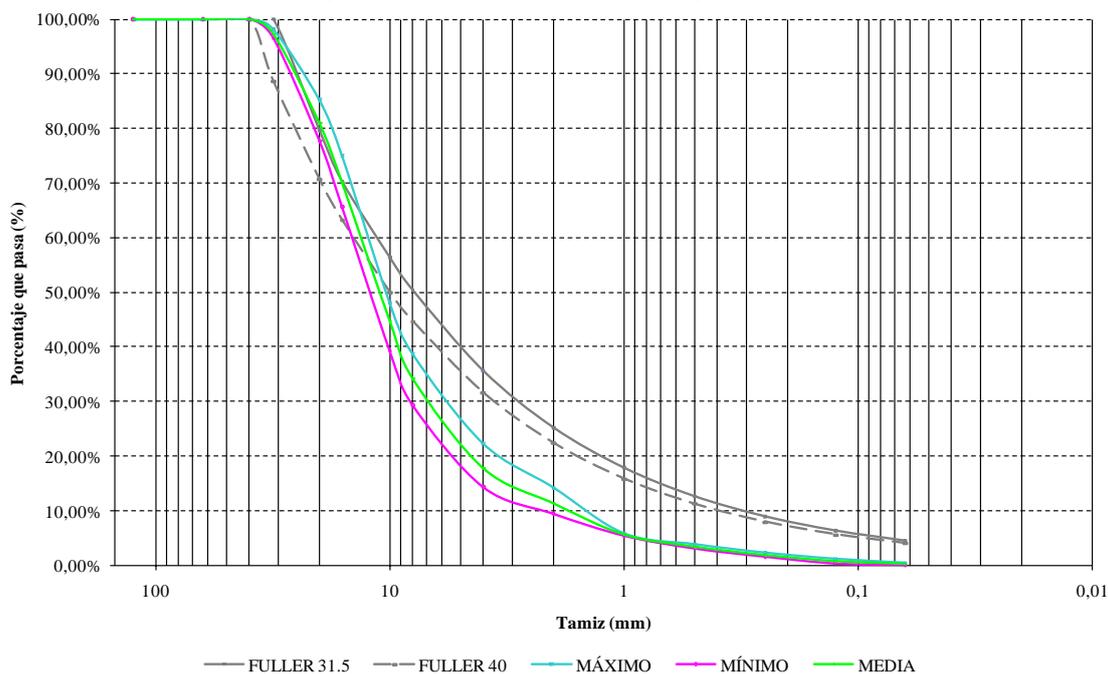
Las muestras de árido grueso reciclado procedentes de hormigón triturado denominadas como muestras H, aplicados los métodos granulométricos de Fuller, Bolomey, DIN 1045-1 y Abrams (DIN 1045-1 2008, Dreux 1981, Fernández

Cánovas 1989, García Meseguer 2001, Jiménez Montoya, García Meseguer et al. 2000), arrojan los siguientes resultados.

Al compararlas con la curva de Fuller para el tamaño máximo 31.5mm (Figura 20) se observa una carencia de granos de tamaños inferiores a 16mm, mientras que comparada con la correspondiente a Fuller para tamaño máximo 40mm se puede comprobar que las áreas por encima y por debajo de la curva quedan algo más compensadas. Igual ocurre al compararlas con las de Bolomey para tamaño máximo 31.5mm (Figura 21) y 40mm (Figura 22) sobre las que también quedarían más compensadas. Para ambos métodos, aun aceptando que su tamaño máximo más adecuado sería 40mm presentándose superior al determinado por la Instrucción EHE-08, las muestras mostrarían una carencia de tamaños superiores a 10mm y un defecto importante de arenas y finos.

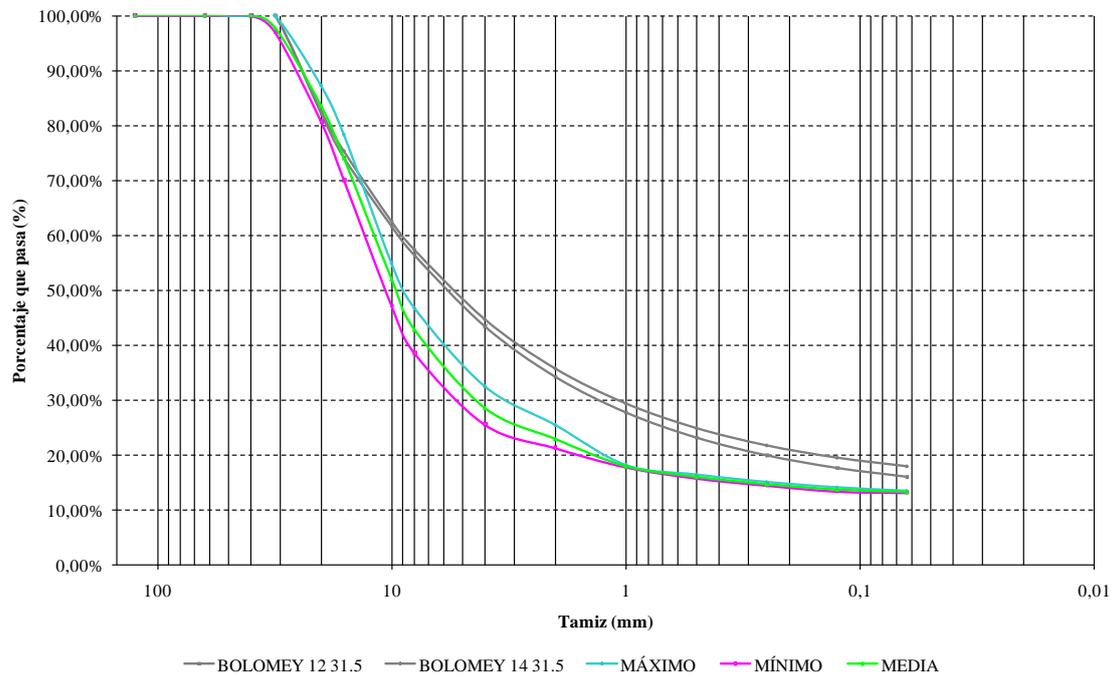
Por el contrario, las muestras de árido grueso procedentes de hormigón triturado H respecto de los husos DIN 1045-1 (Figura 23) presentan un buen ajuste dentro de la zona favorable en cuanto a los tamaños superiores a 10mm, quedando un pequeño defecto de granos inferiores a éstos que harán un hormigón con una difícil puesta en obra.

Figura 20. Muestras H comparadas con la curva de Fuller para tamaño máximo 40 y 31.5mm



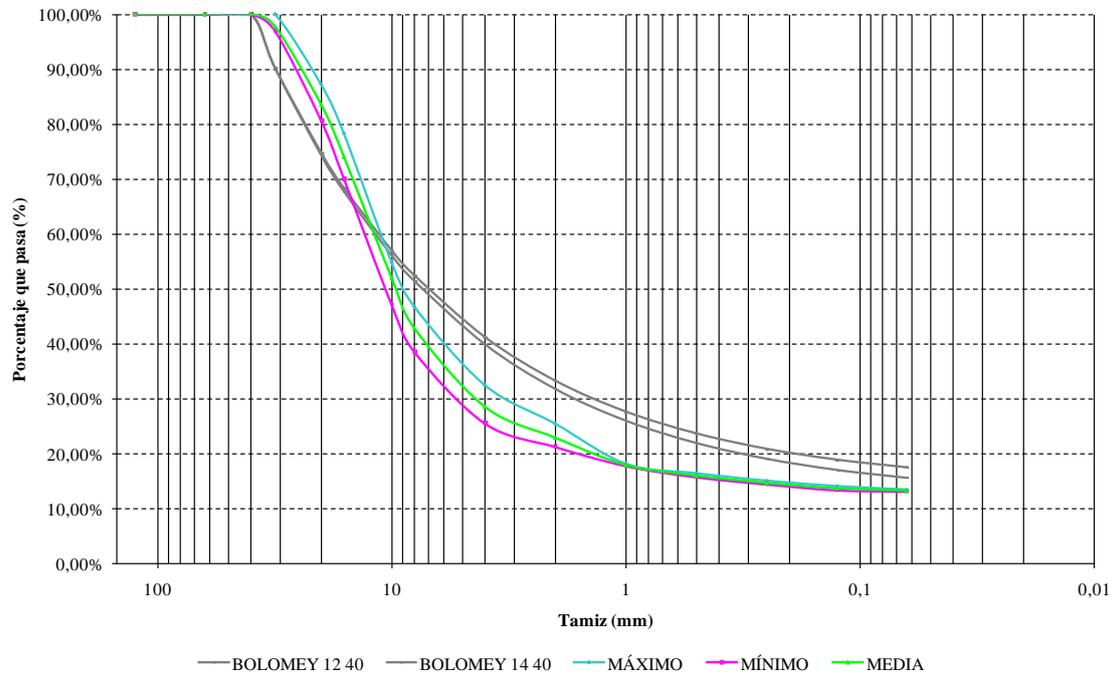
Fuente: Elaboración propia

Figura 21. Muestras H comparadas con las curvas de Bolomey para tamaño 31.5mm



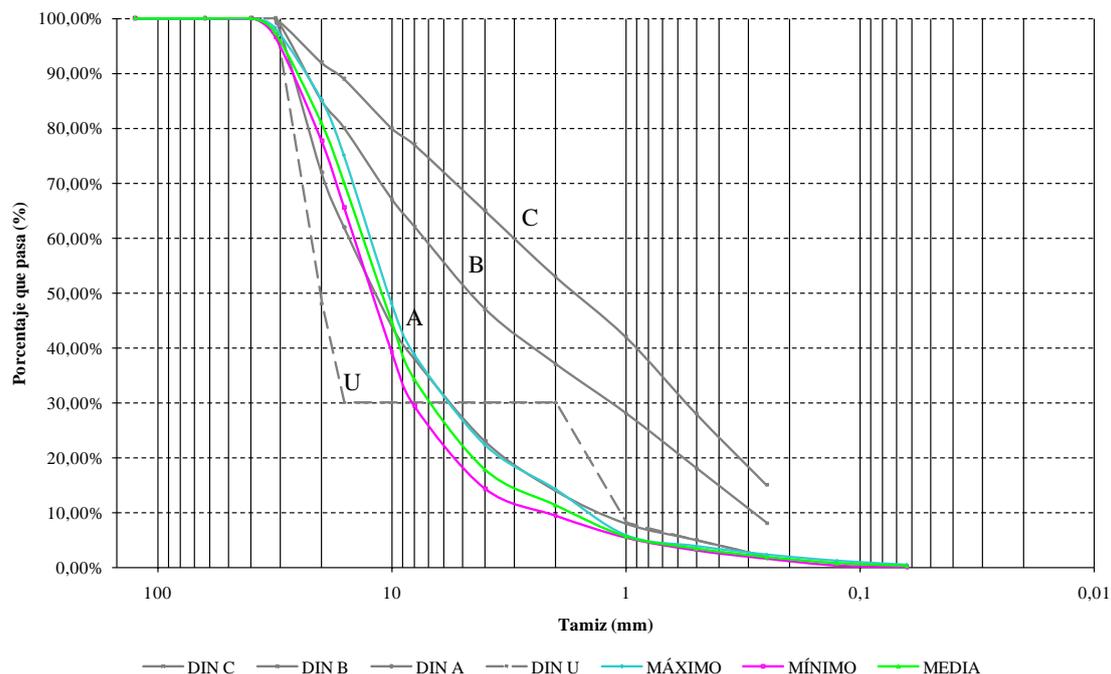
Fuente: Elaboración propia

Figura 22. Muestras H comparadas con las curvas de Bolomey para tamaño 40mm



Fuente: Elaboración propia

Figura 23. Muestras H comparadas con los husos DIN 1045-1 para tamaño 31.5mm



Fuente: Elaboración propia

Con respecto al tamaño que presentan las muestras H, el módulo granulométrico que define al árido grueso procedente de hormigón triturado es de 6.39 (Tabla 96), tan solo un 2.6% superior al de Abrams para tamaño máximo 31.5mm, indicando que, aunque en los métodos estudiado no se ajuste perfectamente a las curvas definidas por los autores, el tamaño global que presentan es adecuado para la fabricación de hormigón.

6.1.2.8.2. Muestras de árido grueso reciclado H-001

A las muestras de árido grueso reciclado procedentes de hormigón triturado H-001 se les ha aplicado el método granulométrico de Abrams (Dreux 1981, Fernández Cánovas 1989, García Meseguer 2001, Jiménez Montoya, García Meseguer et al. 2000). El resto de métodos granulométricos ha sido imposible de aplicar al no presentar la fracción la arena y los finos que le proporcionarían la continuidad necesaria para la confección de hormigón estructural.

El módulo granulométrico que poseen estas muestras para su tamaño máximo de 31.5mm (ver Tabla 96) es de 5.92, que representa un 3.32% superior al de Fuller para dicho tamaño máximo y por tanto, desde el punto de vista granulométrico, esta muestra sería viable para ser mezclada con una fracción de árido fino dando lugar a un árido que se ajuste a cualquier tipo de granulometría ideal estudiada.

6.1.2.8.3. Muestras de árido fino reciclado H-002

Las muestras de árido fino reciclado procedentes de hormigón triturado denominadas como muestras H-002, han sido estudiadas granulométricamente con respecto a los métodos de la Instrucción EHE-08, la norma alemana DIN 1045-1, la americana ASTM C 33-11, Dreux y Abrams (ASTM C 33-11 2011, DIN 1045-1 2008, Dreux 1981, EHE-08 2008, Fernández Cánovas 1989, García Meseguer 2001, Jiménez Montoya, García Meseguer et al. 2000), arrojando los siguientes resultados.

La arena reciclada procedente de hormigón, atendiendo al método recomendado por la Instrucción EHE-08 (Figura 24) y a los husos de la norma americana ASTM C 33-11 (Figura 25), dibuja una curva granulométrica continua y no uniforme que muestra un defecto de tamaños de granos comprendidos entre 2 y 0.5mm, que se acentúa notablemente en el caso de aplicar el método Dreux (Figura 26), donde se aprecia un defecto generalizado en prácticamente todos los tamaños por debajo de 2mm. En los tres casos la arena reciclada procedente de hormigón triturado sería demasiado gruesa.

Por el contrario, respecto de los husos de la norma DIN 1045-1, la arena reciclada procedente de hormigón (Figura 27) dibuja igualmente una curva granulométrica continua y no uniforme bien encuadrada en la zona A de preferencia, pero mostrando un exceso de granos de tamaños superiores a 2mm los que indica una gran demanda de agua para este tipo de arena.

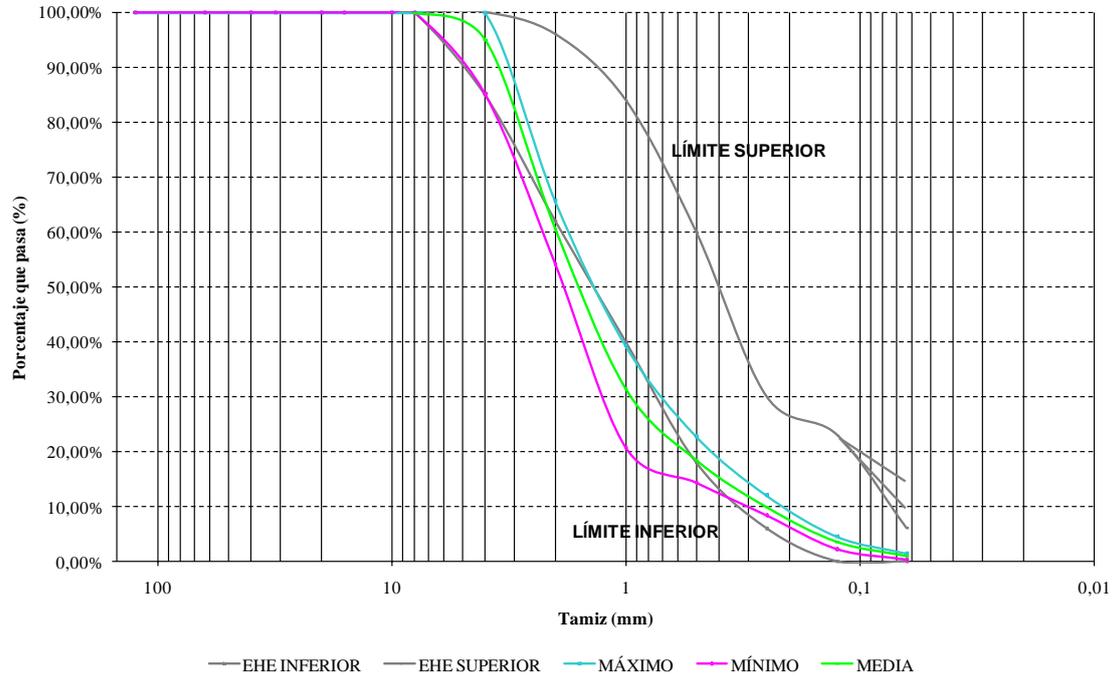
El módulo granulométrico de este material reciclado viene a confirmar lo que han indicado los métodos gráficos de referencia, es decir, que con un tamaño medio de 4.08, que supone un 36% superior al de Fuller para su tamaño máximo, resulta excesivamente gruesa por si sola para conformar un hormigón.

Por tanto, desde el punto de vista granulométrico, la arena reciclada procedente de hormigón podría ser utilizable, aun resultando demasiado gruesa para fabricar hormigón, provocando la consiguiente pérdida de trabajabilidad.

6.1.2.8.4. Muestras de árido grueso reciclado 001

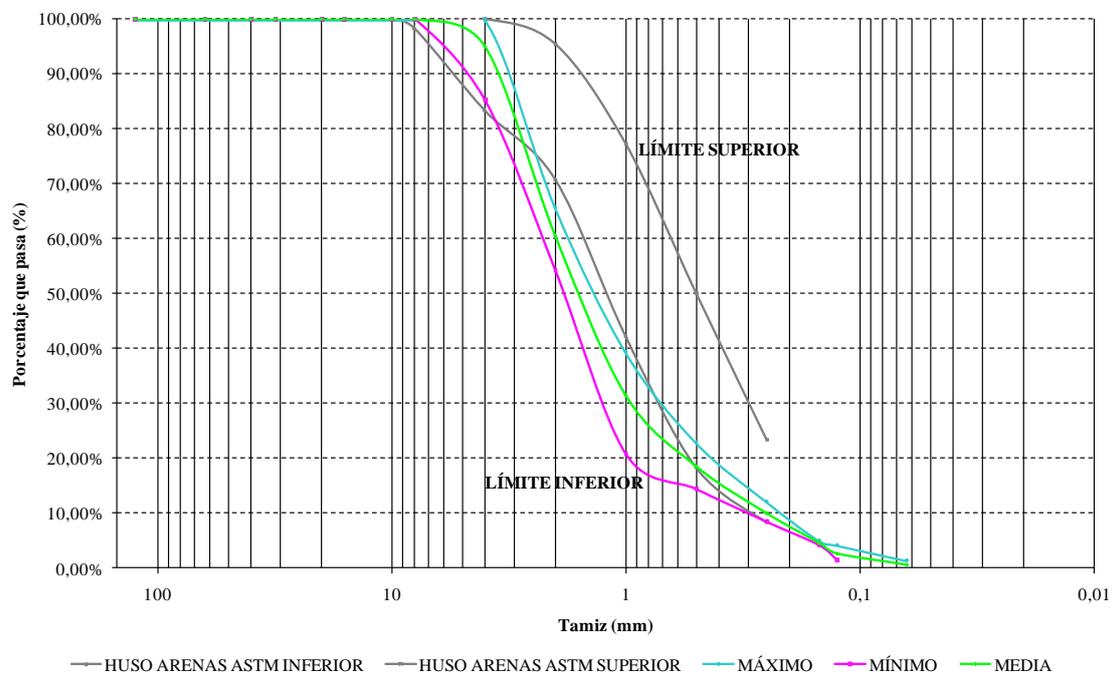
Las muestras de árido grueso reciclado procedentes de escombros triturados 001, al igual que las procedentes de hormigón triturado (H-001), sólo se han podido estudiar desde el punto de vista de su tamaño global a través del módulo granulométrico, presentando un módulo de 7.50 superior en un 12% respecto del ideal de Fuller (ver Tabla 96) (Dreux 1981, Fernández Cánovas 1989, García Meseguer 2001, Jiménez Montoya, García Meseguer et al. 2000). Se consideran, por tanto, viables para la confección de hormigón estructural siempre que se mezclen con la fracción arena adecuada necesaria para ajustarse a los husos granulométricos establecidos.

Figura 24. Muestras H-002 comparadas con los husos granulométricos del árido fino según la Instrucción EHE-08



Fuente: Elaboración propia

Figura 25. Muestras H-002 comparadas con los husos ASTM C 33-11



Fuente: Elaboración propia

Figura 26. Muestras H-002 comparadas con los husos Dreux

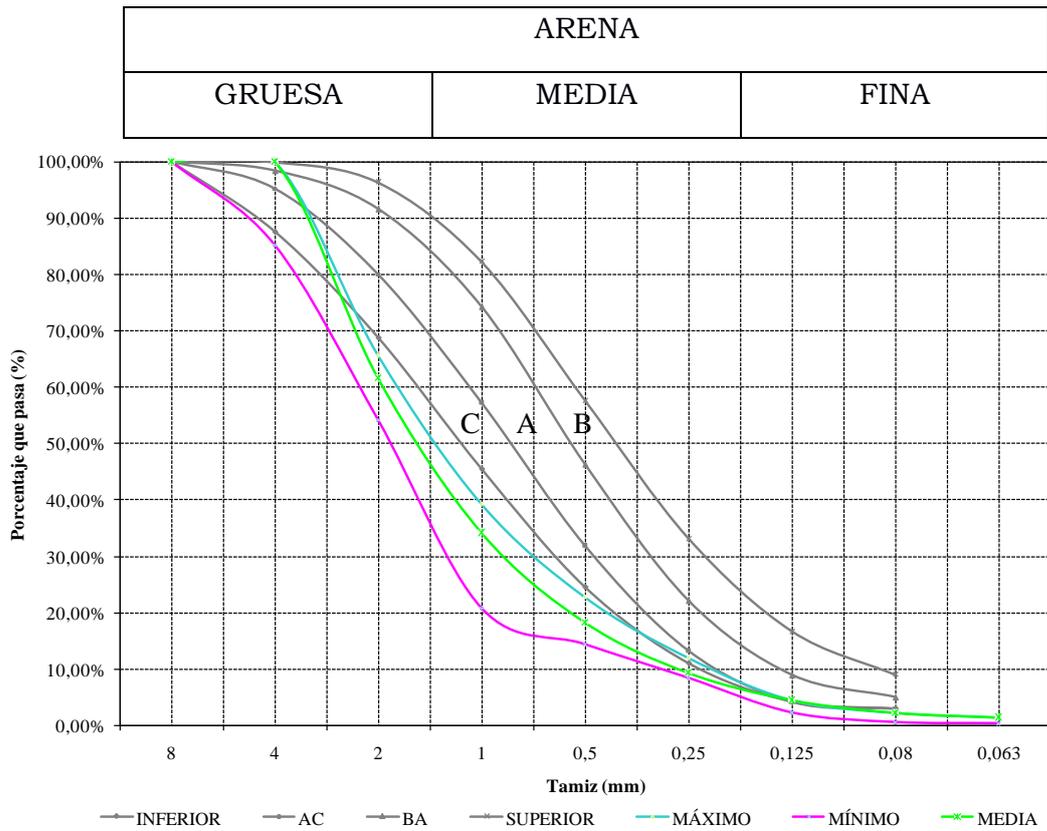
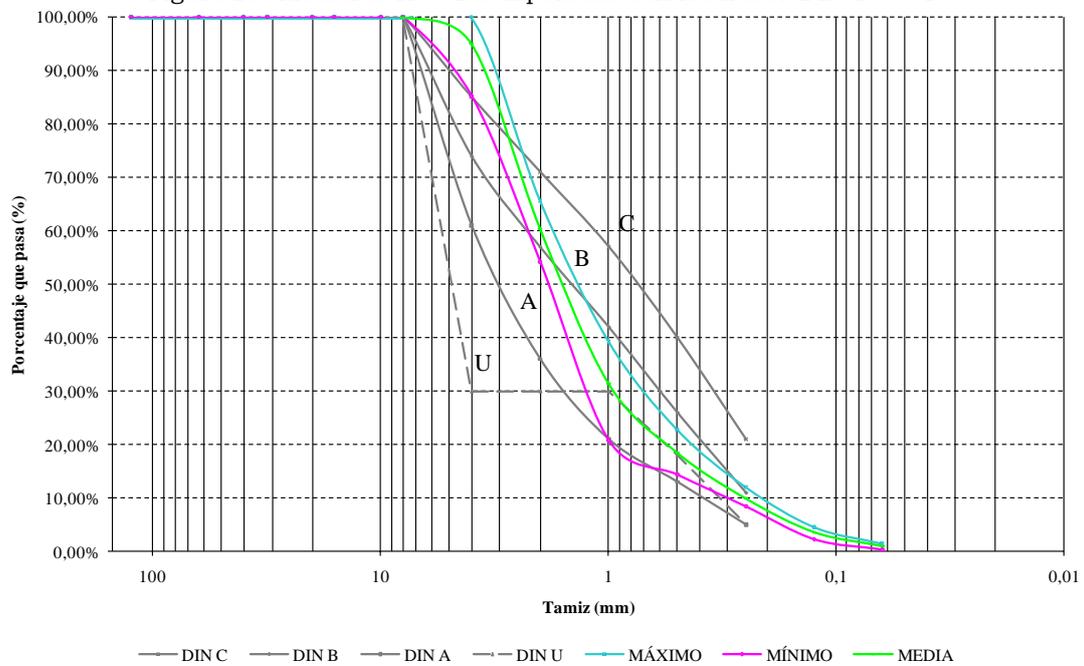


Figura 27. Muestras H-002 comparadas con los husos DIN 1045-1

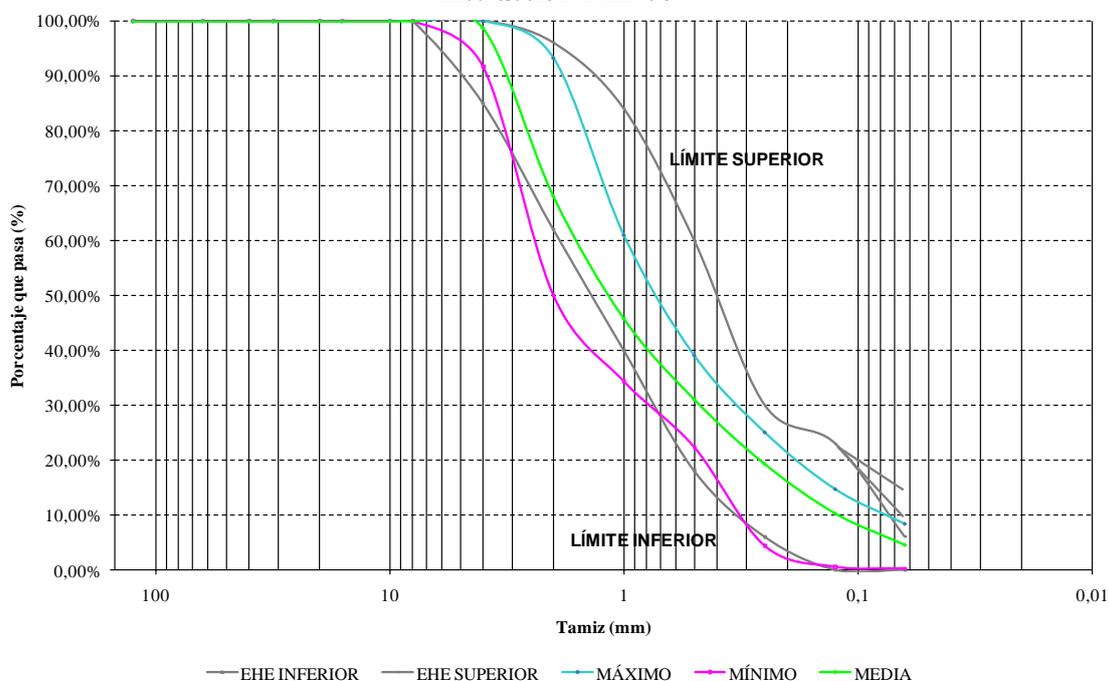


6.1.2.8.5. Muestras de árido fino reciclado 002

Las muestras de árido fino reciclado procedentes de escombros triturados denominadas como muestras 002 han sido estudiadas granulométricamente con respecto a los métodos de la Instrucción EHE-08, la norma alemana DIN 1045-1, la americana ASTM C 33-11, Dreux y Abrams (ASTM C 33-11 2011, DIN 1045-1 2008, Dreux 1981, EHE-08 2008, Fernández Cánovas 1989, García Meseguer 2001, Jiménez Montoya, García Meseguer et al. 2000), arrojando los siguientes resultados.

La arena reciclada procedente del escombros presenta una curva granulométrica continua y no uniforme que se dibuja completamente dentro de los husos recomendados por la Instrucción EHE-08 (Figura 28).

Figura 28. Muestras 002 comparadas con los husos granulométricos del árido fino según la Instrucción EHE-08

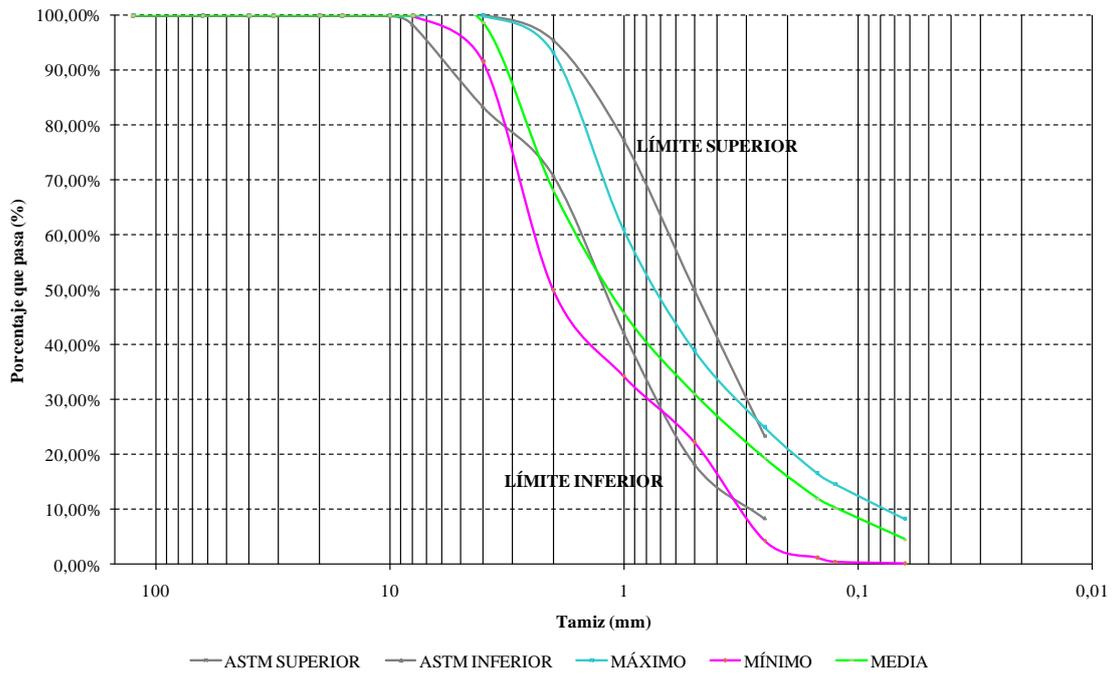


Fuente: Elaboración propia

No ocurre lo mismo con el resto de los métodos, donde se puede comprobar como para la norma ASTM C 33-11 (Figura 29) y los husos Dreux (Figura 30), esta arena reciclada resulta algo gruesa por la deficiencia de granos de entre 1 y 2mm, mientras que para la norma alemana DIN-1045-1 (Figura 31) resultaría relativamente fina.

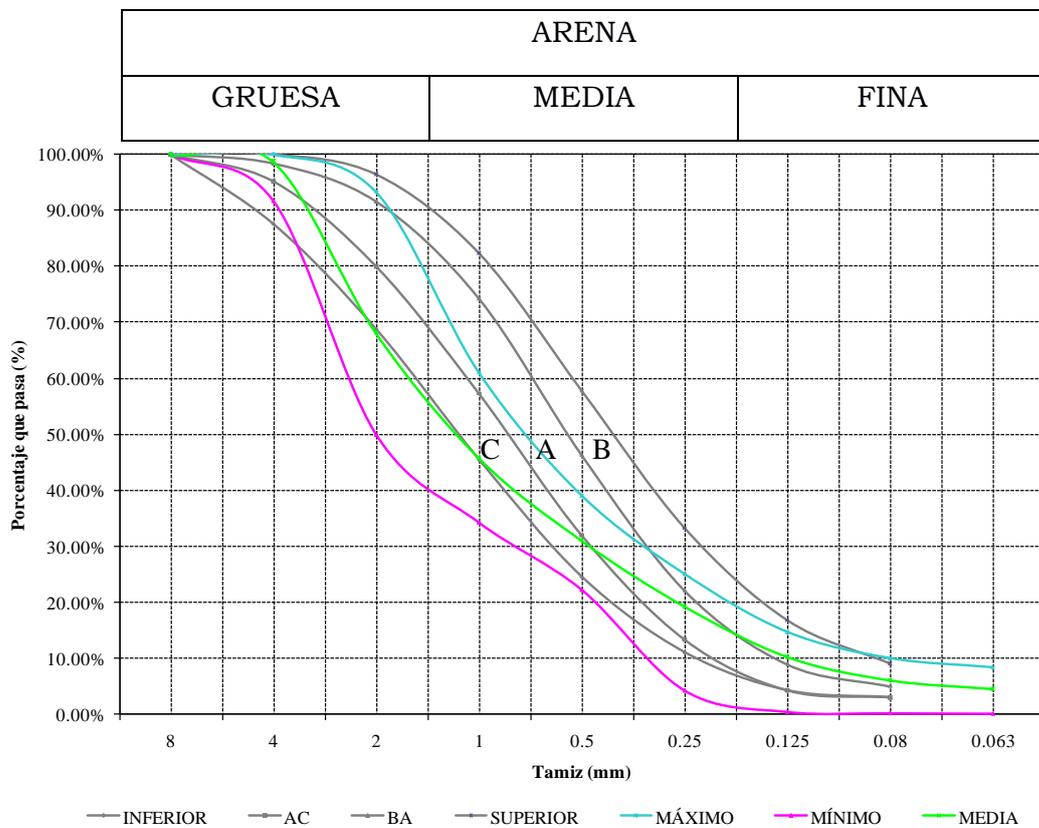
El método analítico de Abrams indica que la arena reciclada 002 con un módulo granulométrico de 3.27 (un 9% superior al de Abrams para su tamaño máximo según Tabla 96) resulta válida para confeccionar hormigón estructural.

Figura 29. Muestras 002 comparadas con los husos ASTM C 33-11



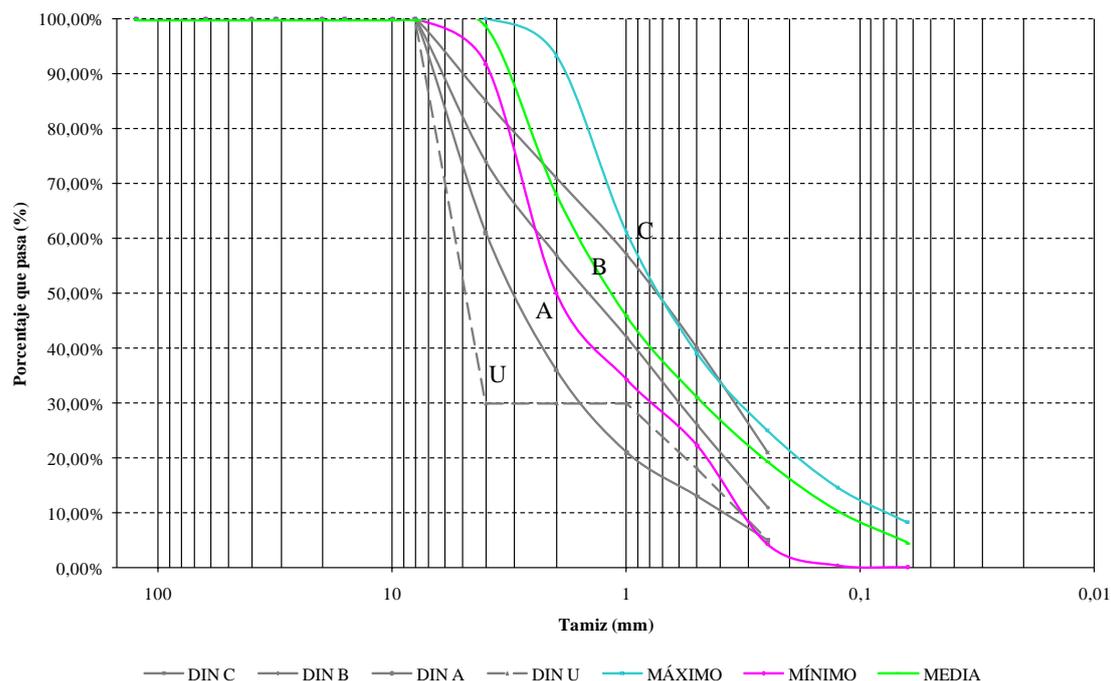
Fuente: Elaboración propia

Figura 30. Muestras 002 comparadas con los husos Dreux



Fuente: Elaboración propia

Figura 31. Muestras 002 comparadas con los husos DIN 1045-1



Fuente: Elaboración propia

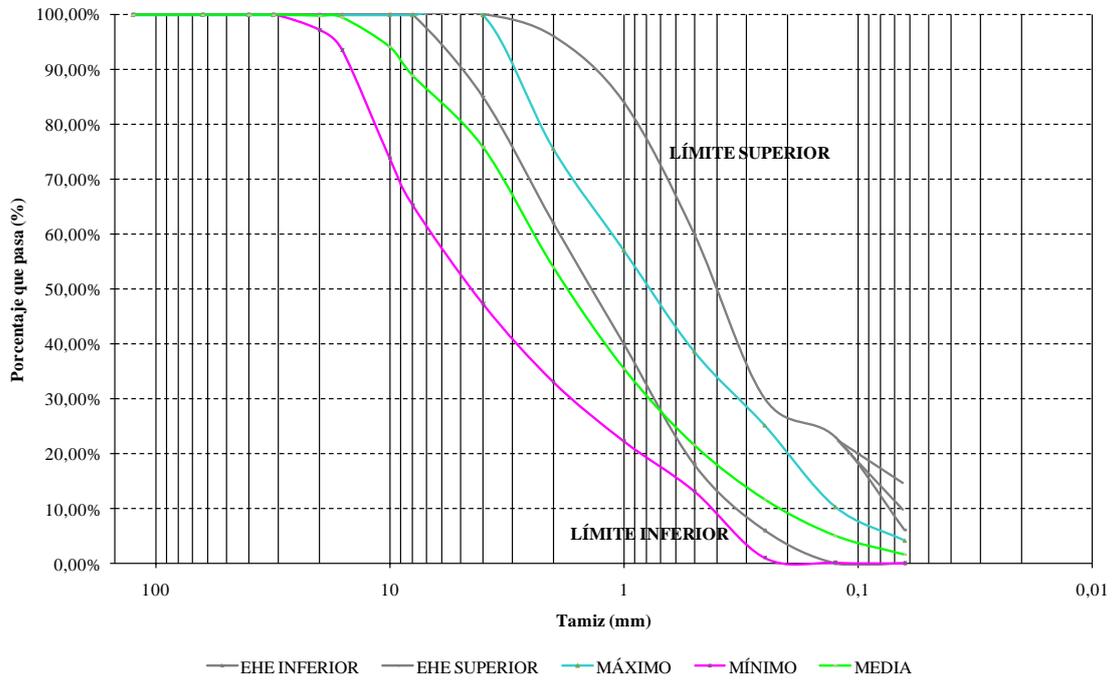
Por tanto, la arena reciclada procedente del escombros presenta una curva granulométrica más favorable para la elaboración de hormigón estructural que la procedente de hormigón triturado (H-002), ya que se ajusta mucho mejor a los métodos granulométricos establecidos.

6.1.2.8.6. Muestras de árido todo en uno reciclado 003

Las muestras de árido todo en uno reciclado procedentes de la separación en tromel de las tierras de excavación denominadas como muestras 003, por su tamaño máximo de 16mm, presentan ante un estudio granulométrico un tamaño pequeño como para ser árido grueso, por la carencia de granos de tamaño superior, siendo demasiado gruesas como para ser árido fino. Además, teniendo en cuenta que los métodos granulométricos gráficos establecidos para los áridos gruesos son aplicables sólo en el caso de que el tamaño máximo del árido sea superior a 20mm, se ha decidido utilizar los métodos granulométricos propios de las arenas (ASTM C 33-11 2011, DIN 1045-1 2008, Dreux 1981, EHE-08 2008, Fernández Cánovas 1989, García Meseguer 2001, Jiménez Montoya, García Meseguer et al. 2000), a sabiendas de que han de ser ajustadas eliminando el exceso de granos de más de 4mm.

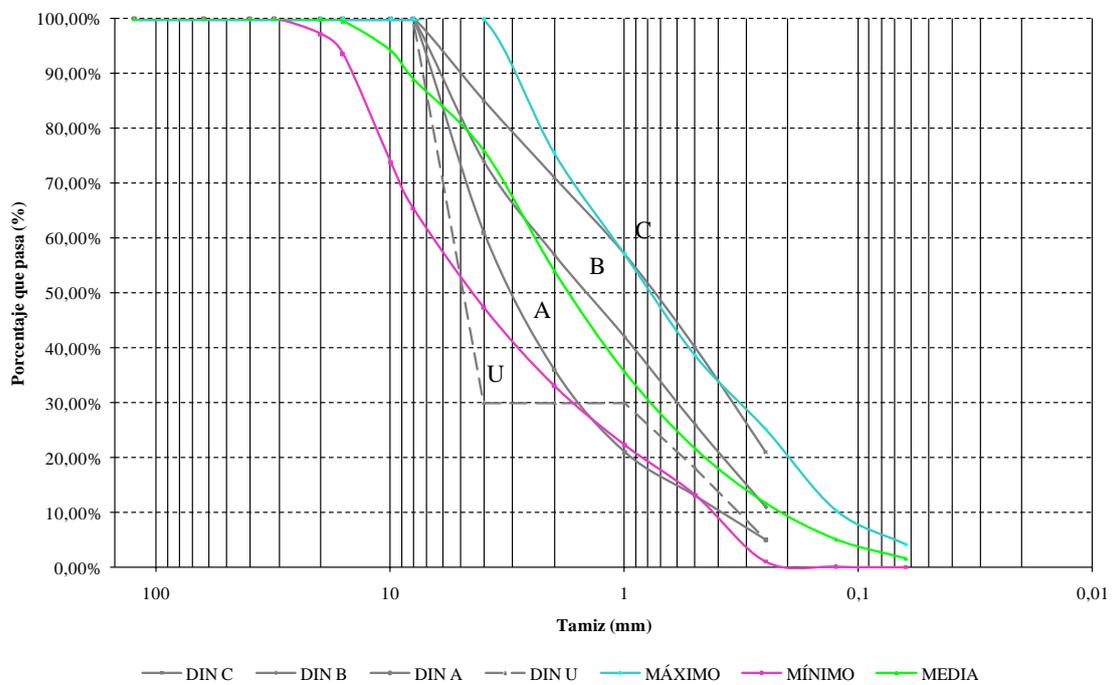
Como se puede observar de la Figura 32 a la Figura 35, esta fracción de granulometría continua y no uniforme resulta demasiado gruesa para los husos EHE-08, ASTM y Dreux, con una falta de granos de prácticamente todos los tamaños por encima de 1mm; no así para los alemanes DIN, donde la tierra reciclada sería favorable, a excepción de los tamaños superiores a 8mm.

Figura 32. Muestras 003 comparadas con los husos granulométricos del árido fino según la Instrucción EHE-08



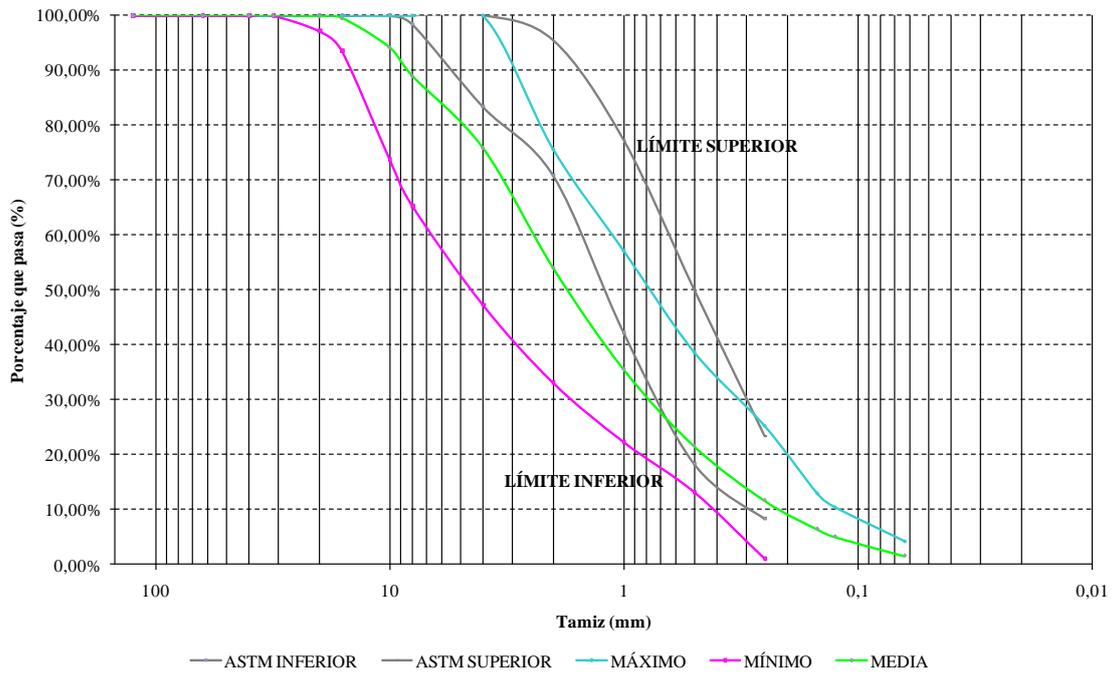
Fuente: Elaboración propia

Figura 33. Muestras 003 comparadas con los husos DIN 1045-1



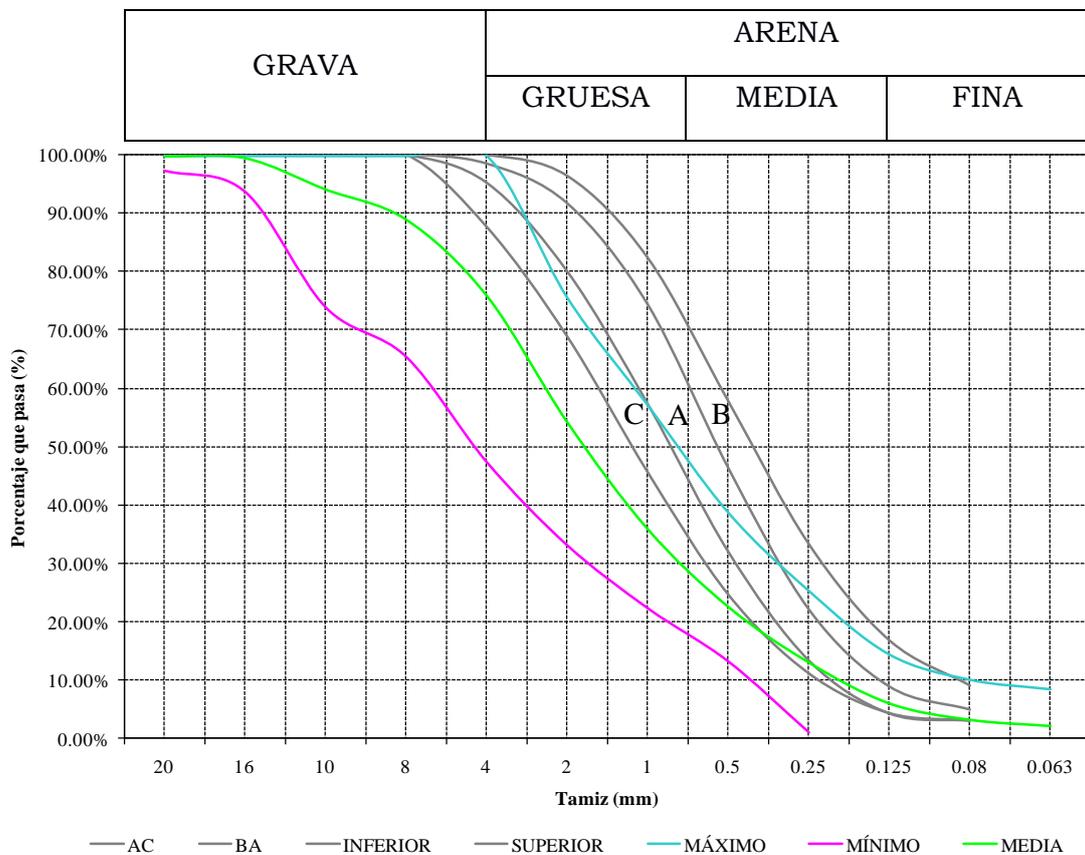
Fuente: Elaboración propia

Figura 34. Muestras 003 comparadas con los husos ASTM C 33-11



Fuente: Elaboración propia

Figura 35. Muestras 003 comparadas con los husos Dreux



Fuente: Elaboración propia

El módulo granulométrico de esta tierra vegetal reciclada de 4.07, un 15% inferior al de Fuller para su mismo tamaño (ver Tabla 96), muestra que es un material excesivamente grueso como para ser arena, cuyos módulos se mueven en torno a 3, a la vez que acusa una falta de granos de todos los tamaños. No obstante, sólo y exclusivamente desde el punto de vista de la granulometría, podría ser mezclada con una o varias fracciones gruesas para conformar un árido todo uno que proporcione una granulometría adecuada para la fabricación de hormigón.

6.1.2.8.7. Muestras de árido todo en uno reciclado 004

Las muestras de árido todo en uno reciclado procedentes de escombros triturados denominadas como muestras 004, aplicados los métodos granulométricos de Fuller, Bolomey, DIN 1045-1 y Abrams (DIN 1045-1 2008, Dreux 1981, Fernández Cánovas 1989, García Meseguer 2001, Jiménez Montoya, García Meseguer et al. 2000) arrojan los siguientes resultados:

Comparadas con la curva granulométrica de Fuller para el tamaño máximo 63mm (Figura 36), que es el presentado por la media de todas ellas, resulta poco relacionada la curva de las muestras 004 con la de Fuller para dicho tamaño, puesto que presentaría, por una parte, un exceso de granos de todos los tamaños exceptuando la fracción fina de menos de 0.125mm, y por otra, una amplia dispersión en los valores porcentuales del material que pasa por cada tamiz, oscilando la desviación entre 1.16% y 13.86%.

Si se intentan acotar las muestras que presentan el mismo tamaño máximo, aparecerían 4 grupos diferentes de muestras que tienen el mismo tamaño máximo: 6 muestras con tamaño 63mm, 4 con tamaño 31.5mm, 3 con 125mm y 2 con 40mm (

Figura 38 a Figura 41). Lo que indica que el proceso de producción en la planta varió durante el periodo de muestreo, en tanto que el tamaño de la abertura de salida de la trituradora fue modificado en función de sus necesidades comerciales.

De la observación de la Figura 38 a la Figura 41 se puede apreciar:

- Una gran dispersión de resultados, aun habiéndolas agrupado por tamaños máximos, cuyas desviaciones resultan algo inferiores a las presentadas para el conjunto de las muestras comparadas con Fuller de tamaño máximo 63mm, elevándose al 20.96% en el caso de las muestras de tamaño 31.5mm, que indicarían un defecto de control de material producido.
- Un predominio de curvas por encima de las de Fuller para todos los tamaños máximos (excepto para las muestras que presentan tamaño máximo 31.5mm), que indican un defecto de granos de todos los tamaños, demostrando que el tamaño máximo considerado por la Instrucción EHE-08 es superior al que realmente presentan las muestras, más acorde con los criterios establecidos por la anterior Instrucción EHE (EHE 1998) y por Fuller. Concretamente las muestras

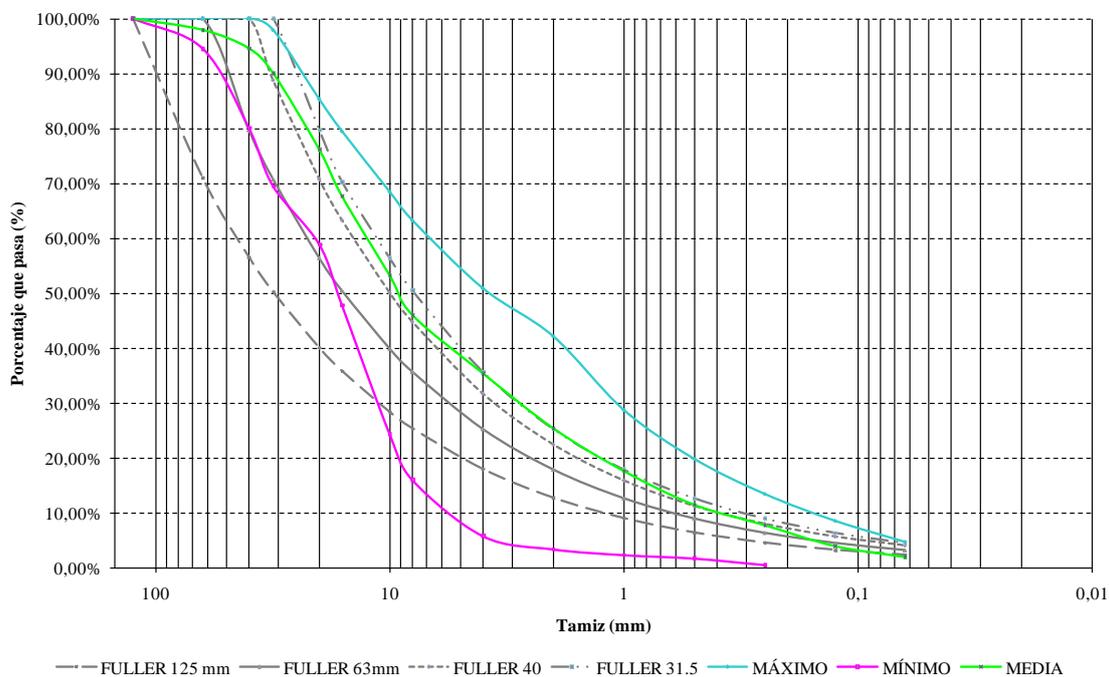
que teóricamente tienen un tamaño máximo 125, 63 y 40mm, se ajustan mucho mejor a la curva de Fuller para tamaño máximo 31.5mm salvo en los tamaños superiores a este, donde se evidencia una cantidad significativa de granos de tamaño superior a 31,5mm. Mientras que las muestras que poseen un tamaño máximo de 31.5mm se ajustan mucho mejor a la curva de referencia de Fuller para el correspondiente tamaño máximo de 40mm.

- El acotar los resultados granulométricos por grupos de tamaños máximos no indica una mejora de los resultados que evidencia nuevamente la falta de control de producción que presenta la planta de árido reciclado.

Se puede por tanto concluir que existe una significativa descompensación en el ajuste de áreas con respecto de la curva de Fuller.

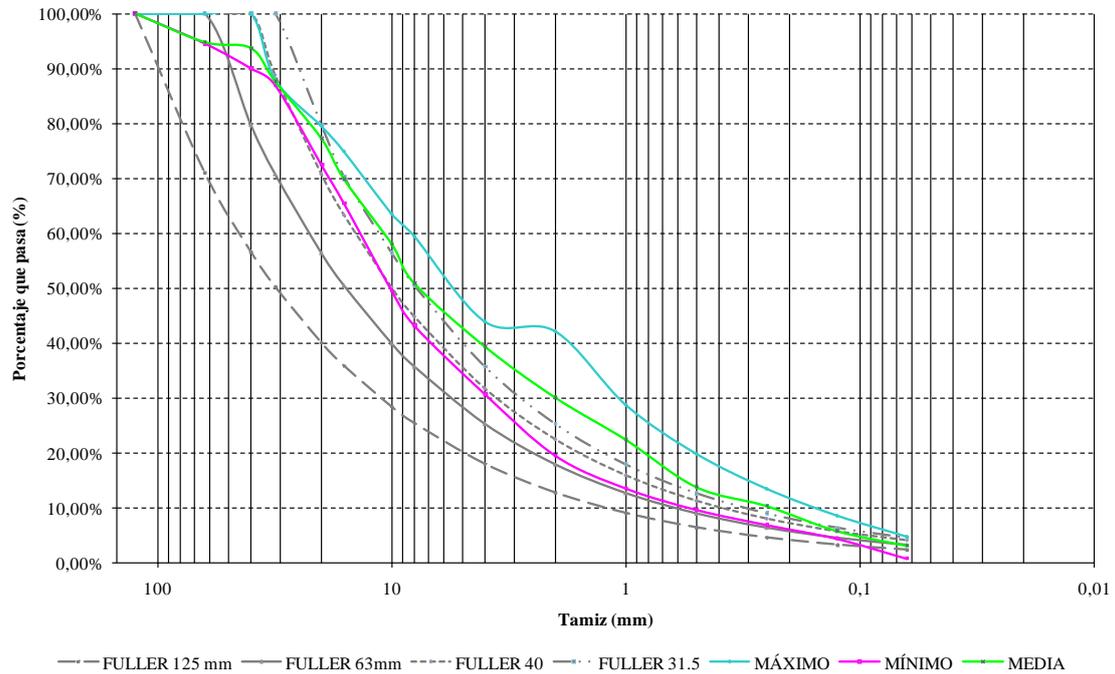
Así mismo, las muestras de árido reciclado procedente de escombro triturado 004 al compararlas con las de Bolomey para tamaño máximo 63mm (Figura 42) muestran un claro defecto de granos en prácticamente todos los tamaños, pero al compararlas con las curvas de menor tamaño máximo se observa una mejor compensación entre las áreas que quedan por debajo y por encima de las curvas de Bolomey (ver Figura 43).

Figura 37. Muestras 004 comparadas con la curva de Fuller para tamaño máximo 63mm



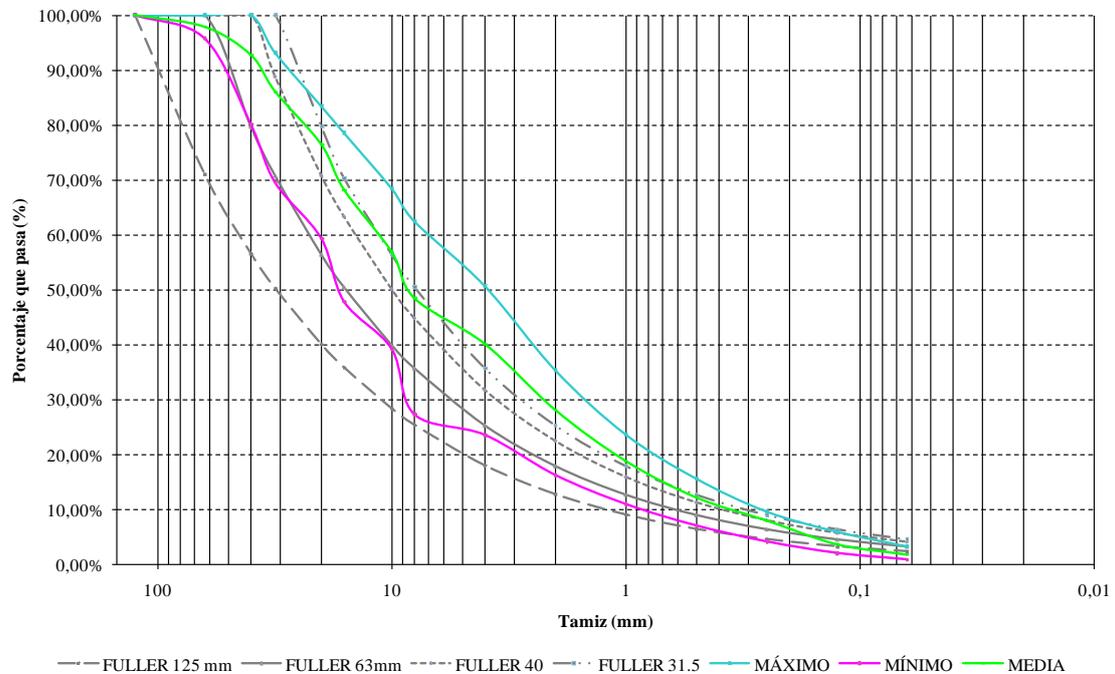
Fuente: Elaboración propia

Figura 38. Muestras 004 con tamaño máximo 125mm comparadas con la curva de Fuller para tamaño máximo 125, 63, 40 Y 31.5mm



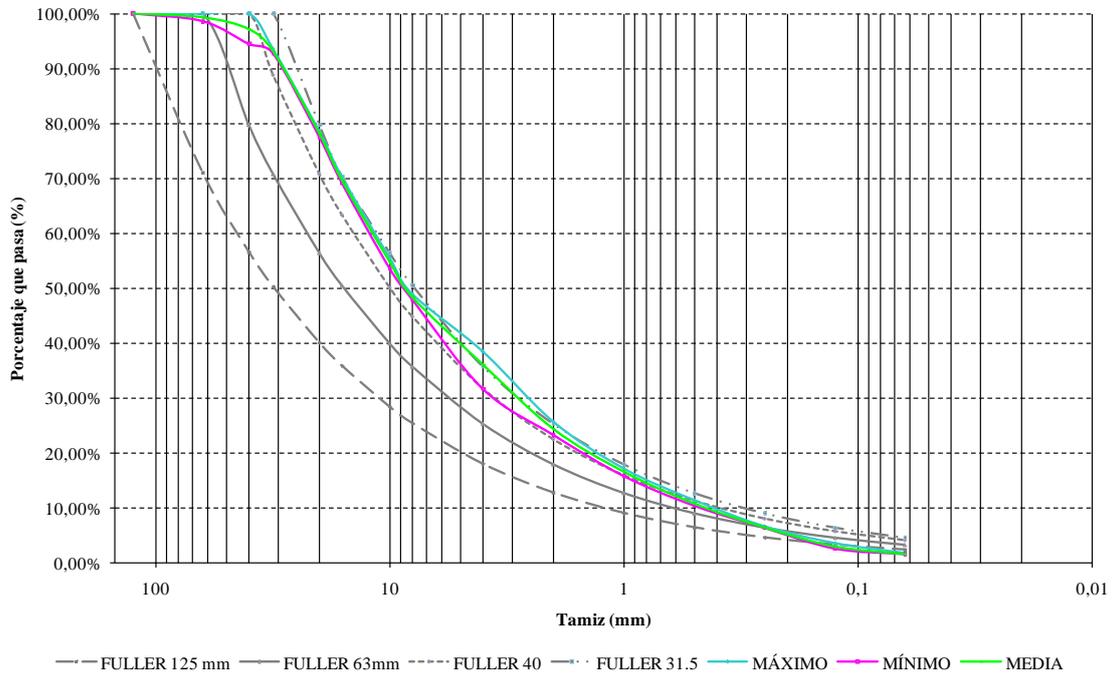
Fuente: Elaboración propia

Figura 39. Muestras 004 con tamaño máximo 63mm comparadas con la curva de Fuller para tamaño máximo 63, 40 y 31.5mm



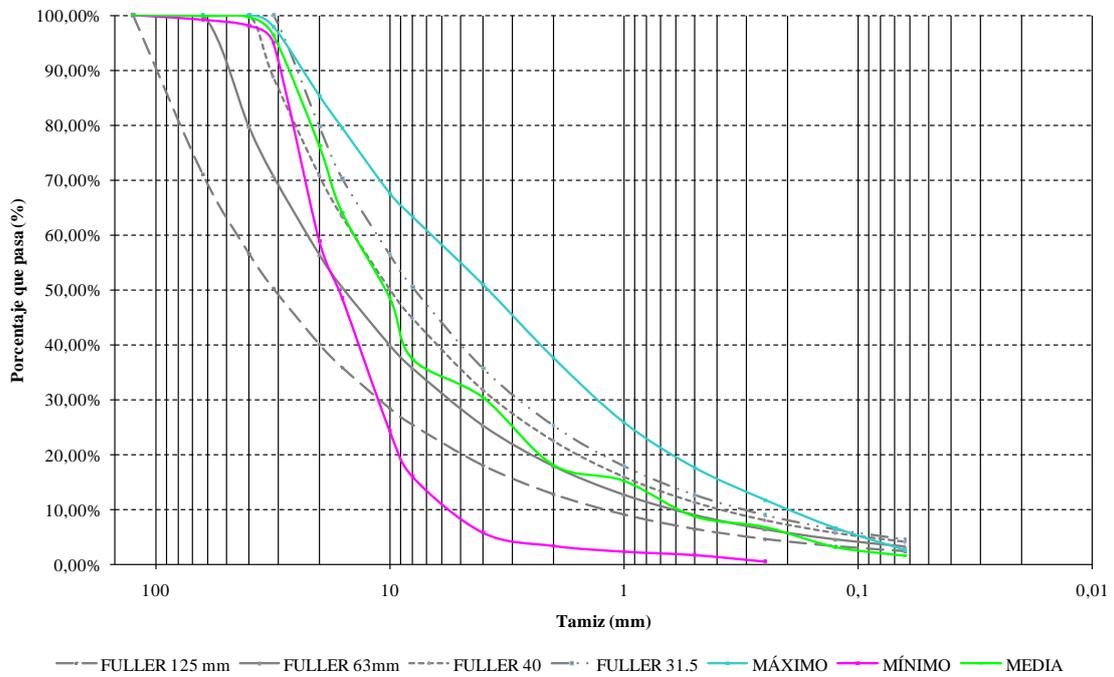
Fuente: Elaboración propia

Figura 40. Muestras 004 con tamaño máximo 40mm comparadas con la curva de Fuller para tamaño máximo 40 y 31.5mm

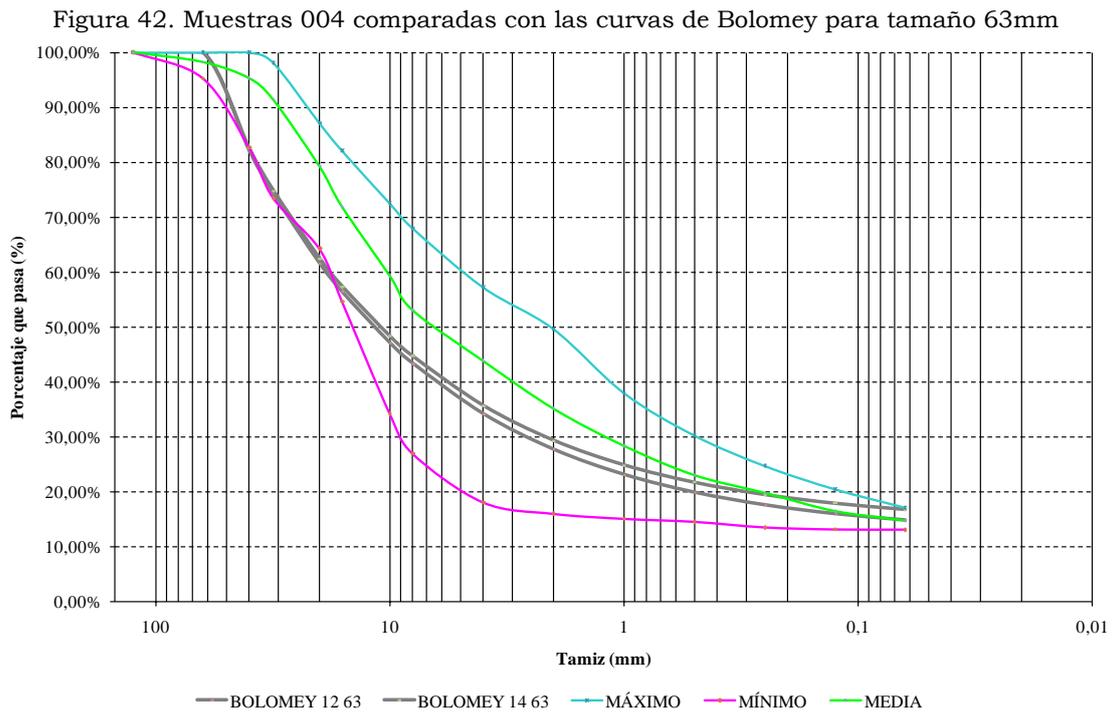


Fuente: Elaboración propia

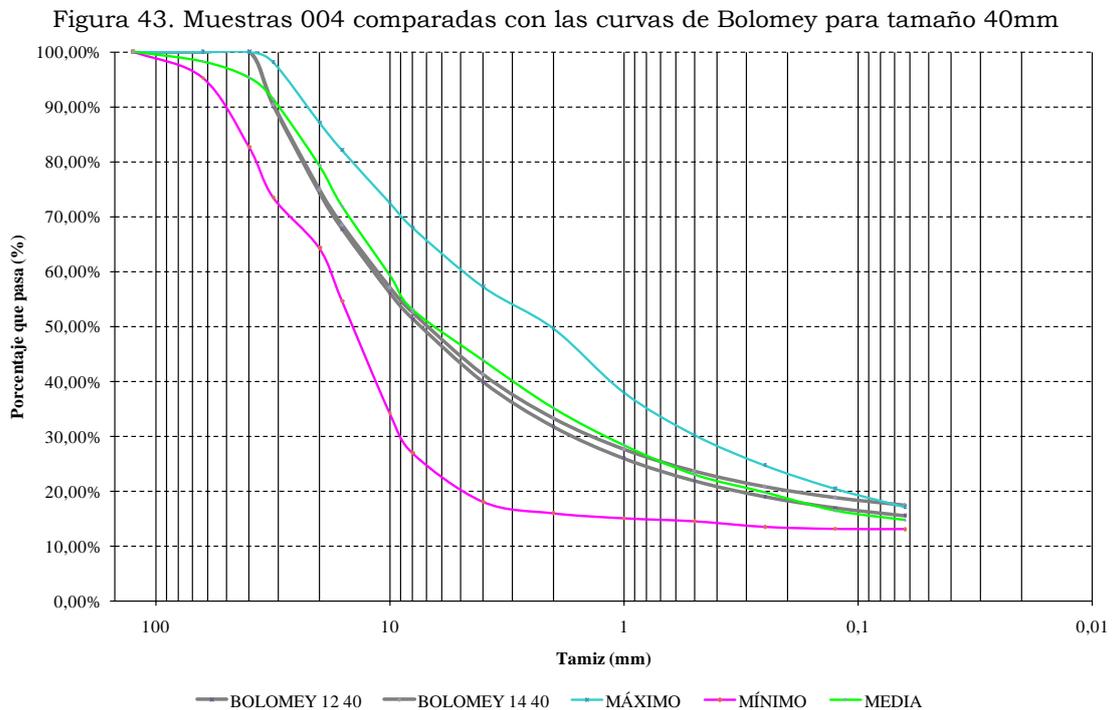
Figura 41. Muestras 004 con tamaño máximo 31.5mm comparadas con la curva de Fuller para tamaño máximo 40 y 31.5mm



Fuente: Elaboración propia



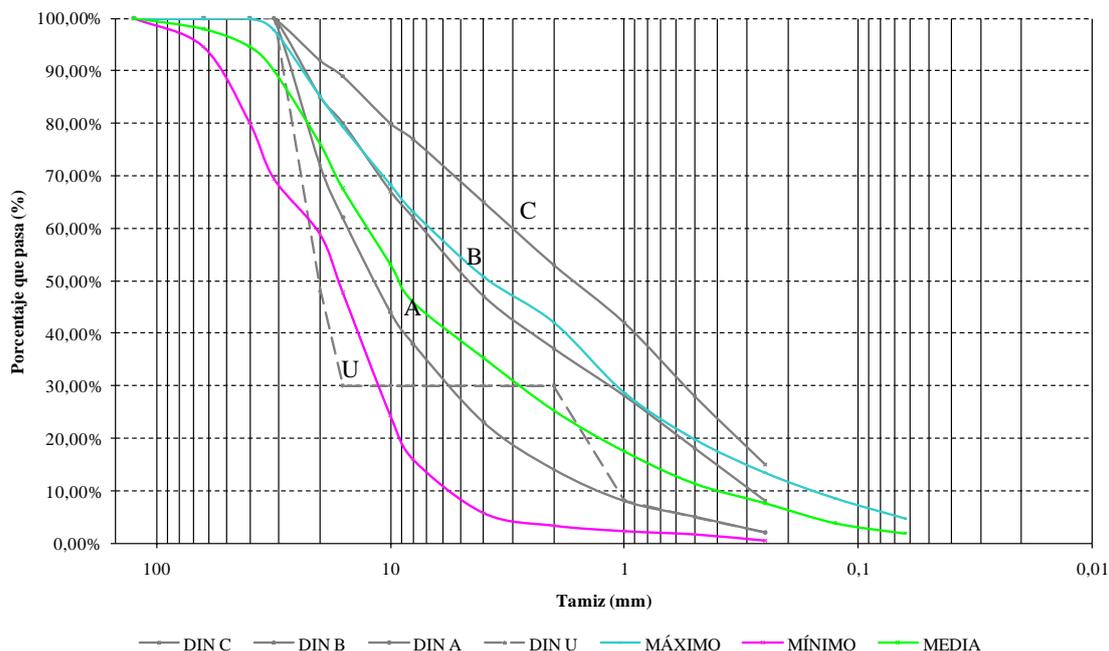
Fuente: Elaboración propia



Fuente: Elaboración propia

Finalmente, al compararlas con los husos DIN 1045-1 presentan una buena adaptación a las zonas más favorables de granulometría continua, aunque denotan un ligero defecto de granos de más de 10mm (Figura 44).

Figura 44. Muestras 004 comparadas con los husos DIN 1045-1 para tamaño 40mm



Fuente: Elaboración propia

Tabla 99. Módulos granulométricos de la muestra 004 para el tamaño máximo D

Muestra	D	MG	MG Fuller	MG/MG Fuller
004	63	5.99	6.68	0.90
004 con TM 125	125	5.80	7.61	0.76
004 con TM 63	63	5.91	6.68	0.88
004 con TM 40	40	5.94	6.09	0.98
004 con TM 31.5	31.5	6.29	5.73	1.10

Fuente: Elaboración propia

Respecto del tamaño global que presentan las muestras de árido todo uno triturado 004, el módulo granulométrico según Fuller para el tamaño máximo 63mm, tal y como se indica en la Tabla 99, resulta un 10% inferior al que debería presentar, lo que reafirma que la elección del tamaño máximo que se deriva de la Instrucción EHE-08 ha sido sobrevalorada con respecto a la que realmente presenta la media de las muestras. Si se obtuviesen los módulos granulométricos de las muestras que presentan el mismo tamaño máximo se puede observar igualmente una presencia residual de granos de gran tamaño hacen que las muestras presenten unos módulos granulométricos menores entre un 24% y un 12%, para las muestras que tienen tamaño máximo 125 y 63mm respectivamente. De igual manera las de tamaño máximo 31.5mm tienen un módulo granulométrico superior al de Fuller en un 10%. Finalmente, son las muestras que tienen tamaño máximo 40mm las que presentan un módulo granulométrico en un 2% inferior al de Fuller y por tanto las que más se ajustan al tamaño definido por este autor.

6.1.2.9. Evaluación de los finos

Los requisitos granulométricos que establece la instrucción EHE-08 (EHE-08 2008) en cuanto a los finos que aparecen en el árido, basados en las condiciones de cantidad y calidad, quedan presentadas en la Tabla 100.

El contenido en finos que contienen las muestras indica que, salvo las muestras de árido todo uno reciclado, el resto de muestras cumplen con la limitación impuesta por la EHE-08, observándose que el contenido en finos que presenta el árido fino reciclado procedente de escombros es más de 4 veces superior al del árido fino reciclado procedente de hormigón. Lo que podría indicar que, siendo el mismo proceso de fabricación, en la molienda, acopio y transporte del material, el escombros resulta más friable que el hormigón y, por tanto, de menor resistencia mecánica podría resultar el árido. No obstante lo anterior, como se puede comprobar en los resultados obtenidos por estos materiales reciclados en el ensayo de resistencia a la fragmentación de Los Ángeles que se evalúa a continuación, no se observan diferencias apreciables en el comportamiento resistente. Este aspecto se ha constatado en los estudios revisados en el apartado 4.6.3, donde los áridos reciclados con coeficientes de Los Ángeles en torno a 30 presentan un contenido en finos de 0.1% a 1.17% (Alaejos, Sánchez de Juan 2004, González-Fonteboa, Martínez-Abella 2008, Marinković, Radonjanin et al. 2010, Martín-Morales, Zamorano et al. 2011, Sánchez de Juan 2004, Yoon, Seo et al. 2007).

Respecto a la calidad de los finos que presenta el árido fino, ninguna de las muestras a las que se le ha practicado el ensayo cumple el requisito establecido por la Instrucción EHE-08, siendo el fino procedente de hormigón reciclado, con un 50.47 de media, el que se acercaría más al nivel de cumplimiento y el procedente de tierras de excavación, con un valor de 19.54, el que menos. El incumplimiento de esta prescripción por parte de los áridos reciclados no se debe a que el contenido en finos sea de naturaleza arcillosa, y por tanto perjudicial para el hormigón por exigir demasiada cantidad de agua y provocar entre otras expansiones indeseadas, sino más bien por su mayor friabilidad frente al árido natural, generándose una mayor cantidad de finos procedentes del mortero adherido.

Siguiendo las indicaciones del anexo 15 de la Instrucción, la limitación impuesta al árido reciclado en cuanto al contenido en partículas inferiores a 4mm, reduciría el uso del árido reciclado estudiado a las fracciones de árido grueso H-001 y 001, como se puede comprobar en la Tabla 100.

Finalmente, en la Tabla 100 se ha indicado la categoría del valor de equivalente de arena declarada a cada fracción según lo establecido en la norma UNE-EN 12620 (UNE-EN 12620:2003+A1 2009, prEN 12620 2013) así como en la Tabla 89 se estableció la categoría del valor de los finos declarada por el fabricante.

Tabla 100. Requisitos granulométricos del árido. Contenido en finos y calidad de la arena según EHE-08 y categoría declarada según UNE-EN 12620

Muestra	% que pasa #	Art.	Equivalente	Art.28	% partículas	Anx.	Categoría
---------	--------------	------	-------------	--------	--------------	------	-----------

	0.063mm	28	de arena ¹		< 4mm	15 EHE- 08	(SE)
H	0.21%±0.15%	<1.5%	50.47±6.20	(*)	17.79%±4.05%	<5%	SE ₄₅
H-001	0.00%±0.00%	<1.5%	-		0.00%±0.00%	<5%	-
H-002	1.04%±0.60%	(**)	50.47±6.20	(*)	95.07%±8.55%	<5%	SE ₄₅
001	0.00%±0.00%	<1.5%	-		0.00%±0.00%	<5%	-
002	4.54%±2.29%	(**)	39.62±11.16	(*)	98.82%±2.63%	<5%	SE ₃₅
003	1.53%±1.02%	<1.5%	19.54±4.02	(*)	75.87%±15.70%	<5%	SE _{Declared}
004	1.87%±1.16%	<1.5%	39.62±11.16	(*)	35.36%±13.19%	<5%	SE ₃₅
¹ Test realizado sobre la fracción 0/4 del árido que se hace extensivo a la porción fina de las muestras de árido grueso (*) >70-75 (**) <6-16%							

Fuente: Elaboración propia según EHE-08 y UNE-EN 12620

6.1.2.10. Resistencia a la fragmentación

La resistencia a la fragmentación que presenta el árido reciclado procedente de hormigón reciclado, al que una vez procesado para el ensayo se le ha denominado H-006, con un coeficiente de Los Ángeles medio de 29.27, es ligeramente superior a la mostrada por el escombros triturado 006, que presenta un coeficiente medio de 28.10. En ambos tipos de áridos reciclados este parámetro se encuentra en consonancia con los resultados de los estudios consultados (Alaejos, Sánchez de Juan 2004, Barbudo, Agrela et al. 2012, González-Fonteboa, Martínez-Abella 2008, Jiménez, Agrela et al. 2011, Marinković, Radonjanin et al. 2010, Martín-Morales, Zamorano et al. 2011, Padmini, Ramamurthy et al. 2009, WRAP 2007, Zhu, Wu et al. 2011), siendo ambas totalmente válidas para su uso como áridos en la fabricación de hormigón estructural (Tabla 101). No obstante, como se ha comentado en el apartado 4.6.3, no se observan diferencias apreciables según el árido reciclado sea de hormigón o de procedencia mixta.

Tabla 101. Resistencia al desgaste de Los Ángeles según EHE-08 y categoría declarada según UNE-EN 12620

Muestra ¹	Coeficiente de Los Ángeles	Limitación EHE-08	Categoría (LA) UNE-EN 12620
H-006	29.27±6.11	<40	LA ₃₀
006	28.10±0.69	<40	LA ₃₀
¹ Las muestras H-006 y 006 corresponden a las muestras H y 004 convenientemente procesadas por los tamices adecuados para serles practicadas el ensayo de resistencia a la fragmentación			

Fuente: Elaboración propia

Según la norma UNE-EN 12620 (UNE-EN 12620:2003+A1 2009, prEN 12620 2013) la categoría declarada de resistencia al desgaste según el ensayo de Los Ángeles de los áridos triturados procedentes de hormigón y escombros será en ambos casos de LA₃₀.

6.1.2.11. Contenido de materia orgánica

Las muestras estudiadas, como suele ser normal en este tipo de áridos (Barbudo, Agrela et al. 2012), no contienen materia orgánica determinada comparando el color de una disolución de las muestras con una sustancia patrón, según el ensayo cualitativo establecido por la UNE-EN 1744-1 (UNE-EN 1744-1 1999).

6.1.2.12. Contenido en sulfatos solubles en ácido

Como se ha constatado en el apartado 4.6.4.1., la presencia de sulfatos en las muestras de árido reciclado estudiado era totalmente previsible en los áridos reciclados estudiados debido a la significativa contaminación de yeso que llegan a presentar los residuos de construcción y demolición, por selectiva que sea la recogida de los residuos y la eliminación de yesos en planta de valorización. De hecho todos los áridos reciclados presentan compuestos de azufre en su composición y, en la mayoría de las ocasiones, en cuantía superior a la establecida por la normativa.

En la Tabla 102 se presentan los valores del contenido en sulfatos solubles de las distintas muestras, observándose que salvo las procedentes de hormigón triturado, el resto de muestras no cumplen con las prescripciones de la EHE-08 (EHE-08 2008). Es el árido reciclado procedente de escombros triturados el que presenta el valor medio más alto en sulfatos solubles en ácido, 2.91%, no cumpliendo la limitación del 0.80% exigido por la EHE-08 e incluso llegando a alcanzar un máximo de 4.61% en una de las muestras. Las muestras procedentes de tierras de excavación con un valor medio de 2.81% tampoco llegan a cumplir ninguna de ellas, alcanzando valores de hasta 4.25% en sulfatos solubles en ácido.

Tabla 102. Contenido en sulfatos solubles en ácido según EHE-08 y categoría declarada según UNE-EN 12620

Muestra	Sulfatos solubles en ácidos (%)			Limitación EHE-08	Categoría AS
	Valor medio	Valor mínimo	Valor máximo		
H-002	0.29	0.09	0.41	<0.80	AS _{0.2}
002	2.91	1.39	4.61	<0.80	AS _{Declared}
003	2.81	1.12	4.25	<0.80	AS _{Declared}

Fuente: Elaboración propia

La norma UNE-EN 12620 (UNE-EN 12620:2003+A1 2009, prEN 12620 2013), respecto del contenido en sulfatos solubles en ácido de las muestras estudiadas, asigna la categoría que ha de ser declarada por el fabricante que consta en la Tabla 102.

6.1.3. Análisis de resultados y discusión para la aplicación de árido reciclado en obras de carreteras según el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales PG-3

6.1.3.1. Clasificación de suelos

La clasificación de un suelo es de fundamental importancia para determinar de forma muy aproximada las características y propiedades geomecánicas del suelo de cara a su comportamiento en diferentes condiciones de obra.

Las clasificaciones más utilizadas en ingeniería civil se basan principalmente en la granulometría y en la plasticidad de los suelos, que van a ser los determinantes principales de su deformabilidad, compactabilidad o permeabilidad. Los métodos de clasificación más empleados son el Método Unificado de Clasificación de Suelos de Casagrande recogido por la normas americana ASTM D2487-11 (ASTM D2487-11 2011), el método A.A.S.H.T.O. (AASHTO M 145-91 2000) y la clasificación descrita en el artículo 330 del PG-3 (PG-3 1975).

Atendiendo al tamaño de partículas de las muestras de árido reciclado estudiadas se puede iniciar esta clasificación distinguiendo que todas las muestras estudiadas presentan la tipología básica de suelo granular de formas angulosas, con una baja proporción de partículas finas y por tanto de muy baja plasticidad que les proporcionaría a los suelos una resistencia exclusivamente por rozamiento entre partículas y una adecuada capacidad filtrante, haciéndolos por todo ello muy aptos para su aplicación en carreteras.

6.1.3.1.1. Clasificación ASTM

La clasificación de suelos descrita en la norma americana ASTM D2487-11 (ASTM D2487-11 2011) también conocida como Método Unificado de Clasificación de Suelos (USCS, Unified Soil Classification System) fue desarrollada tras la II Guerra Mundial a partir del método propuesto por Casagrande en 1942 para aeropuertos, basándose en tamaño de partículas de los suelos, sin tener en cuenta su estructura compactidad o cementación. Esta clasificación distingue los suelos llamados de grano grueso o granulares: gravas (G) y arenas (S), en base a un coeficiente que mide la capacidad filtrante del suelo denominado coeficiente de uniformidad (C_u) que le proporciona buena (W) o mala (P) graduación; y los suelos de grano fino o cohesivos: limos (M) y arcillas (C) que son los que presentan diferentes grados de plasticidad: alta (H) o baja (L).

La Tabla 103 recoge la clasificación de las muestras estudiadas desde el punto de vista de un suelo según la norma americana, siendo:

- las muestras H procedentes de hormigón triturado y las 004 procedentes de escombros triturados las consideradas como grava bien graduada y por tanto con una buena capacidad filtrante.
- Las muestras de árido grueso procedentes de hormigón y escombros triturados H-001 y 001 respectivamente, resultaron gravas mal graduadas por la falta de tamaños inferiores a 4mm, presentando una homogeneidad

en los resultados en tanto que sólo una muestra de cada una de las estudiadas para estos tamaños se clasificaría como grava bien graduada.

- Las muestras de arena procedente de hormigón triturado H-002 y de tierra vegetal 003, serían arenas bien graduadas, pero mientras en el primer caso no se presenta ninguna variación, en la tierra vegetal reciclada 4 de las 15 muestras serían arena mal graduada.

- Las muestras 002, que representan la arena obtenida del escombro triturado, son las que su comportamiento se define como arenas bien graduadas con presencia de finos de naturaleza limosa, mostrando 3 de las 15 muestras ensayadas una mala graduación.

Tabla 103. Clasificación de las muestras como suelo según el método ASTM

Muestra	Clasificación	Variaciones
H	GW	-
H-001	GP	1 muestra es GW
H-002	SW	-
001	GP	1 muestra es GW
002	SW-SM	4 muestras son SP, 4 muestras son SW, 1 muestra es SP-SM
003	SW	4 muestras son SP
004	GW	3 muestras son GP

Fuente: Elaboración propia

6.1.3.1.2. Clasificación A.A.S.H.T.O.

El método de clasificación de suelos de la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO M 145-91 2000) se utiliza cuando se pretende obtener una clasificación geotécnica precisa para su uso en carreteras, particularmente en terraplenes, subrasantes, subbases y bases. Este método establece 7 grupos de suelos basados en su granulometría y plasticidad, además de un octavo grupo que corresponde a los suelos orgánicos. La evaluación del suelo dentro de cada grupo se obtiene a partir de un índice de grupo calculado empíricamente, que ayuda en la evaluación de propiedades importantes del suelo en el diseño y clasificación de carreteras y aeropuertos cuyo comportamiento varía inversamente a su índice de grupo

Según el resumen de resultados presentado en la Tabla 104 para este método, en general el árido reciclado estudiado es un material granular, no plástico, al pertenecer al grupo A-1, que se caracteriza por ser una mezcla de grava, arena, limo y/o arcilla, en cantidades bien proporcionadas, proporcionándole al suelo baja permeabilidad y capilaridad, elasticidad casi nula, cambios de volumen muy pequeños, con un excelente comportamiento del terreno después de compactado, estable en tiempo seco y húmedo, prácticamente no presentando ningún fallo. Su uso sería excelente para coronación de terraplén y terraplenes menores de 10m y bueno-excelente para bases, subbases y terraplenes mayores de 10m.

Tabla 104. Clasificación de las muestras como suelo según el método AASHTO M 145-91

Muestra	MATERIALES GRANULARES					Clasificación A.A.S.H.O.
	GRUPO A-1					
	SUBGRUPO A-1-a			SUBGRUPO A-1-b		
	% QP #n°10 (2 mm) ≤50	% QP #n°40 (0.40 mm) ≤30	% QP #n°200 (0.080 mm) ≤15	% QP #n°40 (0.40 mm) ≤50	% QP #n°200 (0.080 mm) ≤25	
H	11.30	3.37	0.21			A-1-a
H-001	0.00	0.00	0.00			A-1-a
H-002	60.50	18.50	1.04	18.50	1.04	A-1-b
001	0.00	0.00	0.00			A-1-a
002	68.15	31.06	4.54	31.06	4.54	A-1-b
003	53.97	21.53	1.53	21.53	1.53	A-1-b
004	25.33	11.40	1.87			A-1-a

Fuente: Elaboración propia

Concretamente las fracciones de árido grueso reciclado procedentes de hormigón triturado H y H-001, la procedente de escombros triturado 001 y la fracción todo uno procedente de escombros triturado 004 se clasifican como A-1-a, es decir, como gravas con o sin ligante bien graduado de material fino. Por su parte las fracciones de árido fino procedentes de hormigón y escombros triturado H-002 y 002 y la fracción todo uno procedente de tierras de excavación 003 se clasifican como A-1-b, descritas por el método como arenas gruesas con o sin ligante de suelo bien graduado.

6.1.3.1.3. Clasificación del artículo 330 del PG-3

El artículo 330 del PG-3 incluye una clasificación de suelos exclusivamente para la formación de rellenos en forma de suelos seleccionados (SS), adecuados (SA), tolerables (ST), marginales (SM) o inadecuados (SI) según su granulometría, plasticidad, capacidad del soporte o resistencia a la deformación, posibilidad de entumecimiento y contenido en materia orgánica.

En la Tabla 105 a la Tabla 107 se presentan los condicionantes que deben de cumplir los suelos para ser clasificados según el artículo 330 del PG-3, observándose que ninguna muestra estudiada puede considerarse como suelo seleccionado ni adecuado, siendo las muestras procedentes de hormigón triturado las que obtienen la clasificación de suelo tolerable, mientras que las procedentes de escombros triturado y tierra de excavación serían suelos marginales. Indiscutiblemente es el contenido en sales solubles el determinante para que las muestras estudiadas no obtengan una mejor clasificación en materia de carreteras, puesto que los requisitos granulométricos contemplados los cumplen la mayoría de las muestras para los mejores niveles de clasificación, y aquellas que no los cumplen pueden alcanzarlo con los ajustes granulométricos necesarios que se estudiarán más adelante en las aplicaciones concretas del articulado del PG-3.

Tabla 105. Cumplimiento de los requisitos granulométricos según clasificación de suelos del artículo 330 del PG-3

Muestra	CLASIFICACIÓN DE SUELOS SEGÚN PG-3								
	SUELOS SELECCIONADOS								
	D _{máx} ¹ ≤ 100mm	MO < 0.2 (%)	SS ² < 0 (%)	A	Si no cumple A, entonces				
% QP # 0.40mm ≤ 15				% QP # 2mm < 80	% QP # 0.40mm < 75	% QP # 0.080mm < 25	LL < 30	IP < 10	
H	20	0		3.37	11.30	3.37	11.30		
H-001	20	0		0.00	0.00	0.00	0.00		
H-002 ³	2	0	0.29	18.50	60.50	18.50	60.50		
001	31.5	0		0.00	0.00	0.00	0.00		
002	2	0	2.91	31.06	68.15	31.06	68.15	27.70	3.31
003	8	0	2.81	21.53	53.97	21.53	53.97	28.72	6.71
004	20	0		11.40	25.33	11.40	25.33		

¹El tamaño máximo se define en el artículo 510, relativo a las zahorras, como la abertura del primer tamiz que retiene más de un 10% en masa

² EL ensayo de sales solubles se hace extensivo a todas las muestras pues el proceso de obtención de la muestra de ensayo consiste en triturar la muestra a la fracción 0/0.125mm

³ Las muestras H-002 no presentaron plasticidad

Fuente: Elaboración propia

Tabla 106. (Continuación) Cumplimiento de los requisitos granulométricos según clasificación de suelos del artículo 330 del PG-3

Muestra	CLASIFICACIÓN DE SUELOS SEGÚN PG-3						
	SUELOS ADECUADOS						
	D _{máx} ≤ 100mm	MO<1(%)	SS<0.2(%)	% QP# 2mm< 80	% QP# 0.080mm< 35	LL<40	Si LL>30 IP>4
H	20	0		11.30	11.30		
H-001	20	0		0.00	0.00		
H-002	2	0	0.29	60.50	60.50		
001	31.5	0		0.00	0.00		
002	2	0	2.91	68.15	68.15	27.70	
003	8	0	2.81	53.97	53.97	28.72	
004	20	0		25.33	25.33		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 107. Cumplimiento de los requisitos granulométricos según clasificación de suelos del artículo 330 del PG-3

Muestra	CLASIFICACIÓN DE SUELOS SEGÚN PG-3							
	SUELOS TOLERABLES					SUELOS MARGINALES		
	MO <2 (%)	SS ¹ <1 (%)	Asiento colapso ² <1 (%)	Hinchamiento libre <3 (%)	LL<65	MO<5 (%)	Hinchamiento libre <5 (%)	Si LL>90 IP>0.73 (LL-20)
H	0			0		0	0	
H-001	0			0		0	0	
H-002	0	0.29		0	-	0	0	
001	0			0		0	0	
002	0	2.91		0	27.70	0	0	
003	0	2.81		0	28.72	0	0	
004	0			0		0	0	

¹ EL ensayo de sales solubles se hace extensivo a todas las muestras pues el proceso de obtención de la muestra de ensayo consiste en triturar la muestra a la fracción 0/0.125mm

²El ensayo de colapso no se realizó por no ser un suelo de grano fino

Fuente: Elaboración propia

6.1.3.2. Compactación

La compactación es un tratamiento tradicional, eficaz y económico de densificación por pérdida de aire de los materiales que van a conformar un suelo, que lo mejora, para que sea capaz de resistir las sollicitaciones a las que va a estar sometidos con unas deformaciones admisibles, obteniéndose por lo tanto la estabilidad volumétrica, resistencia mecánica e inalterabilidad necesaria frente a agentes externos que se le exige a toda explanación y capas de firme (Kraemer, Morilla Abad 1997).

El comportamiento de un suelo frente a la compactación depende del si su naturaleza es granular o cohesiva, obteniéndose una mejora significativa en los suelos de grano fino muy plásticos ensayados por el procedimiento de próctor modificado frente al normal, que no se distingue tanto en los suelos granulares bien graduados (Kraemer, Pardillo et al. 2009).

En este estudio el ensayo de compactación se ha realizado sobre los tres tipos de muestras de material reciclado (hormigón y escombros triturados y tierra vegetal reciclada), habiendo sido necesario una redesignación de las mismas por la necesidad de ser procesadas granulométricamente según indican los métodos de ensayo proctor normal y modificado UNE-EN 103500 y UNE-EN 103501, respectivamente (UNE 103500 1994, UNE 103501 1994). Las muestras estudiadas por tanto han sido:

- H-005, muestra procedente del hormigón triturado procesada por el tamiz 20mm según exige el método de ensayo.
- 003, muestra de tierra vegetal reciclada que pasa por el trómel y por tanto sin procesar,
- 005, muestra procedente del escombros triturados procesada de la misma manera que la anterior.

Como se puede observar en la Tabla 108 los tres tipos de muestras ensayadas alcanzan densidades secas superiores a 2kg/cm^3 , muy similares a las alcanzadas por materiales que conforman suelos granulares naturales, si bien el contenido en humedad óptimo es bastante superior.

El aumento de densidad que experimentan los materiales reciclados no es destacable al aplicar ambos métodos de compactación, aunque si es de valorar un descenso significativo en la cantidad de agua que demandan para alcanzar su grado máximo de compactación, salvo en el material reciclado proveniente de tierras de excavación que necesita una mayor cantidad de agua.

La buena densidad óptima que llega a presentar este tipo de áridos reciclados se debe en gran medida a la presencia de material cerámico en su composición (Agrela, Barbudo et al. 2012), lo que proporciona una gran densificación en el normal proceso de compactación en laboratorio.

Tabla 108. Resultados ensayos próctor normal, próctor modificado y resistencia a compresión simple

Muestra	Próctor normal			Próctor modificado		
	Densidad máxima (g/cm ³)	Humedad óptima (%)	Resistencia compresión (Kg/cm ²)	Densidad máxima (g/cm ³)	Humedad óptima (%)	Resistencia compresión (Kg/cm ²)
H-005	2.249 ±0.009	19.14±0.84	1.15±0.53	2.329 ± 0.011	15.79±3.22	2.94±0.24
003	2.210 ±0.047	16.68±2.43	9.22±4.75	2.300 ±0.042	16.74±5.00	24.19±12.43
005	2.169 ±0.106	17.77±2.95	3.29±2.81	2.267 ±0.102	15.45±2.94	8.79±7.84

Fuente: Elaboración propia

Distinguiendo los resultados por tipo de material ensayado se observa que las muestras procedentes de hormigón triturado son las que presentan un mayor grado de compactación frente a las de escombros triturado, demandando ambas una mayor cantidad de agua que la tierra reciclada, lo que se puede deber a la procedencia de sus finos, mortero y material cerámico respectivamente, con alto grado de absorción de agua. Por el contrario, aun siendo el aumento de densidad progresivo en los tres tipos de material ensayado por el procedimiento de próctor modificado, la demanda de agua es menor en todas las muestras salvo, significativamente, en la tierra reciclada, que necesita más agua para lubricar sus partículas que con el ensayo de próctor normal, y por el propio método de ensayo siempre debe de resultar menor. Este aspecto podría deberse a una mayor cantidad de granos finos con mayor superficie específica en la tierra reciclada que por tanto necesitan más agua para ser lubricados en el proceso de compactación.

Según Kraemer y Morilla (Kraemer, Morilla Abad 1997) las características generales de compactación de los distintos tipos de suelos para la clasificación AASHTO indican que un suelo A-1 alcanzaría una densidad seca máxima de 1.85 a 2.25 kg/dm³ con una humedad óptima de entre 7 y 15%, por lo que los tres tipos de material estudiados muestran una densidad máxima muy en consonancia con ésta, con valores de humedad óptima significativamente superiores más propia de un suelo de carácter arcilloso.

Destacable resulta la resistencia a compresión simple de las probetas después del ensayo que se multiplica casi por tres en el caso de las probetas próctor modificado con respecto de las normales, destacando las muestras procedentes de tierra reciclada, que según se puede constatar en la Tabla 108, si bien cuentan con densidades muy similares, llegan a alcanzar una resistencia que oscilan entre 9.22 y 24.19 kg/cm², para el ensayo próctor normal y modificado respectivamente, debido a la mayor cohesión de sus finos respecto de los del hormigón y escombros triturado.

Para obtener la máxima densidad seca y el contenido en humedad óptimo de cada una de las muestras ensayadas se ha utilizado el método gráfico (ASTM D 5080-

08 2008)propuesto por el profesor J.W. Hilf, adoptado por la norma ASTM D 5080-08 (ASTM D 5080-08 2008).

6.1.3.3. Cumplimiento del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para obras de Carreteras y Puentes PG-3

El PG-3 se estructura en 8 partes de las cuales se ha estudiado la aplicación del árido reciclado para los usos definidos en los artículos correspondientes a las partes 3 de explanaciones, 4 de drenajes y 5 de firmes (PG-3 1975).

A continuación se presentan las posibles aplicaciones del árido reciclado estudiado como suelo. En este caso, y a diferencia del estudio sobre la Instrucción EHE-08 que se hizo evaluando cada una de las prescripciones, se ha procedido a estudiar la viabilidad de las distintas muestras de árido reciclado para cada uno de los usos definidos en cada artículo del pliego PG-3, incluyendo los aspectos granulométricos y los requisitos físicos, mecánicos y químicos.

6.1.3.3.1. Artículo 330: Terraplenes (Parte 3: Explanaciones)

Los rellenos tipo terraplén consisten en la extensión y compactación, por tongadas, de materiales granulares, en zonas de tales dimensiones que permitan de forma sistemática la utilización de maquinaria pesada con destino a crear una plataforma sobre la que se asiente el firme de una carretera.

En todo caso los suelos indicados para la construcción de terraplenes son los que resulten fácil de compactar y una vez compactados sean resistentes a la deformación, poco sensibles a las variaciones de humedad y a las heladas. Por ello son preferibles los suelos granulares, de granulometría continua, con una proporción pequeña de finos poco plásticos y sin piedras de gran tamaño. La presencia de finos es deseable pues ayudan en el proceso de compactación de las arenas que son difíciles de compactar. (Kraemer, Pardillo et al. 2009).

La AASHTO M 57-80 (AASHTO M 57-80 1964) especifica que los materiales reciclados estudiados clasificados como A-1 pueden ser empleados en carreteras en terraplenes de más de 15m de altura.

Las características de los materiales empleados para la ejecución de rellenos tipo terraplén estarán constituidos por materiales que cumplan alguna de las dos condiciones granulométricas contempladas en la Tabla 109, observándose que todas las muestras estudiadas salvo la fracción gruesa del escombros reciclado 001, pueden ser utilizadas para este tipo de rellenos por tener un porcentaje que pasa por el tamiz 20mm superior al 70% en masa. Por el contrario no cumpliría ninguna de las fracciones la condición alternativa de que el porcentaje que pasa por el tamiz de 0.08mm sea mayor o igual que el 35% del peso del material.

Tabla 109. Cumplimiento de los requisitos granulométricos para rellenos tipo terraplén según PG-3

Muestra	RELLENOS TIPO TERRAPLÉN	
	% QP # 20 > 70%	% QP # 0.08 ≥ 35%
H	80.98%	0.21%
H-001	76.30%	0.00%
H-002	100.00%	1.04%
001	62.92%	0.00%
002	100.00%	4.54%
003	99.81%	1.53%
004	76.13%	1.87%

Fuente: Elaboración propia

Diferenciando el uso del material reciclado por las 4 zonas de un terraplén se puede afirmar que según los requisitos específicos de cada zona:

- Para su uso en la coronación, que es la zona más exigente del terraplén, se requieren suelos adecuados o seleccionados con un índice CBR mínimo de 5, ninguna de las muestras ensayadas podría conformar la coronación de un terraplén.
- Para su uso en el cimientó y núcleo, se emplearán suelos tolerables, adecuados o seleccionados con un índice CBR mínimo de 3. Teniendo en cuenta que los áridos reciclados procedentes de hormigón triturado han alcanzado la clasificación como suelos tolerables y que según otras investigaciones (Martín-Morales, Zamorano et al. 2011) la capacidad de soporte medida a través del índice CBR de este material es capaz de superar ampliamente el valor límite impuesto, tan sólo este árido reciclado procedente de la trituración de escombros se podría utilizar en las zonas de cimientó y núcleo de un terraplén.
- Para su uso como espaldones, todas las muestras estudiadas podrían ser empleadas, salvo las arenas procedentes de escombros triturados que no cumplen los requisitos granulométricos.

La presencia de yeso y sales solubles en el suelo limita también su utilización o la supedita a la adopción de medidas especiales. Los materiales que tengan un contenido en sales solubles entre 0.2 y 2% se podrá utilizar en el núcleo del terraplén sin llegar a adoptar medidas especiales en coronación y espaldones, por lo que atendiendo a este criterio las muestras de hormigón reciclado podrán emplearse definitivamente como núcleo de terraplén por alcanzar un valor medio en sales solubles de 0.29%.

Cuando el material contiene sales solubles en una proporción entre 2 y 5%, su utilización se limita al núcleo del terraplén tomando medidas especiales de compactación, impermeabilidad o drenaje que eviten la disolución con posible producción de asientos o pérdida de resistencia. Las muestras procedentes de escombros triturados 001 y 004, así como la tierra reciclada 003, cuyos contenidos en sales solubles alcanzan valores medios de 2.91 y 2.81% respectivamente

pueden ser empleadas por tanto en el núcleo del terraplén siempre que se adopten dichas especiales.

En definitiva, el árido reciclado estudiado, para ser clasificado como suelo, se encuentra con el condicionante de la presencia de sales solubles, pero por otra, la adopción de medidas especiales de compactación, impermeabilización y drenaje posibilitan perfectamente su uso en el núcleo del terraplén por ser una de las zona de menor riesgo de un terraplén.

6.1.3.3.2. Artículo 331: Pedraplenes (Parte 3: Explanaciones)

Un pedraplén consiste en la extensión y compactación por tongadas de materiales pétreos, con destino a crear una plataforma sobre la que se asiente la explanada y el firme de una carretera.

Según los condicionantes granulométricos que se establecen para esta capa (Tabla 110), ninguna de las muestras estudiadas de árido reciclado pueden ser utilizadas para la ejecución de un pedraplén, en base a que el tamaño de las mismas es demasiado pequeño para este uso.

Tabla 110. Cumplimiento de los requisitos granulométricos para pedraplenes según PG-3

Muestra	RELLENOS TIPO PEDRAPLÉN		
	% QP # 20 < 30%	% QP # 0.08 < 10%	900 ≤ D _{máx} ≤ 100
H	80.98%	0.21%	31.5
H-001	76.30%	0.00%	31.5
H-002	100.00%	1.04%	4
001	62.92%	0.00%	63
002	100.00%	4.54%	4
003	99.81%	1.53%	16
004	76.13%	1.87%	63

Fuente: Elaboración propia

6.1.3.3.3. Artículo 332: Rellenos localizados (Parte 3: Explanaciones)

Los rellenos localizados consisten en la extensión y compactación de suelos, procedentes de excavaciones o préstamos, en relleno de zanjas, trasdós de obras de fábrica, cimentación o apoyo de estribos o cualquier otra zona, que por su reducida extensión, compromiso estructural u otra causa no permita la utilización de los mismos equipos de maquinaria con que se lleva a cabo la ejecución del resto del relleno, o bien exija unos cuidados especiales en su construcción, distinguiéndose las mismas zonas que en los terraplenes.

En esta aplicación se podrán emplear suelos seleccionados y suelos adecuados siempre que su CBR sea superior a 10 y en el caso de trasdós de obra de fábrica superior a 20, y dado que la clasificación como suelos seleccionados y adecuados no la ha alcanzado ningún tipo de muestra ensayada por su contenido en sales

solubles superior a 0 y 0.2% respectivamente, ninguna de las muestras estudiadas podría emplearse como relleno localizado, a pesar de que estos materiales reciclados superan ampliamente el valor de índice CBR (Martín-Morales, Cuenca Moyano et al. 2013).

6.1.3.3.4. Artículo 333: Rellenos todo uno (Parte 3: Explanaciones)

Los rellenos todo uno consisten en la extensión y compactación por tongadas de materiales, con destino a crear una plataforma sobre la que se asienten la explanada y firme de una carretera.

En el articulado se especifica que los rellenos todo uno cumplirán granulométricamente las condiciones intermedias establecidas para terraplenes y pedraplenes indicadas en la Tabla 111, y como puede observarse, a pesar de que todas las muestras cumplen el requisito de presentar un tamaño máximo inferior a 100mm y tienen un adecuado contenido en finos, sólo la fracción gruesa del escombros triturado 001, cumple los requisitos correspondientes a la cantidad de material que debe pasar por el tamiz de 20mm, por lo que sería la única válida para su utilización en rellenos todo uno.

Tabla 111. Cumplimiento de los requisitos granulométricos para rellenos todo uno según PG-3

Muestra	D _{máx} <100	RELLENOS TIPO TODO-UNO			
		1ª condición		ó 2ª condición	
		# 0,080≤35%	# 20≤70% # 20≥30%	# 0,080≥10%	# 20<30%
H	31.5	0.21%	80.98%	0.21%	80.98%
H-001	31.5	0.00%	76.30%	0.00%	76.30%
H-002	4	1.04%	100.00%	1.04%	100.00%
001	63	0.00%	62.92%	0.00%	62.92%
002	4	4.54%	100.00%	4.54%	100.00%
003	16	1.53%	99.81%	1.53%	99.81%
004	63	1.87%	76.13%	1.87%	76.13%

Fuente: Elaboración propia

6.1.3.3.5. Artículo 421: Rellenos localizados de material drenante (Parte 4: Drenaje)

Los rellenos de material drenante consisten en la extensión y compactación de materiales drenantes en zanjas, trasdoses de obras de fábrica, o cualquier otra zona, cuyas dimensiones no permitan la utilización de los equipos de maquinaria pesada. El PG-3 permite utilizar áridos naturales, procedentes de machaqueo y trituración de piedra de cantera o grava natural, o artificiales, exentos de margas, arcilla u otras materias extrañas.

Las condiciones generales que han de cumplir los rellenos localizados de material drenante se resumen en la Tabla 112 y las específicas para cada aplicación en la Tabla 113.

Tabla 112. Cumplimiento de los requisitos generales para rellenos localizados de material drenante según PG-3

Material	RELLENOS LOCALIZADOS DE MATERIAL DRENANTE					
	D _{máx} <76	# 0,080<5%	F ₆₀ /F ₁₀ < 20	No plástico	EA>30	LA<40
H	31.5	0.21%	7.69	√	50.47	28.10
H-001	31.5	0.00%	2.47	√		28.10
H-002	4	1.04%	7.89	√	50.47	
001	63	0.00%	3.06	√		29.27
002	4	4.54%	10.40	√	39.63	
003	16	1.53%	11.63	√	19.54	
004	63	1.87%	31.29	√	39.63	29.27

Fuente: Elaboración propia

Tabla 113. Cumplimiento de los requisitos específicos para rellenos localizados de material drenante según PG-3

Material	RELLENOS LOCALIZADOS DE MATERIAL DRENANTE						
	Suelo no cohesivo	Tubos o mechinales				Drenes ciegos	
	F ₁₅ <1mm	Perforados F ₈₅ >1	Juntas abiertas F ₈₅ >1.2	Hormigón poroso F ₈₅ >0.2	Mechinal F ₈₅ >1	20mm<D <80mm	F ₆₀ /F ₁₀ <4
H	4	31.5	31.5	31.5	31.5	31.5	7.69
H-001	8	31.5	31.5	31.5	31.5	31.5	2.47
H-002	0.5	4	4	4	4	4	7.89
001	8	40	40	40	40	63	3.06
002	0.25	4	4	4	4	4	10.40
003	0.5	8	8	8	8	16	11.63
004	1	31.5	31.5	31.5	31.5	63	31.29

Fuente: Elaboración propia

En general todas las muestras de árido reciclado estudiadas, salvo las procedentes de tierra reciclada 003 y el árido reciclado procedente de escombros 004, cumplirían las condiciones generales para ser utilizadas como rellenos localizados de material drenante.

Específicamente, las arenas procedentes de hormigón (H-002) y escombros (002) reciclados, tendrían la capacidad filtrante exigida para ser empleado como suelo no cohesivo.

Así mismo, como material drenante situado junto a tubos o mechinales en la evacuación de aguas pueden utilizarse todas las fracciones estudiadas, salvo la tierra reciclada (003) y el árido grueso reciclado procedente de hormigón (004), por

no cumplir los requisitos generales en cuanto a uniformidad del relleno y equivalente de arena.

Por último, al ser los requisitos específicos de los drenes ciegos muy limitantes en casi todas las muestras, su aplicación solo sería viable en el caso de las fracciones gruesas del hormigón (H-002) y escombros triturados (002).

6.1.3.3.6. Artículo 510: Zahorras (Parte 5: Firmes)

La zahorra es el material granular, de granulometría continua, utilizado como capa de firme que puede ser de dos tipos: zahorra artificial, constituida por partículas total o parcialmente trituradas de modo que se consiga un elevado rozamiento interno entre las partículas, para ser utilizada en capas que requieren una alta capacidad de soporte; y zahorra natural, formada básicamente por partículas no trituradas, con un menor rozamiento interno, por lo que se obtienen capas con menor capacidad de soporte, pudiéndose emplear en subbases y también como bases en el caso de carreteras con baja intensidad de tráfico.

El PG-3 (PG-3 1975) permite la utilización de materiales granulares reciclados como zahorras para categorías de tráfico pesado T2 a T4, siempre que se cumplan los requisitos granulométricos que se detallan en la

Tabla 114, además de los referentes a composición química, limpieza, plasticidad, resistencia a la fragmentación, forma y angulosidad.

Del estudio de las características generales que deben de cumplir los áridos empleados como zahorras para conformar firmes se deduce, según los datos relacionados en la

Tabla 114, que:

- En cuanto a la composición química, tan solo las muestras procedentes de hormigón triturado podrían utilizarse en la confección de zahorras por contener una cantidad de sulfatos de 0.29%, inferior al 0.5% exigido cuando las zahorras estén en contacto con capas tratadas con cementos o al 1% en el resto de los casos.
- La limpieza, necesaria para garantizar la estabilidad de la capa granular que indica que el árido está exento de terrones de arcilla, margas, materia orgánica o cualquier otra que pueda afectar a su durabilidad, se obtiene a través del coeficiente de limpieza (CL) y el índice de equivalente de arena (EA). El primero no se ha realizado, al entenderse que el árido reciclado al estar exento de materia orgánica y no presentar plasticidad, por lo que carece de arcillas que actúen como lubricante de las partículas más gruesas, aumentando el rozamiento granular y evitando la aparición de grandes deformaciones permanentes. Y en cuanto al segundo, Kraemer y del Val (Kraemer, Val 1998) establecen que árido con equivalentes de arena inferiores a 20 resultarían demasiado contaminados, mientras que si superan un índice de EA de

50 reflejarían un grado de limpieza suficiente para la mayoría de las aplicaciones. Por lo que se puede afirmar que la tierra vegetal con un EA de 19.54 está demasiado sucia para ser utilizada en firmes, mientras que el triturado de hormigón con 50.47 ofrece una más que adecuada garantía de limpieza.

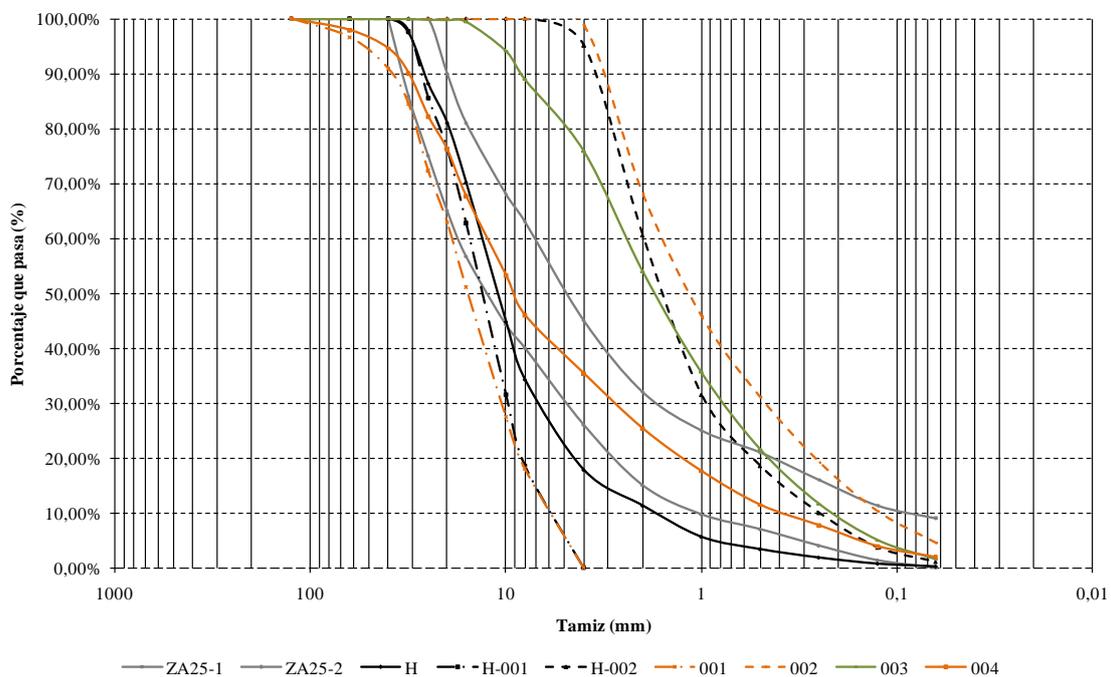
- La plasticidad, como prescripción general y específica según las aplicaciones de las zahorras, está contraindicada en las zahorras para que los finos no actúen como lubricante de las partículas más gruesas, de forma que se disminuya el rozamiento angular y aparezcan las deformaciones permanentes en los firmes. Las muestras estudiadas presentan nula plasticidad en el caso de las procedentes de hormigón triturado y por tanto se podría utilizar para todas las aplicaciones de zahorras, siendo la tierra reciclada y el escombros triturado las muestras que presentan baja plasticidad en y sólo se podrían utilizar en la formación de arcenes no pavimentados con categorías de tráfico pesado T32 y T4 (T41 y T42).
- Del ensayo de equivalente de arena (EA), como medida indirecta de limpieza del material, se puede constatar que la tierra reciclada no podría emplearse como zahorra, mientras que el producto procedente de la trituración de hormigón presentaría un buen comportamiento para todas las categorías de tráfico pesado, y el escombros triturado no se podría emplear en las categorías T00 a T1, por ser de mayor exigencia. No obstante de no cumplirse el valor de equivalente de arena, el PG-3 recomienda la realización del ensayo de azul de metileno cuyo valor debe ser inferior a 10 aumentándose el valor de EA en 5 unidades para todas las aplicaciones, entendiéndose que un valor bajo de EA no tiene porqué ser debido a la presencia de finos de carácter arcilloso.
- En referencia a la resistencia a la fragmentación que presenta el árido reciclado estudiado, se indica que todas las muestras, salvo la tierra reciclada a la que por su composición granulométrica no le fue posible realizar el ensayo, cumplen las prescripciones indicadas en el articulado y por tanto muestran una adecuada resistencia a los esfuerzos a los cuales van a estar sometidos.
- En cuanto a la forma y angulosidad de las partículas, determinadas a través del índice de lajas (IL) y el porcentaje de partículas trituradas respectivamente, indicar que no se han practicado los ensayos específicos para su determinación, no obstante, de la bibliografía consultada se puede concluir, por un lado, que el árido natural presenta un mayor índice de lajas que el árido reciclado (Sánchez de Juan 2004, Tam, Tam 2008), atribuyéndose a que el mortero que queda adherido en los ángulos que presentan las partículas tiende a redondear las más angulosas; y por otro, que las trituradoras de impactos, como la utilizada para la producción del árido objeto de estudio, empleadas en el proceso de trituración del residuo de construcción y demolición, producen áridos reciclados con formas no lajosas (Sánchez de Juan 2004, Fueyo Casado 2003). Así mismo, por el propio proceso de producción del árido, el porcentaje de partículas trituradas es del cien

por cien, por lo que se puede considerar apto para ser utilizado en capas granulares desde este punto de vista.

Atendiendo a la distribución granulométrica de las partículas que deben de tener los áridos reciclados estudiados conforme a los husos establecido por el pliego PG-3 para zahorras artificiales y naturales que buscan la máxima compacidad, podemos observar de la Figura 45 a la Figura 50, que las muestras más adecuadas a estos usos serían el escombro 004 y hormigón triturado H, eliminándole por una parte el exceso de granos gruesos superiores a 20, 25 y 40mm, según cada caso, y aumentando el contenido de finos para disminuir la cantidad de granos inferiores a 10mm. Se ha observado que concretamente en el caso de las zahorras artificiales ZAD20 las muestras de hormigón H-001 y escombro 001 se ajustarían bastante bien a dichos husos, siempre que se eliminen igualmente los tamaños superiores a 20mm y se aumente el contenido en granos inferiores a 10mm; y como excepción, las muestras procedentes de tierra reciclada 003 se ajustarían a los husos de las zahorras naturales ZN20, siempre que se les aumente el contenido en granos de menos de 2mm.

Se puede por tanto concluir que el producto más adecuado en la aplicación de zahorras sería el hormigón triturado.

Figura 45. Muestras comparadas con los husos granulométricos de las zahorras artificiales ZA25 según PG3



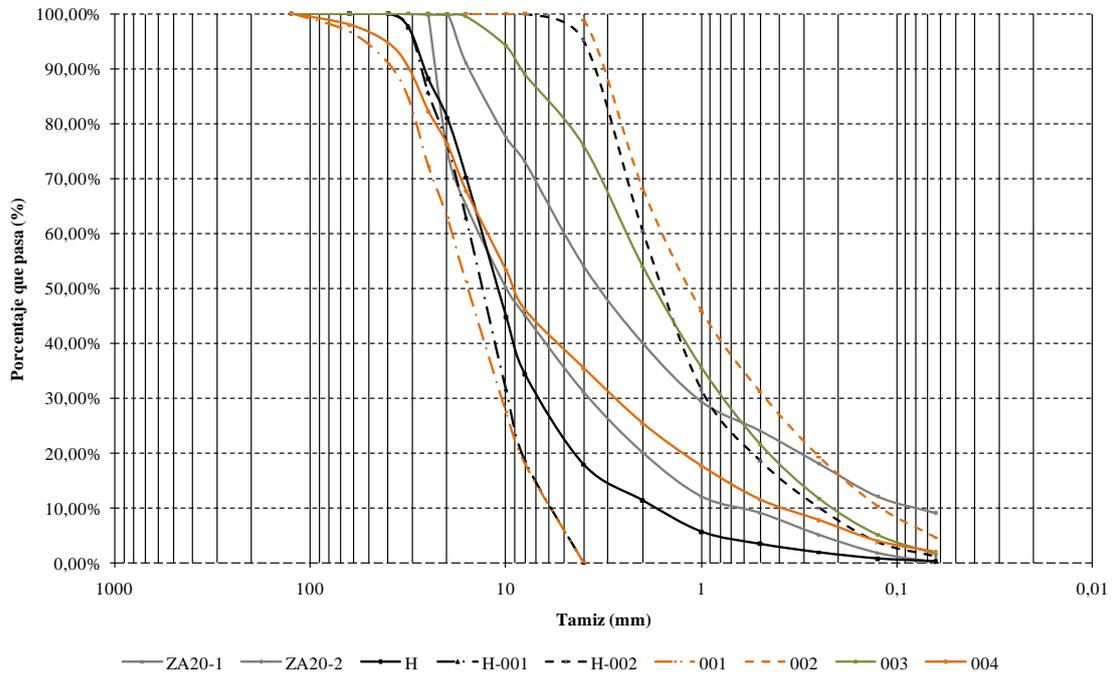
Fuente: Elaboración propia

Tabla 114. Cumplimiento de los requisitos generales para zahorras según PG-3

Material	ZAHORRAS														
	SO ₃ <0.5% (*)	SO ₃ <1% (**)	CL<2	No plastico	En carreteras T4		Arcenes T32 y T4 (T41 y T42)		EA			LA<40		IL<35%	Angulosidad
					LL<25	IP<6	LL<30	IP<10	T00a T1 EA>40	T2 a T4 EA>35	Arcenes de T3 a T4 EA>30	T00 a T2 <30	T3, T4 y arcenes <35		
H			-	√					50.47	50.47	50.47	28.10	28.10	-	-
H-001			-	√								28.10	28.10	-	-
H-002	0.29	0.29	-	√	-	-	-	-	50.47	50.47	50.47			-	-
001			-	X								29.27	29.27	-	-
002	2.91	2.91	-	X	27.70	3.31	27.70	3.31	39.63	39.63	39.63			-	-
003	2.81	2.81	-	X	28.72	6.71	28.72	6.71	19.54	19.54	19.54			-	-
004			-	X					39.63	39.63	39.63	29.27	29.27	-	-
(*) En capas tratadas con cemento															
(**) En el resto de los casos															

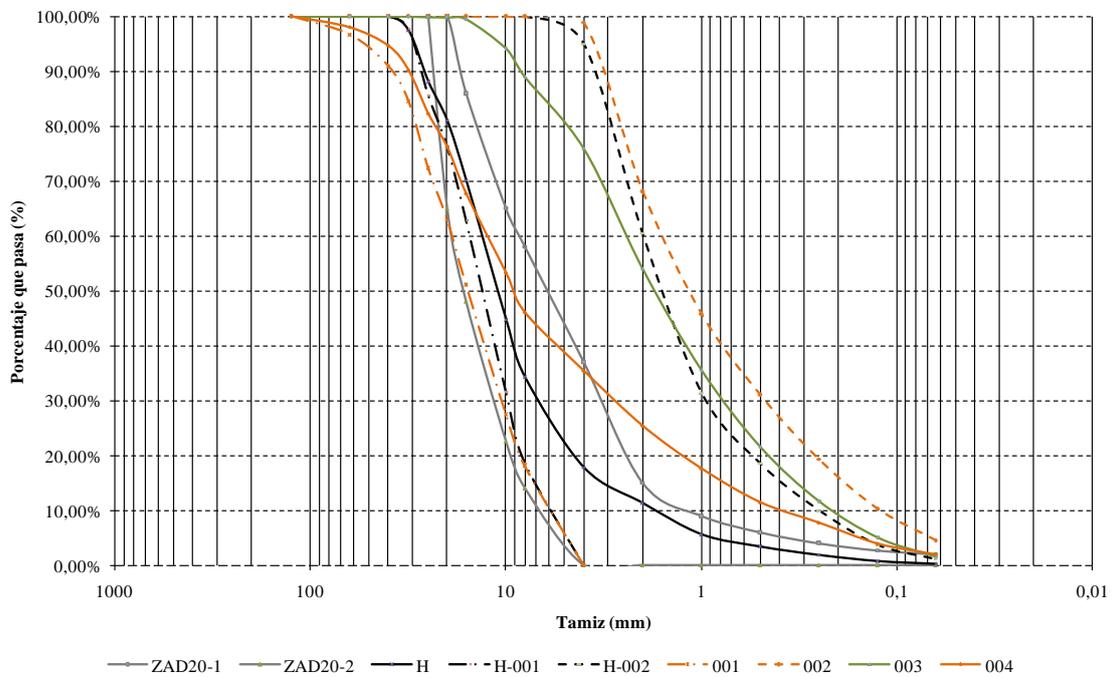
Fuente: Elaboración propia

Figura 46. Muestras comparadas con los husos granulométricos de las zahorras artificiales ZA20 según PG3



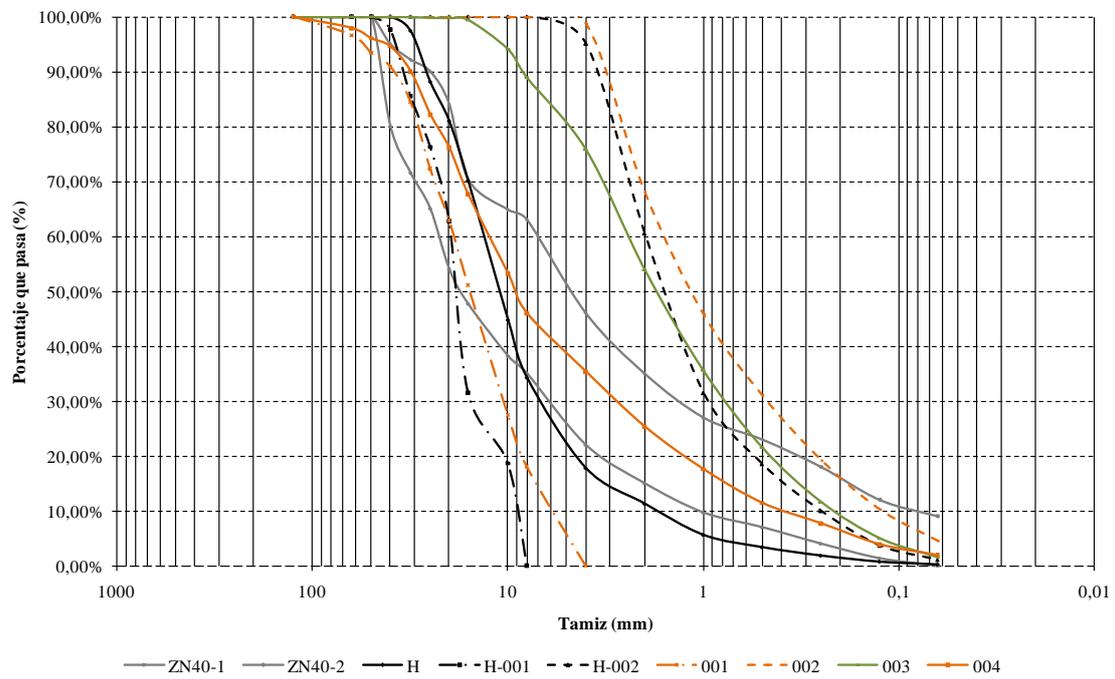
Fuente: Elaboración propia

Figura 47. Muestras comparadas con los husos granulométricos de las zahorras artificiales ZAD20 según PG3



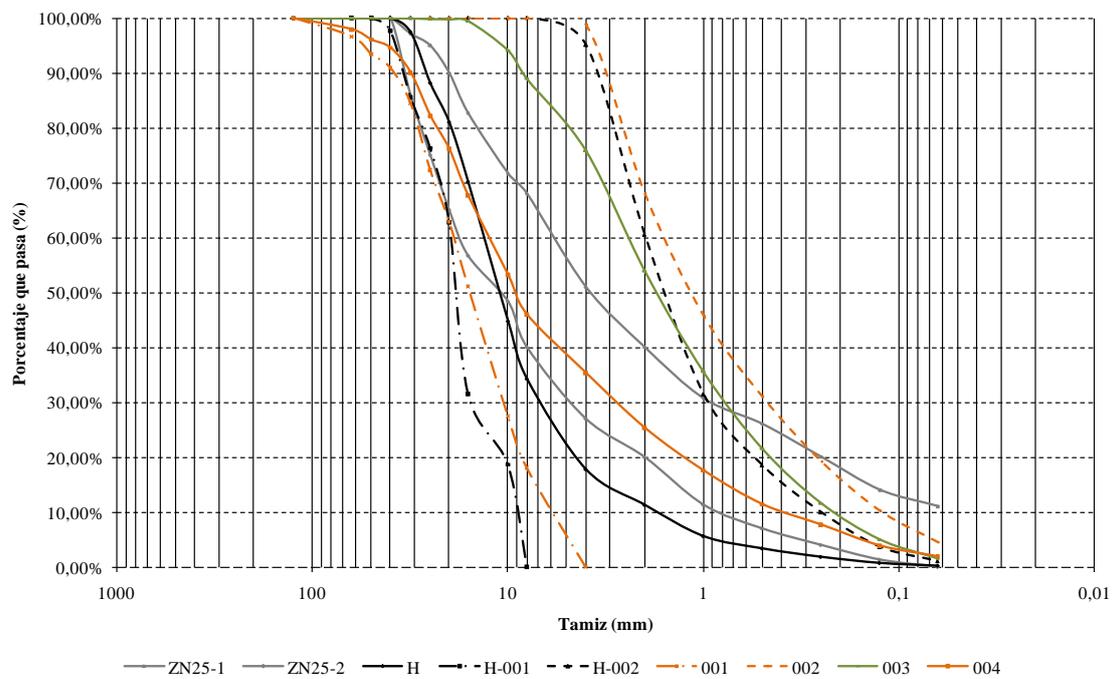
Fuente: Elaboración propia

Figura 48. Muestras comparadas con los husos granulométricos de las zahorras naturales ZN40 según PG3



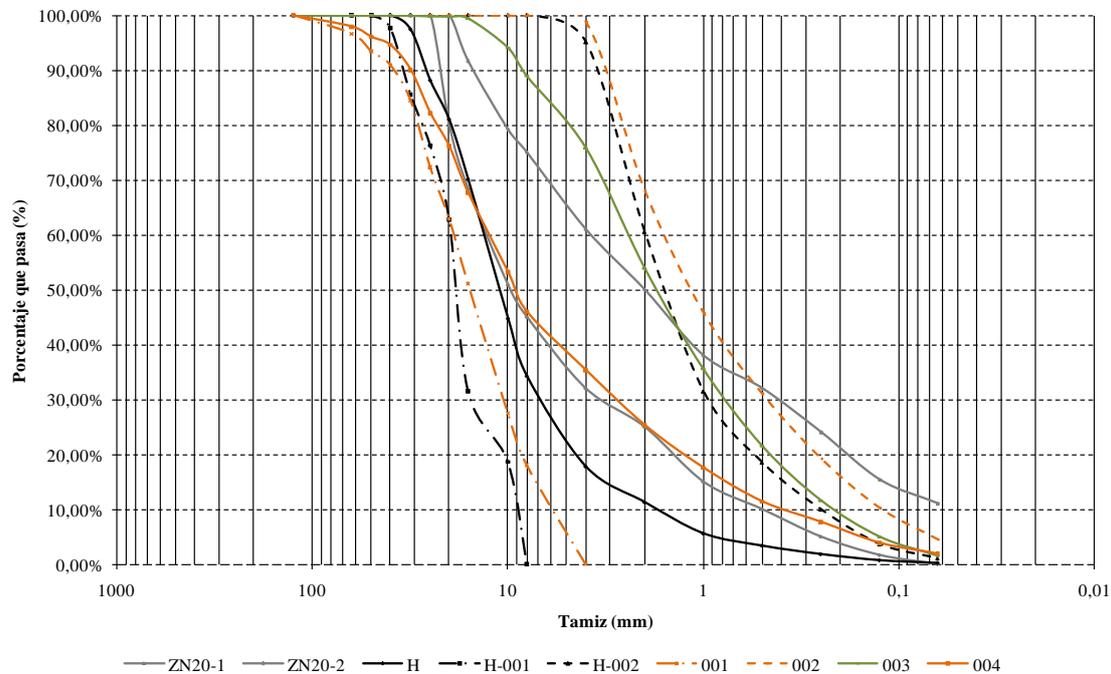
Fuente: Elaboración propia

Figura 49. Muestras comparadas con los husos granulométricos de las zahorras naturales ZN25 según PG3



Fuente: Elaboración propia

Figura 50. Muestras comparadas con los husos granulométricos de las zahorras naturales ZN20 según PG3



Fuente: Elaboración propia

6.1.3.3.7. Artículo 512: Suelos estabilizados in situ (Parte 5: Firmes)

Se define como suelo estabilizado in situ a la mezcla homogénea y uniforme de un suelo con cal o con cemento, y eventualmente agua, en la propia traza de la carretera, la cual convenientemente compactada, tiene por objeto disminuir la susceptibilidad al agua del suelo o aumentar su resistencia, para su uso en la formación de explanadas. Se establecen tres tipos de suelos estabilizados in situ, denominados respectivamente S-EST1, S-EST2 y S-EST3. Los dos primeros se pueden conseguir con cal o con cemento, mientras que el tercer tipo se tiene que realizar necesariamente con cemento.

Los suelos más adecuados para ser estabilizados con cemento por demandar una pequeña cantidad de cemento son los clasificados como A-1 por la AASHTO M 145-91 (AASHTO M 145-91 2000), por lo que inicialmente todas las muestras ensayadas son susceptibles de ser utilizados para esta aplicación (Kraemer, Val 1998).

Las condiciones generales que deben cumplir los materiales que se vayan a estabilizar in situ con cal o con cemento se resumen en que han de ser suelos de la traza u otros materiales locales, no deben contener materia orgánica, sulfatos, sulfuros, fosfatos, nitratos, cloruros u otros compuestos químicos en cantidades

perjudiciales (especialmente para el fraguado, en el caso de que se emplee cemento), ni presentar reactividad potencial con los álcalis del cemento. Estos requisitos generales se detallan en la Tabla 115, donde se puede observar que, por el contenido en sales solubles, no se podría emplear las muestras procedentes de escombros triturados ni la de tierra reciclada, pero ninguna de ellas presenta la plasticidad adecuada para ser utilizadas como suelo a estabilizar con cal o cemento. En cuanto a la nula reactividad potencial del árido con los álcalis del cemento, que en presencia de humedad son susceptibles de reaccionar dando lugar a un compuesto gelatinoso que puede producir expansiones en el suelo, repercutiendo en la estabilidad del mismo, indicar que aun no habiéndose realizado el ensayo, algunas investigaciones (Collins 1998, Sagoe-Crentsil, Brown 1998) ponen de manifiesto como la utilización de árido reciclado proveniente de demoliciones suele favorecer estas reacciones por incorporar un mayor contenido de alcalinos debido al mortero que llevan adherido, por ello, éste tipo de árido se considera potencialmente reactivo, no cumpliendo con la limitación establecida.

Por su parte, en cuanto a la granulometría que deben presentar (ver Tabla 116), ninguna de las muestras sería adecuada para estabilizar con cal siendo las fracciones más finas del hormigón H-002 y escombros 002, así como la tierra reciclada 003 las idóneas para estabilizar con cemento.

En definitiva, las muestras de árido reciclado estudiadas no pueden utilizarse para ser estabilizadas in situ con cal o cemento, en el primer caso los suelos más apropiados son los de granulometría fina, de plasticidad apreciable y, en particular, de elevada humedad natural, mientras que para las estabilizaciones con cemento son los granulares con finos de plasticidad reducida los más indicados (Kraemer, Pardillo et al. 2009)

Tabla 115. Cumplimiento de los requisitos generales para suelos estabilizados in situ según PG-

3

Material	SUELOS ESTABILIZADOS IN SITU							
	Composición química			Plasticidad				
	MO (%)		SS (%)	CAL		CEMENTO		
	S-EST1 <2	S-EST2 S-EST3 <1	S-EST1 S-EST2 S-EST3 <1	S-EST1 IP≥12	S-EST2 IP≥12 y≤40	S-EST1 IP≥15	S-EST2 S-EST3 LL≥40	S-EST3 IP≥15
H	0	0						
H-001	0	0						
H-002	0	0	0.29	-	-	-	-	-
001	0	0						
002	0	0	2.91	3.31	3.31	3.31	27.70	3.31
003	0	0	2.81	6.71	6.71	6.71	28.72	6.71
004	0	0						

Fuente: Elaboración propia

Tabla 116. Cumplimiento de los requisitos granulométricos para suelos estabilizados in situ según PG-3

Material	SUELOS ESTABILIZADOS IN SITU					
	ESTABILIZACIÓN CON CAL			ESTABILIZACIÓN CON CEMENTO		
	%QP#80mm = 100	%QP#0.063mm ≥ 15	%QP#80mm = 100	%QP#2mm ≥20	%QP#0.063mm	
	S-EST1 S-EST2	S-EST1 S-EST2	S-EST1 S-EST2 S-EST3	S-EST1 S-EST2 S-EST3	S-EST1 S-EST2 EST2 <50	S-EST3 <35
H	100	0.21	100	11.30	0.21	0.21
H-001	100	0.00	100	0.00	0.00	0.00
H-002	100	1.04	100	60.50	1.04	1.04
001	100	0.00	100	0.00	0.00	0.00
002	100	4.54	100	68.15	4.54	4.54
003	100	1.53	100	53.97	1.53	1.53
004	100	1.87	100	25.33	1.87	1.87

Fuente: Elaboración propia

6.1.3.3.8. Artículo 513: Materiales tratados con cemento: suelocemento y gravacemento (Parte 5: Firmes)

El material tratado con cemento es la mezcla homogénea, en las proporciones adecuadas, de material granular, que suele estar conformada por gravas, arenas, cemento, agua y, eventualmente aditivos, realizada en central, que convenientemente compactada se utiliza como capa estructural en firmes de carretera, existiendo dos tipos: suelocemento SC40 y SC20 y gravacemento GC25 y GC20.

El suelocemento se obtiene mezclando en central un material granular, generalmente una mezcla de gravas y arenas o un suelo de reducida plasticidad (Kraemer, Pardillo et al. 2009), con cemento, agua y eventuales adiciones, seguidas de una compactación y un curado adecuados.

La gravacemento es una mezcla homogénea de material granular, con un bajo porcentaje de finos, al que se le añade cemento, agua y eventualmente adiciones utilizada en las capas de los firmes semirrígidos o bajo pavimentos de hormigón. La misión de la capa de gravacemento no es la misma en los dos casos. En firmes desempeña un papel estructural, absorbiendo la mayor parte de las tensiones procedentes del tráfico, por ello para este uso exige que la gravacemento tenga un valor mínimo de resistencia. Bajo pavimentos de hormigón, no se requieren características estructurales, sino que constituya una buena plataforma de trabajo y un apoyo estable a largo plazo (Kraemer 1997).

El material granular que se vaya a utilizar en el suelocemento o el árido que conforme la gravacemento debe cumplir las condiciones generales establecidas en cuanto a composición química y plasticidad de la Tabla 117, pudiéndose utilizar zahorras, suelos granulares o productos inertes de desecho, como específicamente se indica y por primera vez en el articulado, para el suelocemento o áridos naturales triturados, de gravera o productos inertes de desecho, en el caso de la gravacemento.

Tabla 117. Cumplimiento de los requisitos para suelos tratados con cemento según PG3

Material	MATERIALES TRATADOS CON CEMENTO					
	Composición química				Plasticidad	
	Exento de terrones de arcilla, marga y material extraño	MO<1%	SO ₃ <1%	Reactividad con los álcalis	LL<30	IP<15
H	√	√		-		
H-001	√	√		-		
H-002	√	√	0.29	-		
001	√	√		-		
002	√	√	2.91	-	27.70	3.31
003	√	√	2.81	-	28.72	6.71
004	√	√		-		

Fuente: Elaboración propia

El árido grueso utilizado para ser tratado con cemento ha de cumplir con una serie de especificaciones físicas y mecánicas que se resumen en la Tabla 118, además de contener un mínimo de partículas trituradas y por tanto un máximo en partículas lajosas medido a través de su índice de lajas IL, según el tipo de capa y la categoría de tráfico pesado, pudiéndose afirmar en el caso del árido estudiado que, salvo las muestras procedentes de tierra reciclada 003, todas las demás, por el proceso de trituración del árido, el porcentaje de partículas trituradas es del 100% con formas cúbicas y poco lajosas. Respecto de su capacidad resistente, se puede comprobar que las muestras de árido grueso triturado procedentes de hormigón y escombros son válidas, por su resistencia a la fragmentación medida a través del coeficiente de Los Ángeles en función del tipo de capa y la categoría de tráfico pesado.

Al árido fino se le exige un valor de equivalente de arena EA según el tipo de gravacemento que hace viable para ambas aplicaciones a la fracción arena del hormigón triturado, mientras que sólo la fracción arena del escombros triturado sería apta para conformar un suelo gravacemento GC25.

En cuanto a la existencia de terrones de arcilla, tanto en el árido grueso como fino, si bien no se ha realizado el ensayo, se puede deducir que, aunque otros autores han encontrado diferentes contenidos en terrones de arcilla en el árido reciclado de distinta procedencia (Sánchez de Juan, Alaejos Gutiérrez 2006), al no haber aparecido en las muestras estudiadas una marcada plasticidad,

característica representativa de las arcillas que se agrupan en forma de terrones, el árido reciclado estudiado no presenta terrones de arcilla.

Tabla 118. Cumplimiento de los requisitos granulométricos para el árido grueso en suelos tratados con cemento-gravacemento según PG3

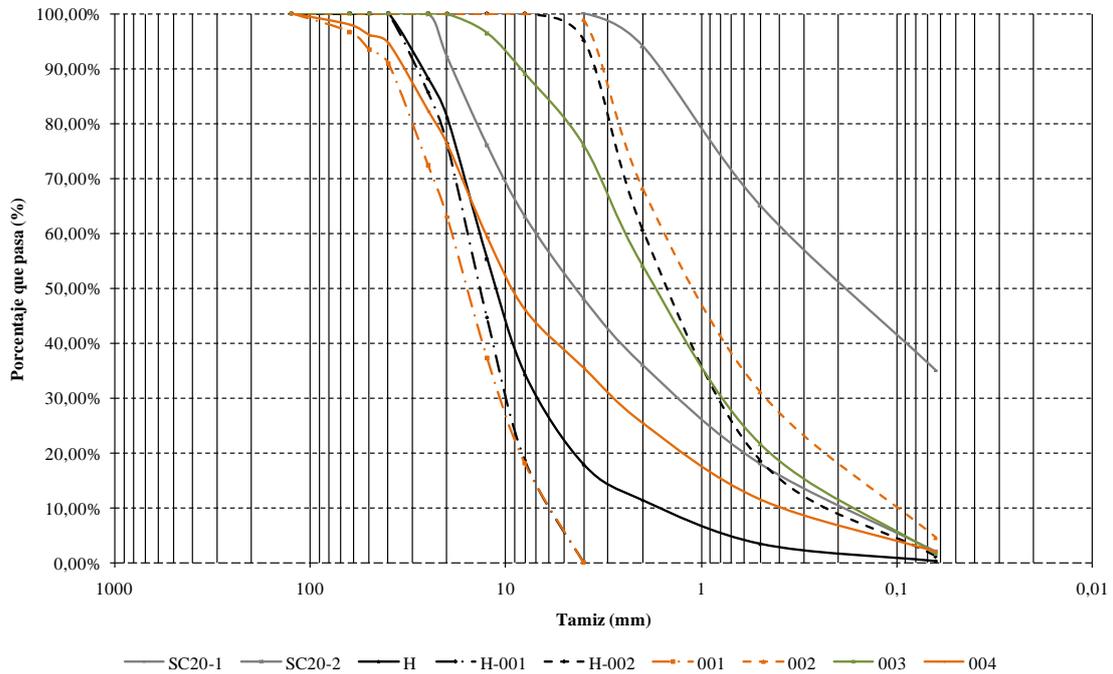
Material	MATERIALES TRATADOS CON CEMENTO – GRAVACEMENTO				
	Árido grueso			Árido fino	
	Resistencia a la fragmentación				
	Calzadas		Arcenes	Equivalente de arena	
	T00 a T2	T3 y T4	T00 a T4		
	LA≤30	LA≤35	LA≤40	GC20>40	GC25>35
H	28.10 ± 0.69	28.10 ± 0.69	28.10 ± 0.69		
H-001	28.10 ± 0.69	28.10 ± 0.69	28.10 ± 0.69		
H-002				50.47 ± 6.19	50.47 ± 6.19
001	29.27 ± 6,11	29.27 ± 6,11	29.27 ± 6,11		
002				39.63 ± 11.16	39.63 ± 11.16
003				19.54 ± 4.02	19.54 ± 4.02
004	29.27 ± 6.11	29.27 ± 6.11	29.27 ± 6.11		

Fuente: Elaboración propia

La granulometría del material granular empleado en la fabricación del suelo tratados con cemento debe ajustarse a los husos que aparecen de la Figura 51 a la Figura 54 para cada aplicación, comprobándose que para la ejecución de suelocemento SC20 serían válidas las muestras de árido fino triturado procedentes de escombros 002, las de tierra reciclada 003 y las de hormigón triturado H-002, si bien a éstas les faltaría finos. Para el resto de aplicaciones, tanto de suelo cemento SC40 como de gravacemento GC25 y GC20 tan sólo las muestras procedentes de escombros triturados 004 serían adecuadas siempre que se les eliminen los tamaños superiores a 40, 25 y 20mm respectivamente.

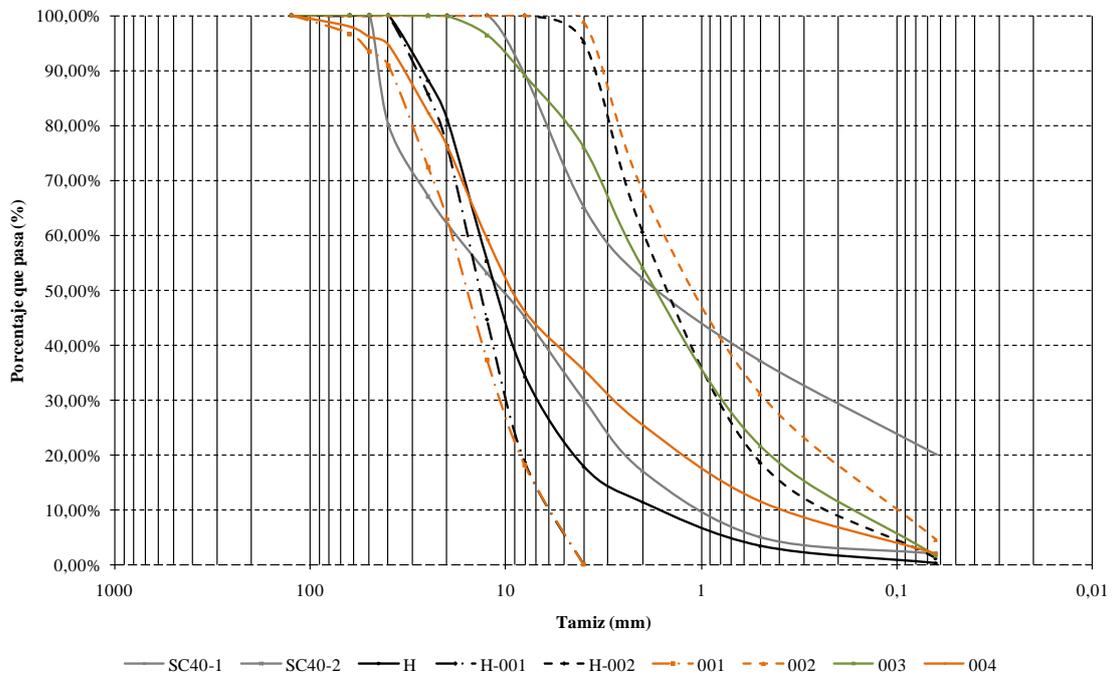
En conclusión, atendiendo a los criterios físicos y químicos que se les exigen a los materiales tratados con cemento las muestras de árido fino procedentes de escombros triturados 002, la de tierra reciclada 003 y la de hormigón triturado H-002, con la oportuna rectificación granulométrica, podrían ser empleadas en la confección de un suelocemento del tipo SC20, mientras que las muestras procedentes de escombros triturados 004 serían adecuadas para la aplicación de suelocemento SC40, siempre que se le aplique la correspondiente corrección de tamaños superiores a 40mm. De la misma manera, siempre que se les ajuste el tamaño a menos de 25mm, son adecuadas las muestras de escombros triturados 004 para la confección de suelos tratados con cemento de tipo gravacemento GC25.

Figura 51. Muestras comparadas con los husos granulométricos de los suelos tratados con cemento SC20 según PG3



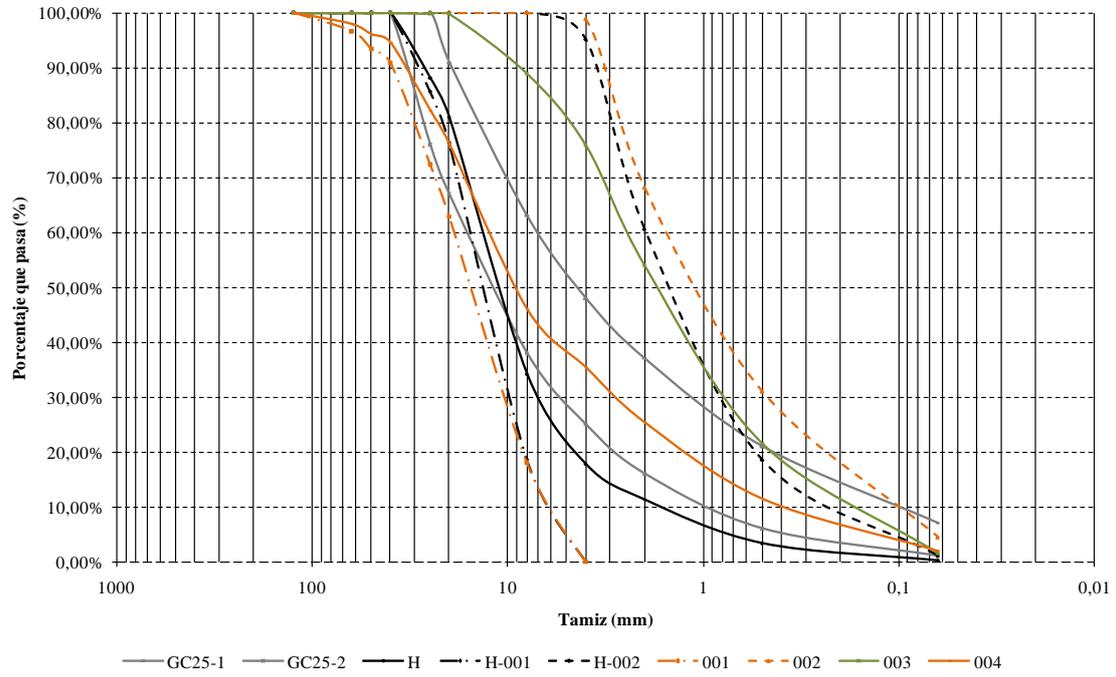
Fuente: Elaboración propia

Figura 52. Muestras comparadas con los husos granulométricos de los suelos tratados con cemento SC40 según PG3



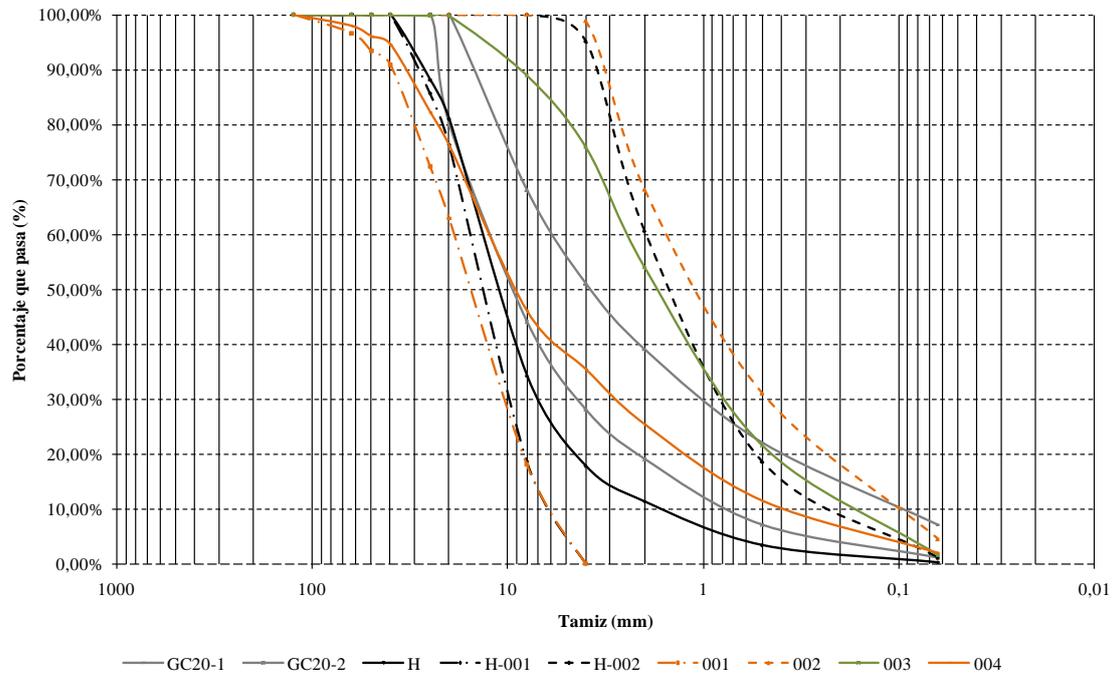
Fuente: Elaboración propia

Figura 53. Muestras comparadas con los husos granulométricos de los materiales tratados con cemento-gravacemento GC25 según PG3



Fuente: Elaboración propia

Figura 54. Muestras comparadas con los husos granulométricos de los materiales tratados con cemento-gravacemento GC20 según PG3



Fuente: Elaboración propia

6.1.3.3.9. Artículo 530: Riegos de imprimación (Parte 5: Firmes)

Los riegos de imprimación se definen como la aplicación de un ligante hidrocarbonado (bituminoso) sobre una capa granular no tratada anteriormente con ningún conglomerante o ligante, previa a la colocación sobre ésta de una capa o un tratamiento bituminoso, con el objeto de dar impermeabilidad a toda la superficie y evitar la pérdida de humedad por evaporación.

Los condicionantes que han de cumplir los áridos reciclados estudiados para ser utilizados para riegos de imprimación se resumen en la Tabla 119, observándose que ninguna muestra podría emplearse por no poseer un tamaño adecuado, con la salvedad del árido fino reciclado procedente de hormigón triturado si se le eliminasen los tamaños superiores a 4mm pues presenta la calidad en limpieza y plasticidad adecuada.

Tabla 119. Cumplimiento de los requisitos para riegos de imprimación según PG3

Material	RIEGOS DE IMPRIMACIÓN				
	Limpieza		Plasticidad	Granulometría	
	Exento de polvo, suciedad, terrones de arcilla, materia vegetal, marga y material extraño	EA>40	No plástico	#4mm=100%	#0.063mm≤15%
H	√		√	17.79	0.21
H-001	√		√	0.00	0.00
H-002	√	50.47 ± 6.19	√	95.07	1.04
001	√		√	0.00	0.00
002	√	39.63 ± 11.16	√	98.82	4.54
003	√	19.54 ± 4.02	√	75.87	1.53
004	√		√	35.36	1.87

Fuente: Elaboración propia

6.1.3.3.10. Artículo 532: Riegos de curado (Parte 5: Firmes)

Son tratamientos superficiales mediante riegos de curado la aplicación de una película continua y uniforme de emulsión bituminosa sobre una capa tratada con un conglomerante hidráulico, al objeto de dar impermeabilidad a toda su superficie.

El árido empleado debe cumplir las mismas condiciones que en el caso de los riegos por imprimación, por lo que lo anteriormente dicho en el artículo 530 se hace extensivo para esta aplicación.

6.1.3.3.11. Artículo 533: Tratamientos superficiales mediante riegos con gravilla (Parte 5: Firmes)

Los tratamientos superficiales mediante riegos con gravilla se definen como la aplicación de una o varias manos de un ligante hidrocarbonado sobre una superficie, complementada por una o varias extensiones de árido, pudiendo ser de tres tipos: riegos con gravilla monocapa, monocapa de doble engravillado o bicapa.

Los áridos a utilizar deben ser en general de machaqueo, y en todo caso, limpios, resistentes, aproximadamente cúbicos y poco pulimentables. Para establecer su calidad, en cada caso, en el pliego de prescripciones técnicas particulares de la obra se establecerán los valores físicos y mecánicos en cuanto a índice de lajas, coeficiente de Los Ángeles o coeficiente de pulido acelerado. Su granulometría debe ser muy uniforme y las especificaciones suelen exigir que la mayor parte del material tenga un tamaño comprendido entre dos tamices próximos (por ejemplo: 10/20, 7/13, 5/10, 3/6, 2/5) (Kraemer 1997). Es por lo que las granulometrías estudiadas para las distintas muestras de árido reciclado, al ser continuas no encajan en ninguno de los husos planteados por esta aplicación.

6.1.3.3.12. Artículo 540: Lechadas bituminosas (Parte 5: Firmes)

Las lechadas bituminosas se emplean en tratamientos superficiales de mejora de la textura superficial o sellado de pavimentos y son mezclas fabricadas a temperatura ambiente con un ligante hidrocarbonado (emulsión bituminosa), áridos agua y, eventualmente, polvo mineral de aportación y adiciones.

En general, para la ejecución de lechadas bituminosas al árido se le exige que sea de gran calidad, procedentes de machaqueo en proporción elevada, resistentes al desgaste, no pulimentables (condición no necesaria en el caso de que la lechada vaya a utilizarse exclusivamente como sellado) y sobre todo muy limpios. Aceptándose expresamente el árido procedente de residuos de construcción y demolición que se haya tratado adecuadamente para satisfacer las especificaciones técnicas exigidas que se resumen en la Tabla 120 y Tabla 121.

La granulometría del árido obtenido combinando las distintas fracciones de los áridos, incluida la de polvo mineral, según el tipo de lechada bituminosa, debe estar comprendida dentro de algunos de los husos establecidos para los tipos de lechadas LB-1, LB-2, LB-3 y LB-4, de manera que según se puede comprobar de la Figura 55 a la Figura 58, a medida que el tamaño de los husos disminuye las fracciones más pequeñas de árido reciclado van encajando mejor dentro de los mismos. Así pues, para las lechadas bituminosa LB-1 la muestra más adecuada resulta la tierra vegetal 003, para la LB-2 también resultaría adecuada, aunque le sobran tamaños superiores a 8mm, así como las fracciones arena del hormigón reciclado H-002 y del escombro reciclado 002, a las que les faltarían granos de 2 a 8mm y 1 a 8mm respectivamente. Para la lechada bituminosa LB-3, a pesar de evidenciar una falta de granos de más de 2mm, la muestra más adecuada sería la arena procedente de escombro triturado 002, ya que la arena procedente de hormigón H-002 presenta una significativa falta de granos de menos de 2mm.

Finalmente para la aplicación de lechada bituminosa LB-4, ninguna de las muestras presenta el suficiente contenido en partículas de menos de 4mm que las haga válidas para este uso.

Tabla 120. Cumplimiento de los requisitos generales del árido grueso para lechadas bituminosas según PG3

Material	LECHADAS BITUMINOSAS							
	Árido grueso ¹							
	Angulosidad		Forma		Resistencia a la fragmentación			Limpieza ²
	T0, T1 y T2 >100%	Resto de los casos >75%	T0, T1 y T2 IL<25	Resto de los casos IL<30	T0 y T1 LA<20	T2, T3 y arcenes LA<25	T4 LA<30	
H	√	√	√	√	28.10 ± 0.69	28.10 ± 0.69	28.10 ± 0.69	√
H-001	√	√	√	√	28.10 ± 0.69	28.10 ± 0.69	28.10 ± 0.69	√
001	√	√	√	√	29.27 ± 6,11	29.27 ± 6,11	29.27 ± 6,11	√
003	√	√	√	√				√
004	√	√	√	√	29.27 ± 6.11	29.27 ± 6.11	29.27 ± 6.11	√

¹Se define árido grueso como la parte del conjunto de fracciones granulométricas retenidas en el tamiz 2mm
² Exento de terrones de arcilla, materia vegetal, marga y material extraño

Fuente: Elaboración propia

Tabla 121. Cumplimiento de los requisitos generales del árido fino para lechadas bituminosas según PG3

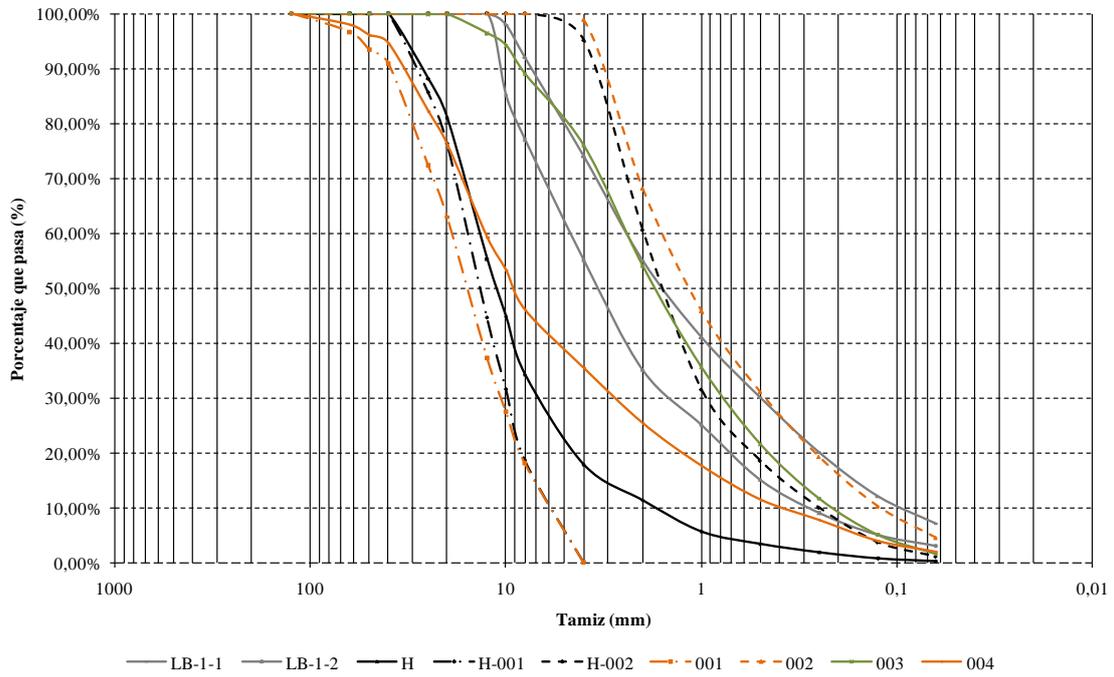
Material	LECHADAS BITUMINOSAS	
	Árido fino ¹	
	Resistencia a la fragmentación ²	Limpieza
	LA<25	Exento de terrones de arcilla, materia vegetal, marga y material extraño
H-002	28.10 ± 0.69	√
002	29.27 ± 6.11	√

¹Se define árido fino como la parte del conjunto de fracciones granulométricas cernidas por el tamiz 2mm y retenidas por el tamiz 0.063mm
²Se realiza sobre la fracción gruesa del árido

Fuente: Elaboración propia

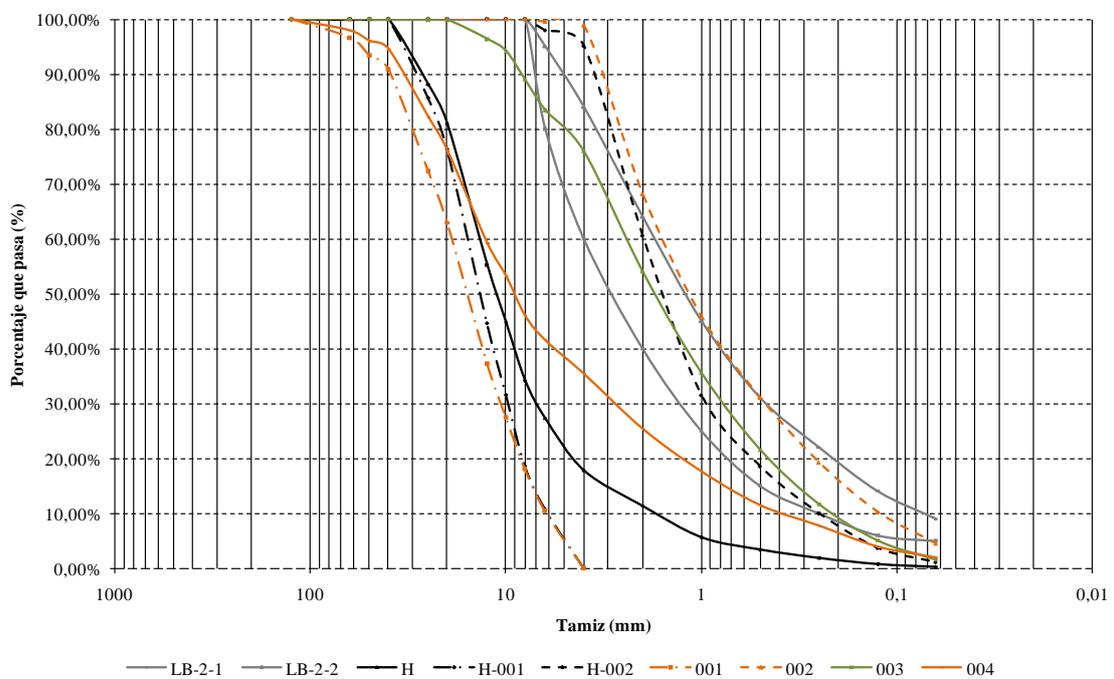
En conclusión se puede afirmar que, a pesar de los posibles ajustes granulométricos, ninguna de las muestras de árido reciclado estudiadas se puede utilizar en la confección de lechadas bituminosas, pues la resistencia a la fragmentación es mayor a la deseada. No obstante las muestras de árido grueso reciclado podrían ser utilizadas en la ejecución de lechadas bituminosas para carreteras de tráfico pesado de categoría T4.

Figura 55. Muestras comparadas con los husos granulométricos de las lechadas bituminosas LB-1 según PG3



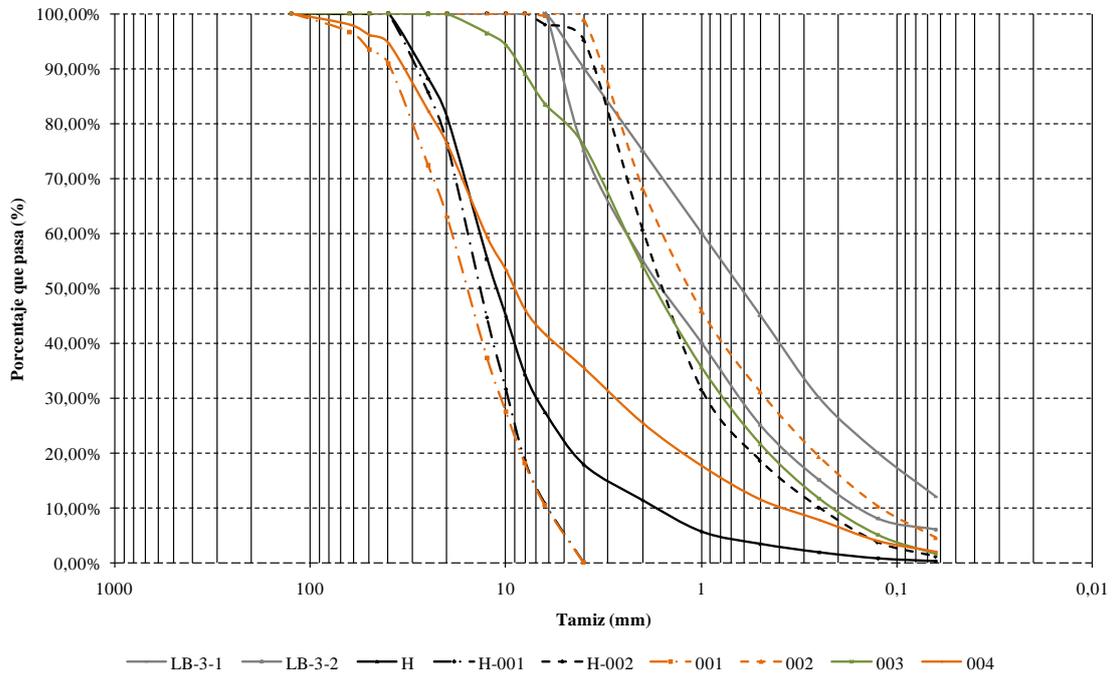
Fuente: Elaboración propia

Figura 56. Muestras comparadas con los husos granulométricos de las lechadas bituminosas LB-2 según PG3



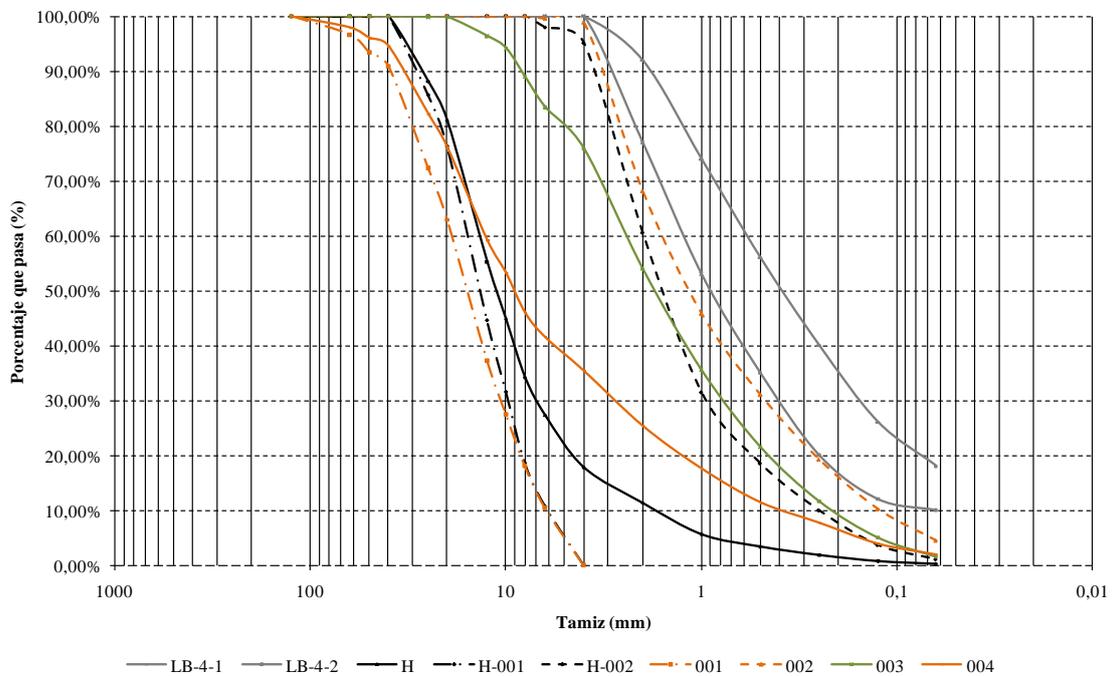
Fuente: Elaboración propia

Figura 57. Muestras comparadas con los husos granulométricos de las lechadas bituminosas LB-3 según PG3



Fuente: Elaboración propia

Figura 58. Muestras comparadas con los husos granulométricos de las lechadas bituminosas LB-4 según PG3



Fuente: Elaboración propia

6.1.3.3.13. Artículo 542: Mezclas bituminosas en caliente tipo hormigón bituminoso (Parte 5: Firmes)

La mezcla bituminosa en caliente tipo hormigón bituminoso es la combinación de un ligante hidrocarbonato, áridos, incluido el polvo mineral, con granulometría continua y, eventualmente aditivos, de manera que todas las partículas del árido queden recubiertas por una película homogénea de ligante. Su proceso de fabricación implica calentar el ligante y los áridos (salvo el polvo mineral de aportación) y su puesta en obra debe realizarse a una temperatura muy superior a la ambiente. Definiendo además una mezcla bituminosa en caliente de alto módulo para su empleo en capa intermedia o de base de las categorías de tráfico pesado T00 a T2, en espesor de 6 a 13cm.

Los áridos se deben suministrar en fracciones granulométricas diferenciadas para ser combinados según las proporciones definidas en la fórmula de trabajo establecida en el proyecto.

Al árido para esta aplicación se le exigen una serie de requisitos generales y específicos detallados en la Tabla 122 observándose como por el nivel de limpieza exigido sólo las muestras procedentes de hormigón triturado serían adecuadas para la ejecución de la base en zonas de tráfico T2, T3 y arcenes. Algunos de los requisitos específicos para el árido grueso como la angulosidad, proporción de partículas redondeadas y forma del árido medida a través de su índice de lajas, si bien no se han realizado los ensayos específicos, por el procedimiento de trituración del árido, en principio son prescripciones que las muestras estudiadas cumplirían.

La granulometría del árido obtenido (incluido el polvo mineral que condicionará la proporción de ligante), según la unidad de obra o empleo, debe estar comprendida dentro de alguno de los husos fijados en artículo para mezclas densas, semidensas o gruesas, reflejados en la Figura 59 a la Figura 65. Observándose que tan sólo las muestras de escombros triturados 004 serían viables para las aplicaciones de mezclas bituminosas en caliente tipo hormigón bituminoso para los tamaños máximos 22 y 32mm (AC 22 D, AC 22 S, AC 22 G, AC32 S y AC 32 G) siempre que se le eliminen los tamaños superiores a 22 y 32mm en cada caso.

Por lo que se puede concluir que ninguna de las muestras estudiadas podría tener su aplicación en mezclas bituminosas en caliente.

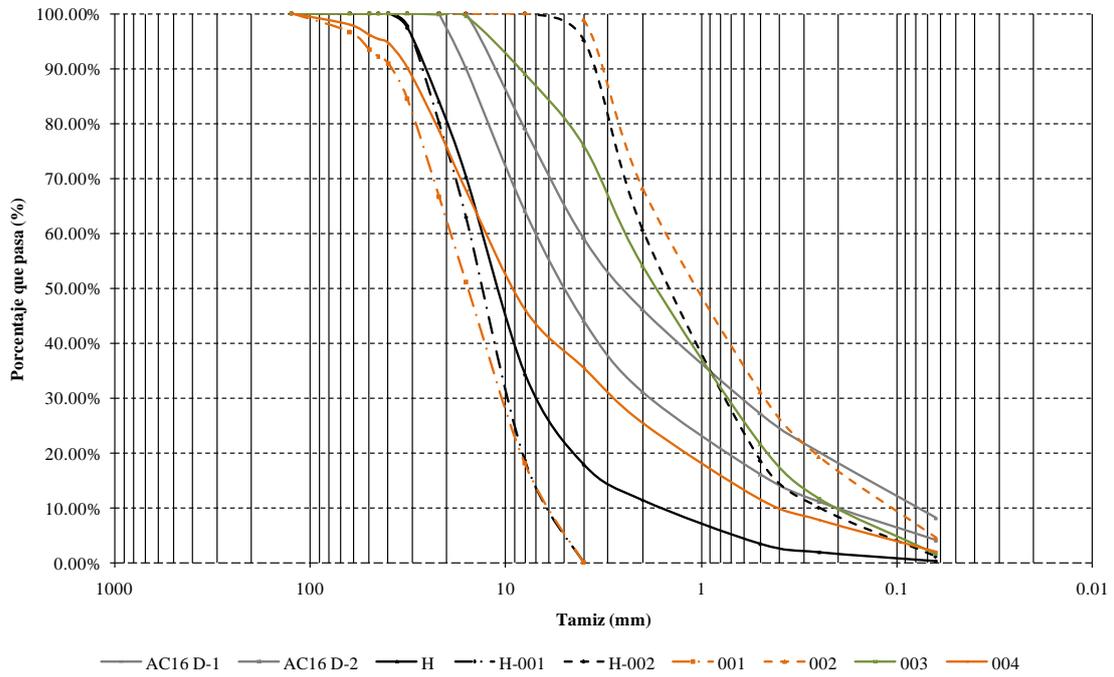
Tabla 122. Cumplimiento de los requisitos del árido para mezclas bituminosas en caliente tipo hormigón bituminoso según PG3

Material	MEZCLAS BITUMINOSAS EN CALIENTE TIPO HORMIGÓN BITUMINOSO								
	EA>50	Árido grueso ¹ y fino ²							Limpieza (*)
		Resistencia a la fragmentación							
		Capa de rodadura		Capa intermedia		Base			
T00 a T2 LA≤20	T3, T4 y arcenes LA≤25	T00 a T3 y arcenes LA≤25	T4 LA≤25	T00 a T1 LA≤25	T2, T3 y arcenes LA≤30				
H	50,47±6,20	28.10±0.69	28.10±0.69	28.10±0.69	28.10±0.69	28.10±0.69	28.10±0.69	√	
H-001	50,47±6,20	28.10±0.69	28.10±0.69	28.10±0.69	28.10±0.69	28.10±0.69	28.10±0.69	√	
H-002	50,47±6,20	28.10±0.69	28.10±0.69	28.10±0.69	28.10±0.69	28.10±0.69	28.10±0.69	√	
001	39,62±11,16	29.27±6,11	29.27±6,11	29.27±6,11	29.27±6,11	29.27±6,11	29.27±6,11	√	
002	39,62±11,16	29.27±6,11	29.27±6,11	29.27±6,11	29.27±6,11	29.27±6,11	29.27±6,11	√	
003	19,54±4,02	-	-	-	-	-	-	√	
004	39,62±11,16	29.27±6.11	29.27±6.11	29.27±6.11	29.27±6.11	29.27±6.11	29.27±6.11	√	

(*) Exento de terrones de arcilla, materia vegetal, marga y material extraño
¹Se define árido grueso como la parte del conjunto de fracciones granulométricas retenidas en el tamiz 2mm
²Se define árido fino a la parte del árido total cernida por el tamiz 2mm y retenida por el tamiz de 0.063mm

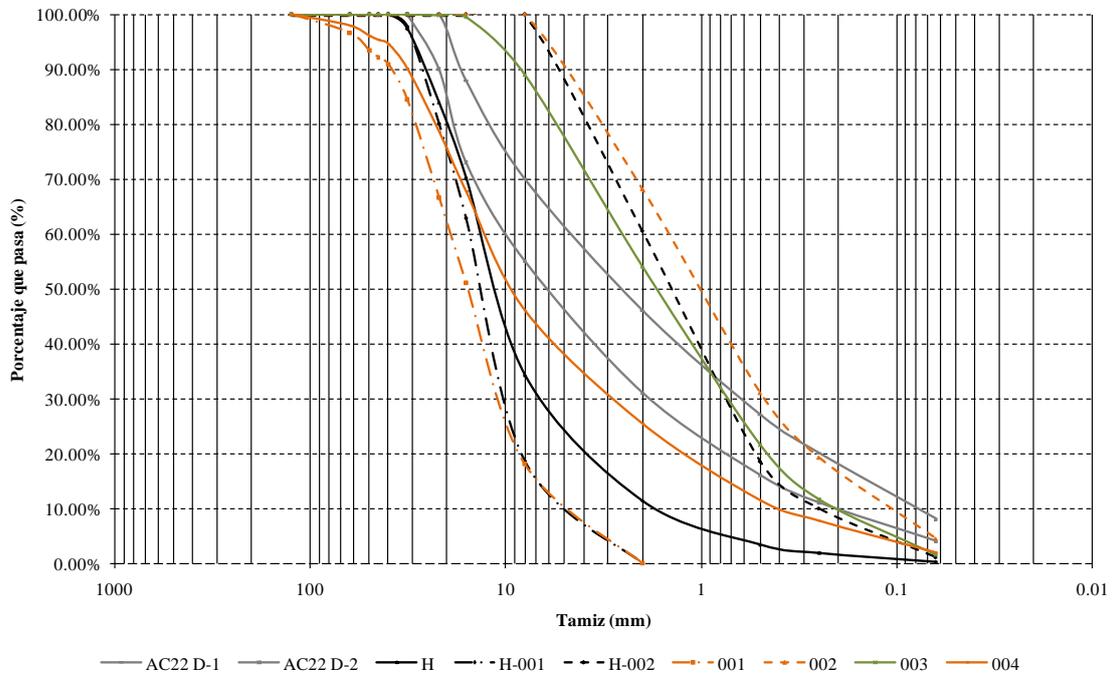
Fuente: Elaboración propia

Figura 59. Muestras comparadas con los husos granulométricos de las mezclas bituminosas en caliente tipo hormigón densas AC D 16 según PG3



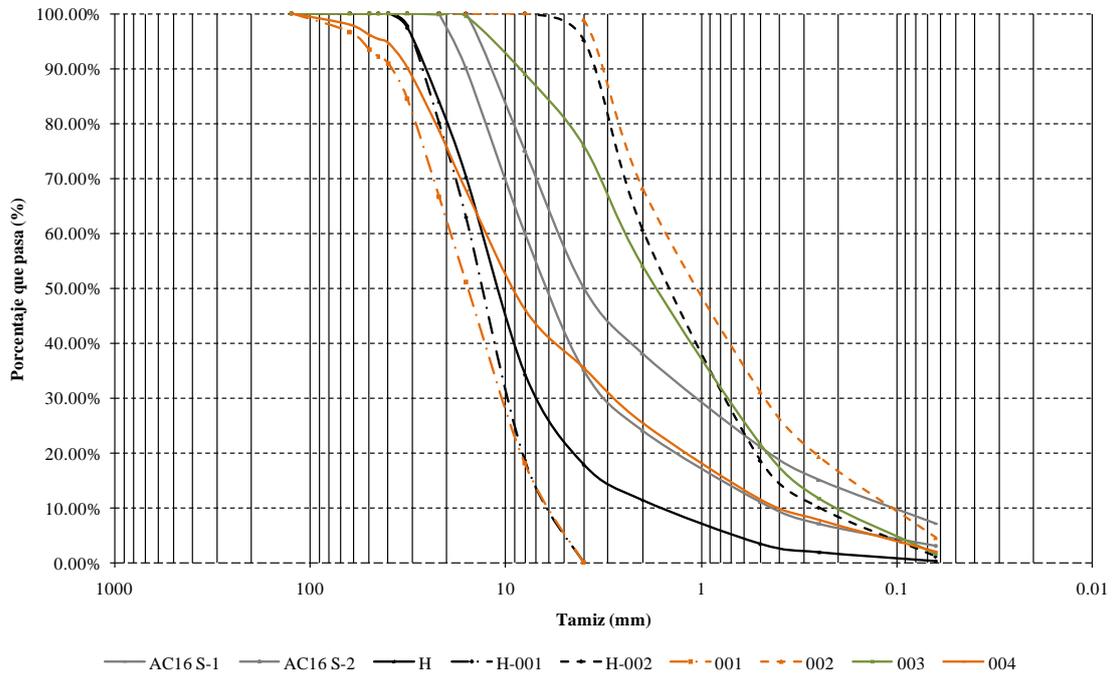
Fuente: Elaboración propia

Figura 60. Muestras comparadas con los husos granulométricos de las mezclas bituminosas en caliente tipo hormigón densas AC D 22 según PG3



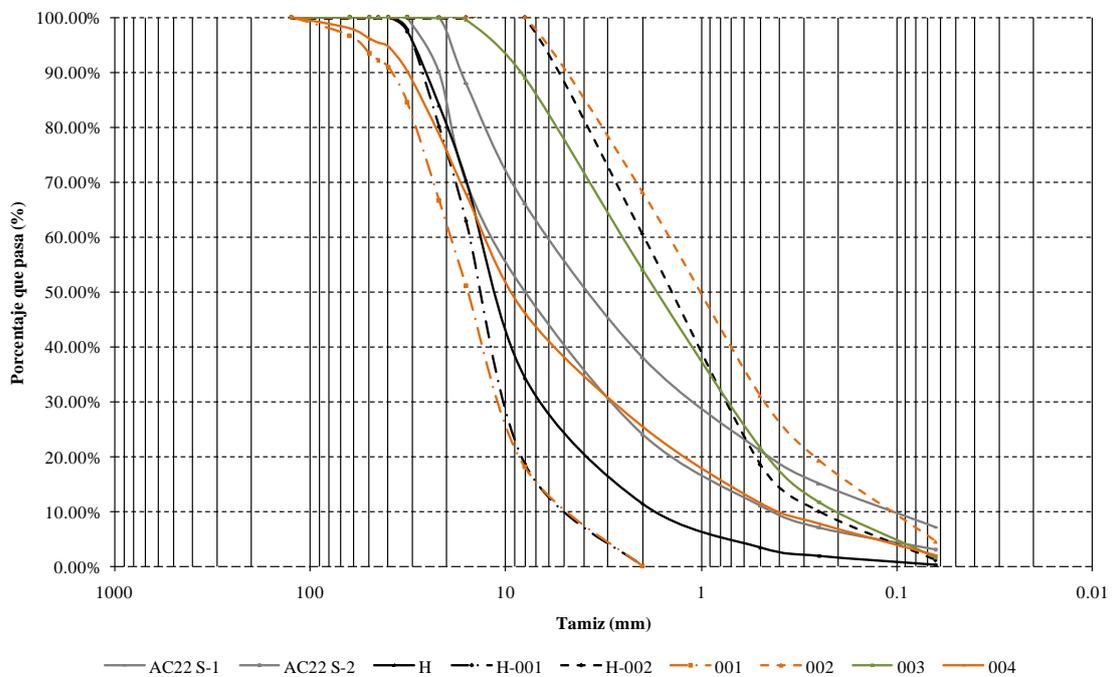
Fuente: Elaboración propia

Figura 61. Muestras comparadas con los husos granulométricos de las mezclas bituminosas en caliente tipo hormigón semidensas AC S 16 según PG3



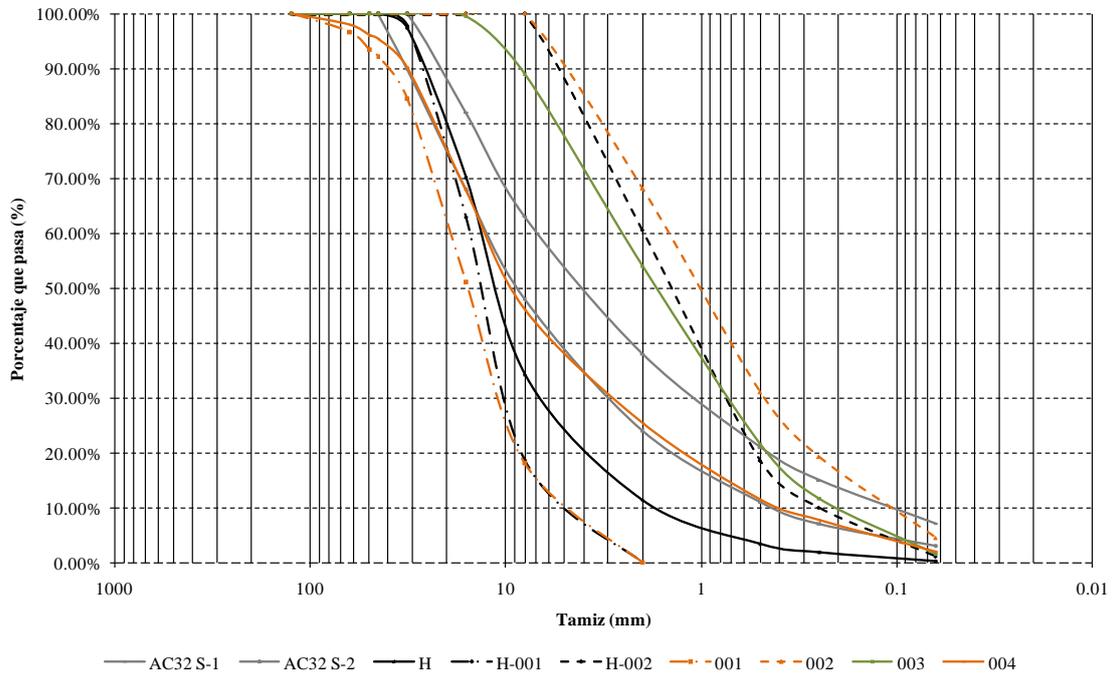
Fuente: Elaboración propia

Figura 62. Muestras comparadas con los husos granulométricos de las mezclas bituminosas en caliente tipo hormigón semidensas AC S 22 según PG3



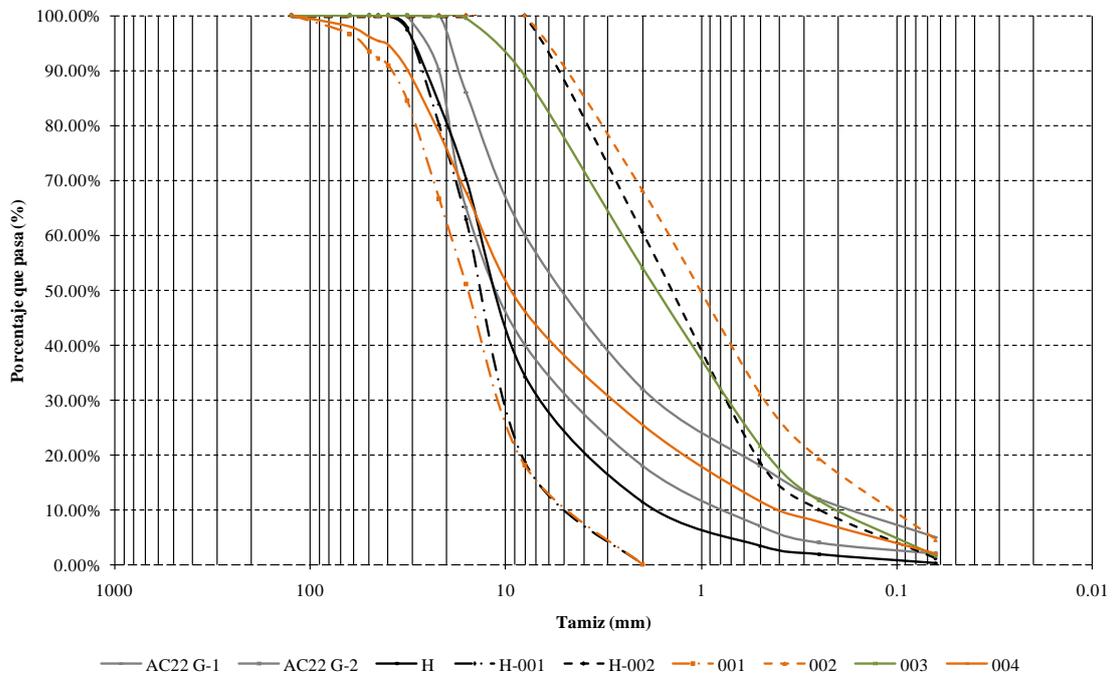
Fuente: Elaboración propia

Figura 63. Muestras comparadas con los husos granulométricos de las mezclas bituminosas en caliente tipo hormigón semidensas AC S 32 según PG3



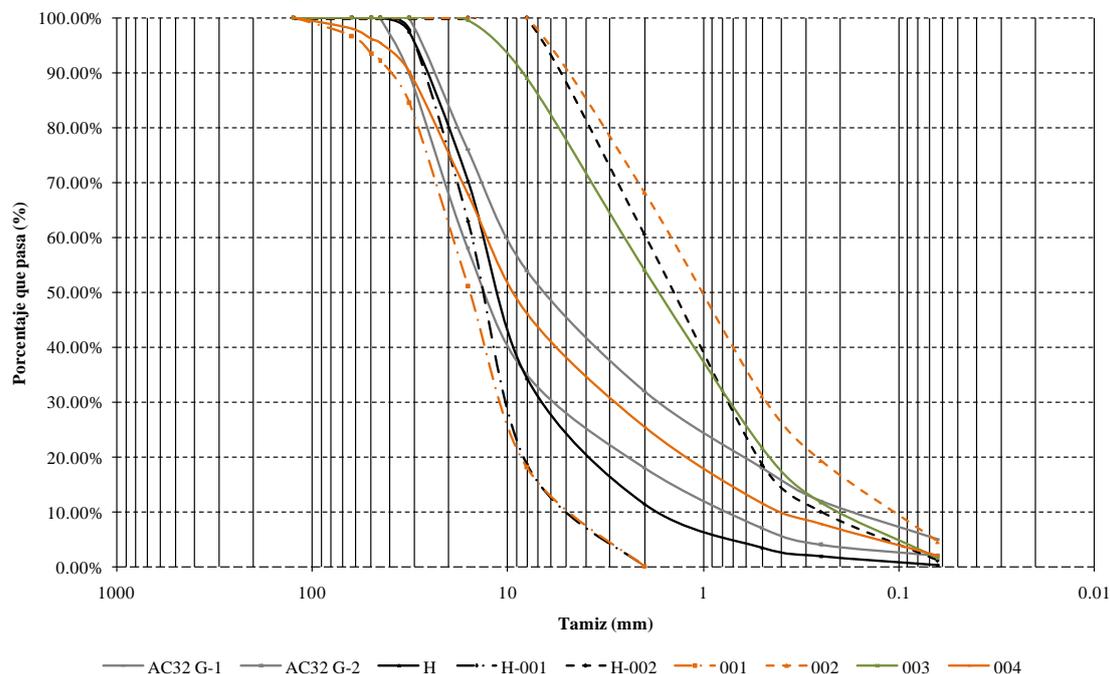
Fuente: Elaboración propia

Figura 64. Muestras comparadas con los husos granulométricos de las mezclas bituminosas en caliente tipo hormigón gruesas AC G 22 según PG3



Fuente: Elaboración propia

Figura 65. Muestras comparadas con los husos granulométricos de las mezclas bituminosas en caliente tipo hormigón gruesas AC G 32 según PG3



Fuente: Elaboración propia

6.1.3.3.14. Artículo 543: Mezclas bituminosas para capas de rodadura. Mezclas drenantes y discontinuas (Parte 5: Firmes)

Las mezclas bituminosas en caliente para capas de rodadura son aquellas cuyos materiales son la combinación de un ligante hidrocarbonado, árido, de granulometría continua o discontinua según el caso, polvo mineral y eventualmente aditivos, de manera que todas las partículas del árido queden recubiertas por una película homogénea de ligante.

Las mezclas pueden ser de dos tipos:

- Mezclas bituminosas drenantes, son aquellas que por su baja proporción de árido fino, presentan un contenido muy alto de huecos interconectados que le proporcionan características drenantes. Se denominan PA, seguido del tamaño máximo del árido, distinguiéndose los tipos PA16 y PA 11.
- Mezclas bituminosas discontinuas, son aquellas cuyos áridos presenta una discontinuidad granulométrica muy acentuada en los tamices inferiores al árido grueso. A efectos de aplicación de este artículo se distinguen dos clases de mezclas bituminosas discontinuas en función de dos husos granulométricos, la BBTM A y BBTM B, con tamaños máximos nominales de 8 y 11mm, dando lugar a 4 tipos de mezclas bituminosas discontinuas a emplear: BBTM 8A, BBTM 11A, BBTM 8B y BBTM11B.

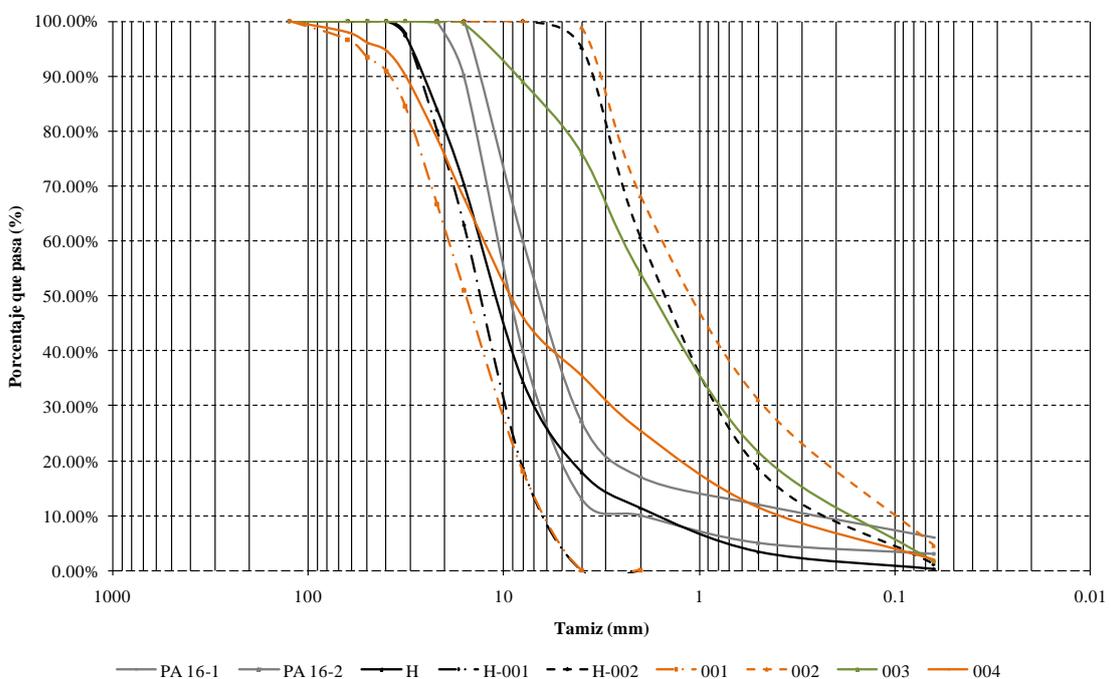
Con carácter general, al árido se le exige que no sea susceptible a ningún tipo de meteorización o alteración físico-química y que en contacto con agua no de lugar a disoluciones que puedan afectar a estructuras u otras capas de firme. Además deberá estar exento de terrones de arcilla, material vegetal, margas u otras materias extrañas que puedan alterar la durabilidad de la capa y su equivalente de arena, como se refleja en la Tabla 123, debe ser superior a 50.

La Tabla 123 indica cuáles han de ser las prescripciones generales del árido así como las propias de la fracción fina y gruesa, que como se observa no se cumplen para ninguna de las fracciones.

La granulometría del árido obtenido para estas aplicaciones (incluido el polvo mineral), según el tipo de mezcla, debe estar comprendida dentro de los husos fijados que se dibujan de la Figura 66 a la Figura 71, observándose que para estas aplicaciones tan sólo las muestras de hormigón H y escombros 004 triturados podrían ajustarse a los husos para las mezclas bituminosas drenantes PA 16 y PA 11 siempre que sean ajustadas al ser eliminados los tamaños superiores a 16 y 11 mm respectivamente.

Por lo que se puede concluir que ninguna de las muestras estudiadas podría tener su aplicación en mezclas bituminosas para capas de rodadura, mezclas drenantes y discontinuas.

Figura 66. Muestras comparadas con los husos granulométricos de las mezclas bituminosas para capas de rodadura. Mezclas drenantes PA 16 según PG3



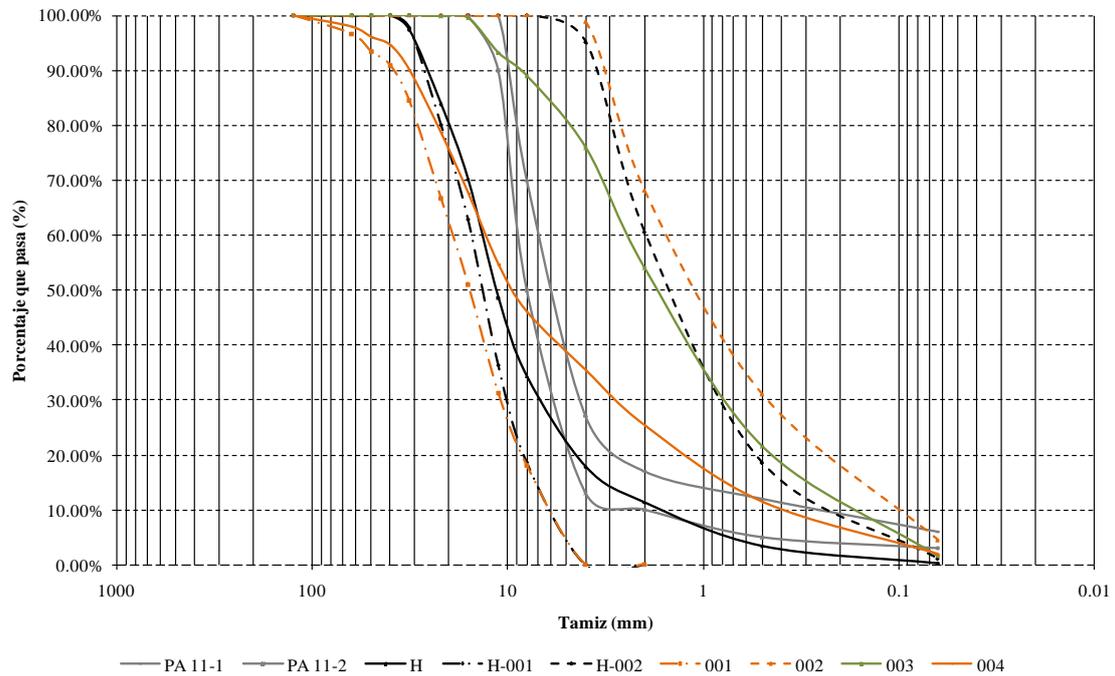
Fuente: Elaboración propia

Tabla 123. Cumplimiento de los requisitos del árido para mezclas bituminosas para capas de rodadura. Mezclas drenantes y discontinuas según PG3

MEZCLAS BITUMINOSAS PARA CAPAS DE RODADURA. MEZCLAS DRENANTES Y DISCONTINUAS										
Material	EA>50	Árido grueso y fino								
		Resistencia a la fragmentación								
		Mezcla discontinua						Mezcla drenante		
		T00 y T0		T1 y T2		T3 y arcenes	T4	T00 y T0	T1 y T2	T3 y arcenes
		BBTMA	BBTMB	BBTMA	BBTMB	BBTMA y BBTMB		PA		
		LA≤15	LA≤15	LA≤20	LA≤15	LA≤25		LA≤15	LA≤20	LA≤25
H	50,47±6,20	28.10±0.69	28.10±0.69	28.10±0.69	28.10±0.69	28.10±0.69	28.10±0.69	28.10±0.69	28.10±0.69	28.10±0.69
H-001	50,47±6,20	28.10±0.69	28.10±0.69	28.10±0.69	28.10±0.69	28.10±0.69	28.10±0.69	28.10±0.69	28.10±0.69	28.10±0.69
H-002	50,47±6,20	28.10±0.69	28.10±0.69	28.10±0.69	28.10±0.69	28.10±0.69	28.10±0.69	28.10±0.69	28.10±0.69	28.10±0.69
001	39,62±11,16	29.27±6,11	29.27±6,11	29.27±6,11	29.27±6,11	29.27±6,11	29.27±6,11	29.27±6,11	29.27±6,11	29.27±6,11
002	39,62±11,16	29.27±6,11	29.27±6,11	29.27±6,11	29.27±6,11	29.27±6,11	29.27±6,11	29.27±6,11	29.27±6,11	29.27±6,11
003	19,54±4,02	-	-	-	-	-	-	-	-	-
004	39,62±11,16	29.27±6.11	29.27±6.11	29.27±6.11	29.27±6.11	29.27±6.11	29.27±6.11	29.27±6.11	29.27±6.11	29.27±6.11

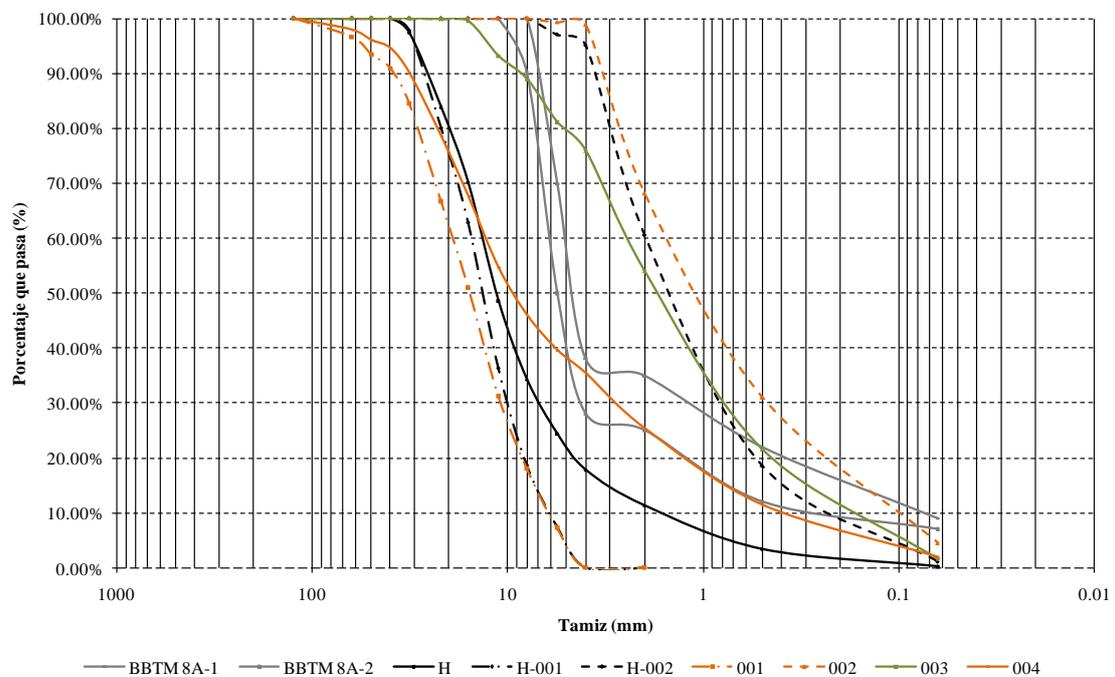
Fuente: Elaboración propia

Figura 67. Muestras comparadas con los husos granulométricos de las mezclas bituminosas para capas de rodadura. Mezclas drenantes PA 11 según PG3



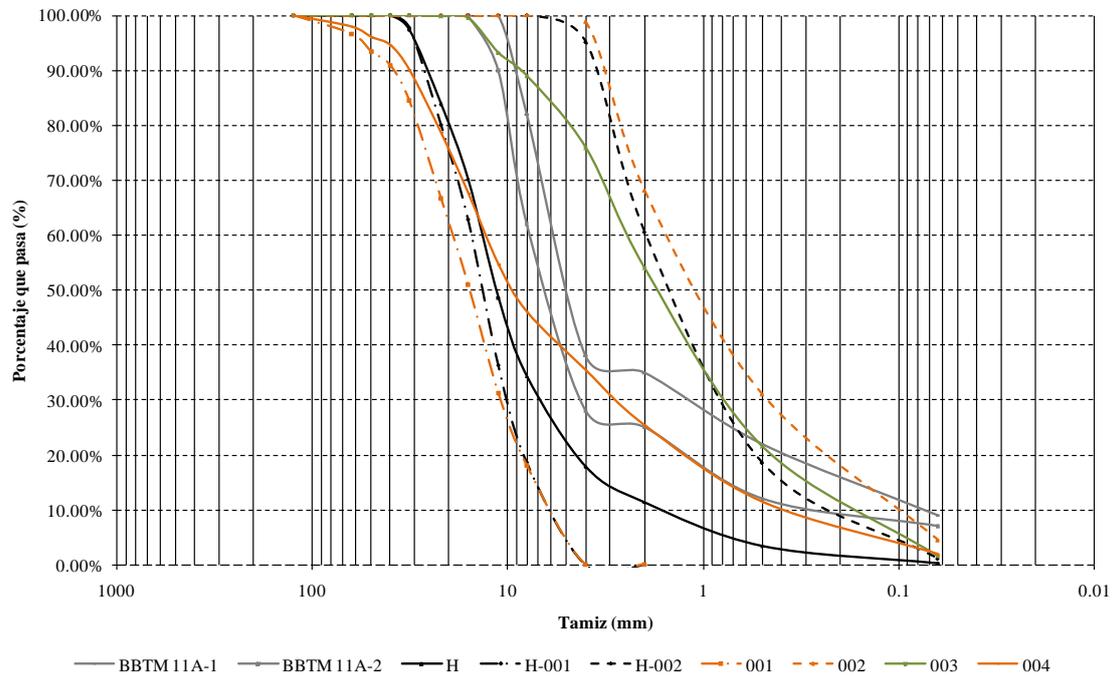
Fuente: Elaboración propia

Figura 68. Muestras comparadas con los husos granulométricos de las mezclas bituminosas para capas de rodadura. Mezclas discontinuas BBTM 8A según PG3



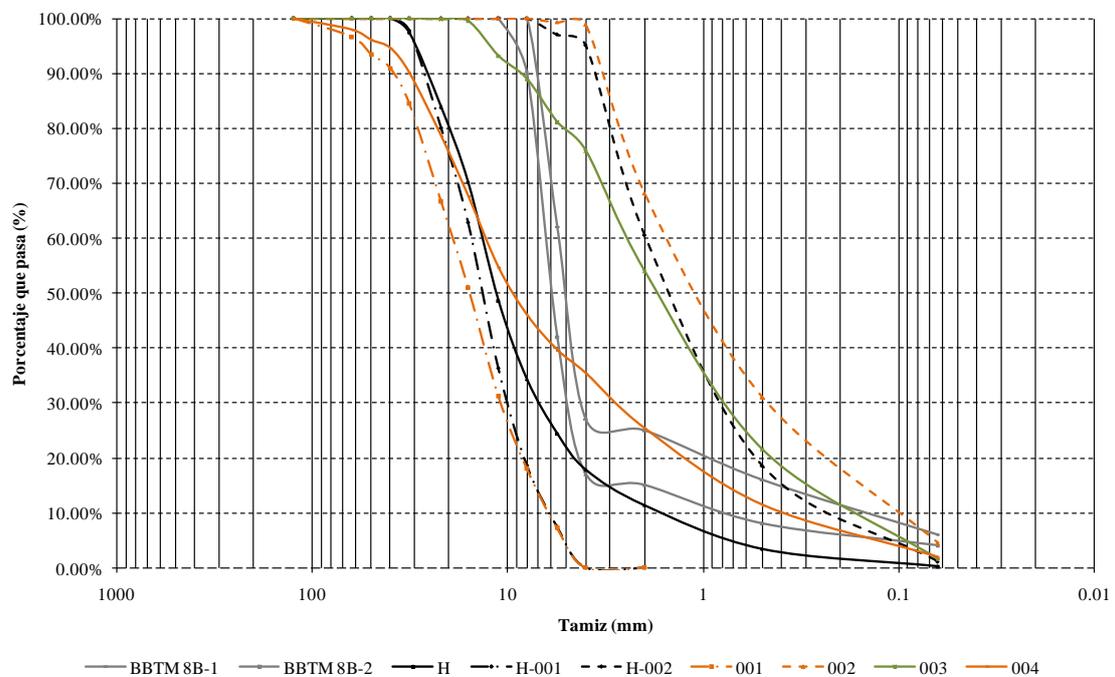
Fuente: Elaboración propia

Figura 69. Muestras comparadas con los husos granulométricos de las mezclas bituminosas para capas de rodadura. Mezclas discontinuas BBTM 11A según PG3



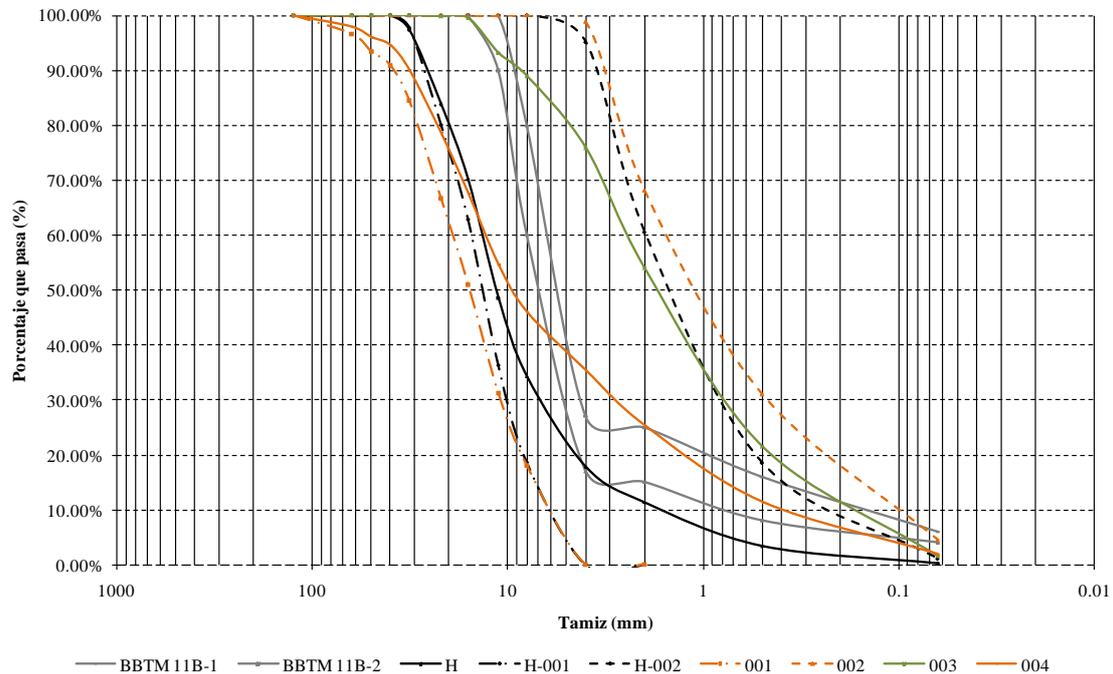
Fuente: Elaboración propia

Figura 70. Muestras comparadas con los husos granulométricos de las mezclas bituminosas para capas de rodadura. Mezclas discontinuas BBTM 8B según PG3



Fuente: Elaboración propia

Figura 71. Muestras comparadas con los husos granulométricos de las mezclas bituminosas para capas de rodadura. Mezclas discontinuas BBTM 11B según PG3



Fuente: Elaboración propia

6.1.3.3.15. Artículo 550: Pavimentos de hormigón (Parte 5: Firmes)

Se define como pavimento de hormigón el constituido por un conjunto de losas de hormigón en masa separadas por juntas transversales, o por una losa continua de hormigón armado, en ambos casos eventualmente dotados de juntas longitudinales.

El árido empleado debe cumplir las prescripciones de la Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08 además de las descritas en la Tabla 124. Como se ha indicado anteriormente, el árido reciclado propuesto no presenta las características físicas y mecánicas adecuadas para la fabricación de hormigón. Por una parte, según lo indicado en la Tabla 100, todas las muestras de árido estudiado presentan un valor de equivalente de arena muy inferior al establecido según los ambientes de exposición, lo que indica, que aunque los finos que posee no son de carácter arcilloso, el material no presenta el grado suficiente de limpieza para este uso. Además de que según lo establecido en el anexo 15 de la EHE-08, salvo las fracciones gruesas de hormigón triturado H-001 y de escombro triturado 001, el resto tienen más de un 5% en masa de granos de menos de 4mm. Por otra parte, la presencia de sulfatos (ver Tabla 102) sólo hace viables a las muestras procedentes de hormigón triturado en la elaboración de hormigón.

Por lo tanto, según las limitaciones específicas para la aplicación de pavimentos de hormigón de la Tabla 124 en cuanto al árido grueso y fino, sólo se podría utilizar para esta aplicación la fracción gruesa del árido reciclado procedente de hormigón H-001, en tanto que cumpliría las especificaciones de la Instrucción

EHE-08 además de los requisitos específicos de poseer un tamaño máximo inferior a 40mm, un coeficiente de Los Ángeles de 28.10, inferior al 35 establecido y un índice de lajas inferior a 35.

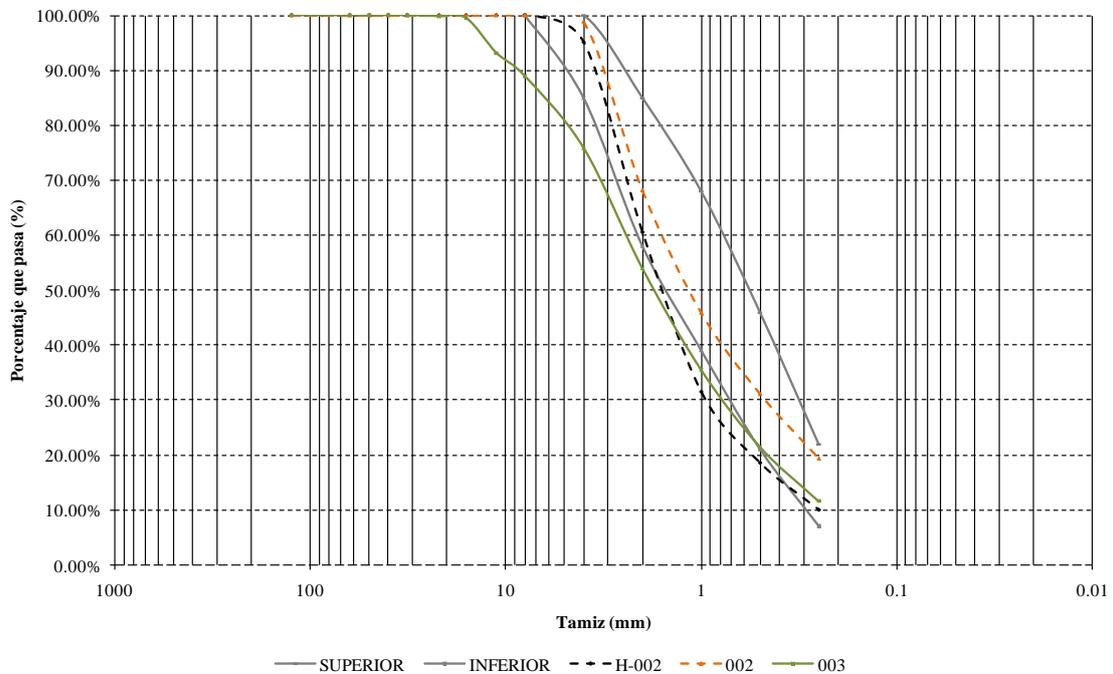
Tabla 124. Cumplimiento de los requisitos del árido para pavimentos de hormigón según PG3

Material	PAVIMENTOS DE HORMIGÓN				
	Árido grueso ¹			Árido fino	
	D≤40mm	LA<35	IL<35	EA	
				>75	>80 en zonas con heladas
H	31.5	28.10±0.69	√	-	-
H-001	31.5	28.10±0.69	√	-	-
H-002	4	-	-	50,47±6,20	50,47±6,20
001	63	29.27±6,11	√	-	-
002	4	-	-	39,62±11,16	39,62±11,16
003	16	-	-	19,54±4,02	19,54±4,02
004	63	29.27 ±6.11	√	-	-

¹Parte del árido total retenida por el tamiz 4mm UNE-EN 933-2 y suministrado en dos fracciones

Fuente: Elaboración propia

Figura 72. Muestras de árido fino comparadas con los husos granulométricos de las arenas para pavimentos de hormigón según PG3



Fuente: Elaboración propia

El árido fino debe ser una arena natural rodada, permitiendo la Dirección de Obra una proporción determinada de arena de machaqueo, debiendo quedar comprendida dentro de los husos especificados en la Figura 72.

En el árido reciclado estudiado, aunque el árido fino no cumple los requisitos físico-químicos, por su distribución granulométrica se puede comprobar que resultarían adecuadas las fracciones de arena procedentes de hormigón y escombros triturados, no así la tierra vegetal que presenta un tamaño demasiado grueso.

En conclusión, la única muestra viable para esta aplicación de pavimento de hormigón sería el árido grueso triturado procedente de hormigón H-001.

6.1.3.3.16. Artículo 551: Hormigón magro vibrado (Parte 5: Firmes)

Hormigón magro vibrado es la mezcla homogénea de áridos, cemento, agua y aditivos, empleada en capas de base bajo pavimento de hormigón, que se pone en obra con una consistencia tal que requiere el empleo de vibradores internos para su compactación.

Se propone el empleo de áridos reciclados en el marco del cumplimiento del anterior Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición 2001-06 (PNRCD) (Ministerio de Medioambiente 2001) y, por tanto, del actual II Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición 2007-15 (II PNRCD) (Ministerio de Medioambiente y Medio Rural y Marino 2008), siempre que al ser tratados cumplan con las especificaciones del artículo.

El árido deberá cumplir exactamente los mismos requisitos físicos, químicos (ver Tabla 124) y granulométricos (ver Figura 72) que para la aplicación anterior de pavimentos de hormigón, por lo que la única muestra viable para esta la confección de hormigón magro vibrado sería el árido grueso triturado procedente de hormigón H-001.

6.2. Análisis de resultados de los ensayos realizados al árido reciclado en la segunda fase de elaboración de morteros y discusión

En esta fase de trabajo se presentan los resultados obtenidos de la aptitud física, química y la composición de los áridos reciclados procedentes de RCD de hormigón y mixtos de tamaño 0/8mm para la elaboración de hormigón, según la Instrucción EHE-08 y la UNE-EN 12620. Así mismo, se incorporan los resultados de resistencia mecánica y densidad obtenidos de los morteros elaborados con dichos áridos reciclados, al objeto de establecer las dosificaciones óptimas que se emplearán en la siguiente fase de elaboración de prefabricados no estructurales en fábrica.

6.2.1. Aptitud de los áridos reciclados

6.2.1.1. Aptitud granulométrica del árido reciclado

Desde el punto de vista granulométrico, la elección del árido reciclado empleado en esta fase de trabajo estuvo condicionada por la granulometría que presentaba el árido natural proporcionado por la empresa de prefabricados.

En la Tabla 125 se representan los datos correspondientes al contenido en finos y la designación que le correspondería a las distintas fracciones de los áridos reciclados procedentes de la trituración de residuos de construcción y demolición de hormigón y mixto, así como del natural consideradas en esta fase de trabajo, según la Instrucción EHE-08 (EHE-08 2008) y la norma UNE-EN 12620 (UNE-EN 12620:2003+A1 2009, prEN 12620 2013), pudiéndose comprobar, por una parte, la concordancia en cuanto a los tamaños que presentan los áridos reciclados respecto del natural y, por otra, que los áridos estudiados tienen consideración de árido todo uno, con predominio de la fracción fina. Así mismo, se puede observar que los áridos reciclados presentan un contenido en finos mucho menor que el árido natural.

Tabla 125. Designación y contenido en finos de los áridos según artículo 28.2 EHE-08 y norma UNE-EN 12620

MUESTRA	DESIGNACIÓN				CONTENIDO EN FINOS		
	EHE-08	UNE-EN 12620			% QP# 0.063	EHE-08	Categoría
		Tamaño	Tipo	Categoría			
Hormigón	AG-0/8-T-R	D>4 y d=0	Todo uno	G _A 90	0.15	1.5	f ₃
Mixto	AG-0/8-T-R	D>4 y d=0	Todo uno	G _A 90	0.15	1.5	f ₃
Natural	AG-0/8-T	D>4 y d=0	Todo uno	G _A 90	4.80	1.5	f ₁₁

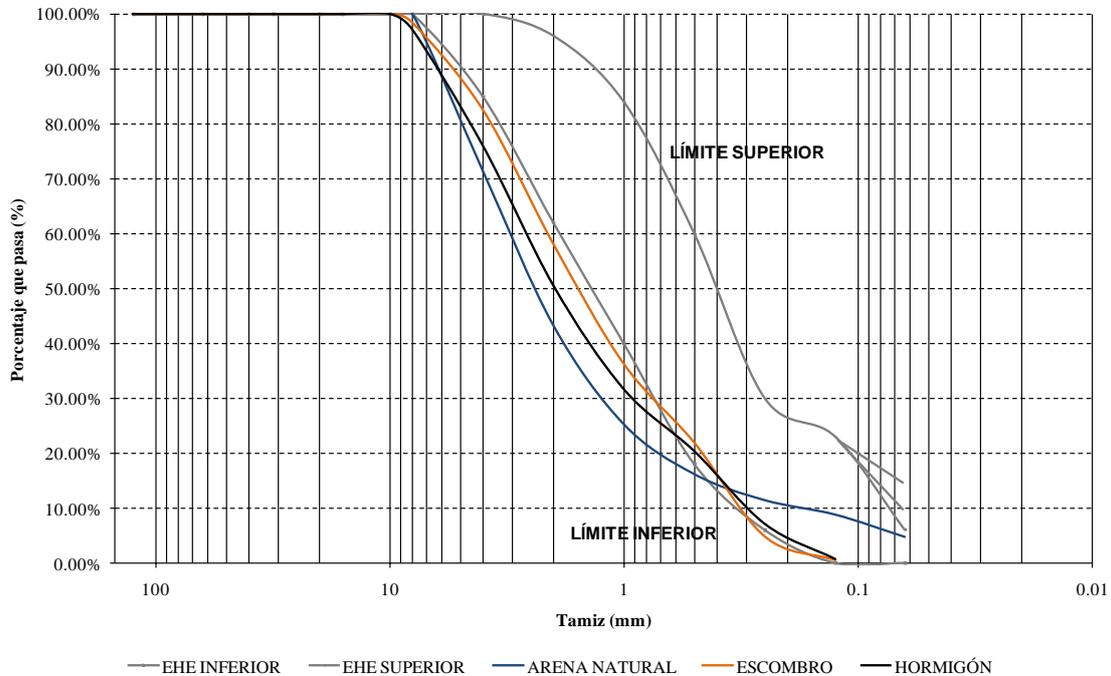
Fuente: Elaboración propia

En el estudio de la gradación por tamaños de los tres tipos de áridos, se han tenido en cuenta las recomendaciones que establece la EHE-08 en cuanto a la distribución granulométrica que deben presentar los áridos finos, además de los métodos granulométricos Dreux (Dreux 1981, Fernández Cánovas 1989, García Meseguer 2001, Jiménez Montoya, García Meseguer et al. 2000), el de la norma ASTM C 33-980 (ASTM C 33-11 2011) y la DIN 1045-1 (DIN 1045-1 2008).

En general se observó (Figura 73 a Figura 76) que, aunque el árido estudiado se ha designado como todo uno, en la práctica es una arena, que cuenta con un porcentaje muy pequeño de granos de tamaño superior a 4mm. Así mismo, se pudo constatar que las curvas granulométricas de los áridos reciclados se ajustaban bien, en tanto que las áreas dibujadas por encima y por debajo de la de referencia, en este caso la de la arena natural, quedan relativamente bien compensadas; además, el contenido en finos inferiores a 0.063mm y en partículas inferiores a 0.5mm es bastante menor en ambos áridos reciclados con respecto del natural, lo que contribuirá a reducir la cantidad de agua necesaria para el mojado

de los finos en el hormigón que se confeccione con estos áridos, cuya absorción es notablemente superior a la del árido natural.

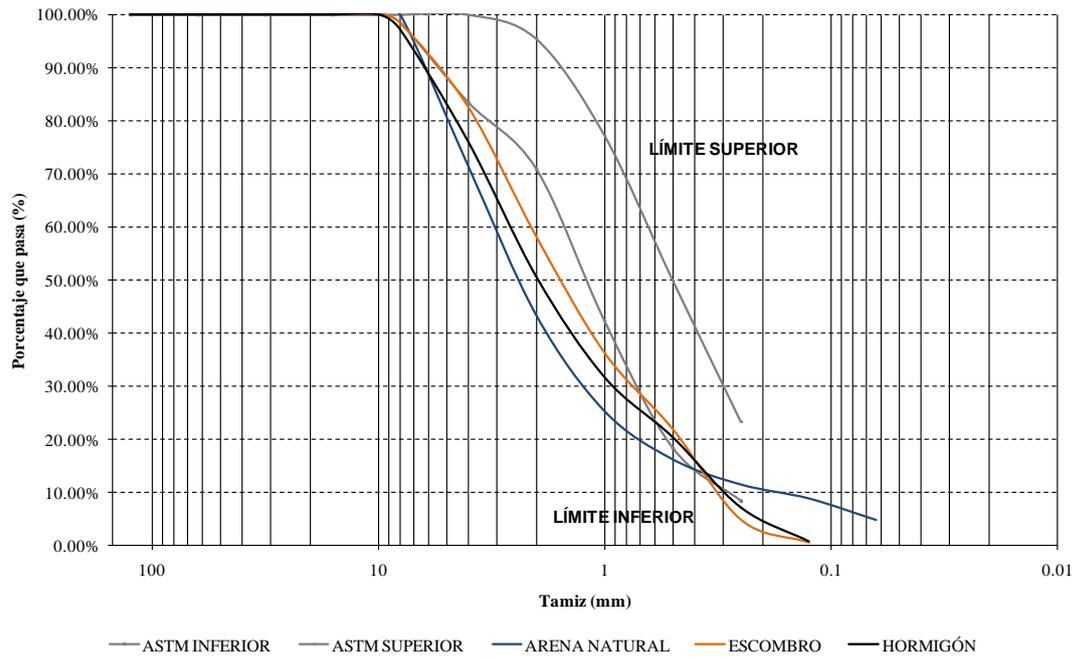
Figura 73. Muestras de áridos para la elaboración de morteros comparadas con los husos granulométricos de la arena según la Instrucción EHE-08



Fuente: Elaboración propia

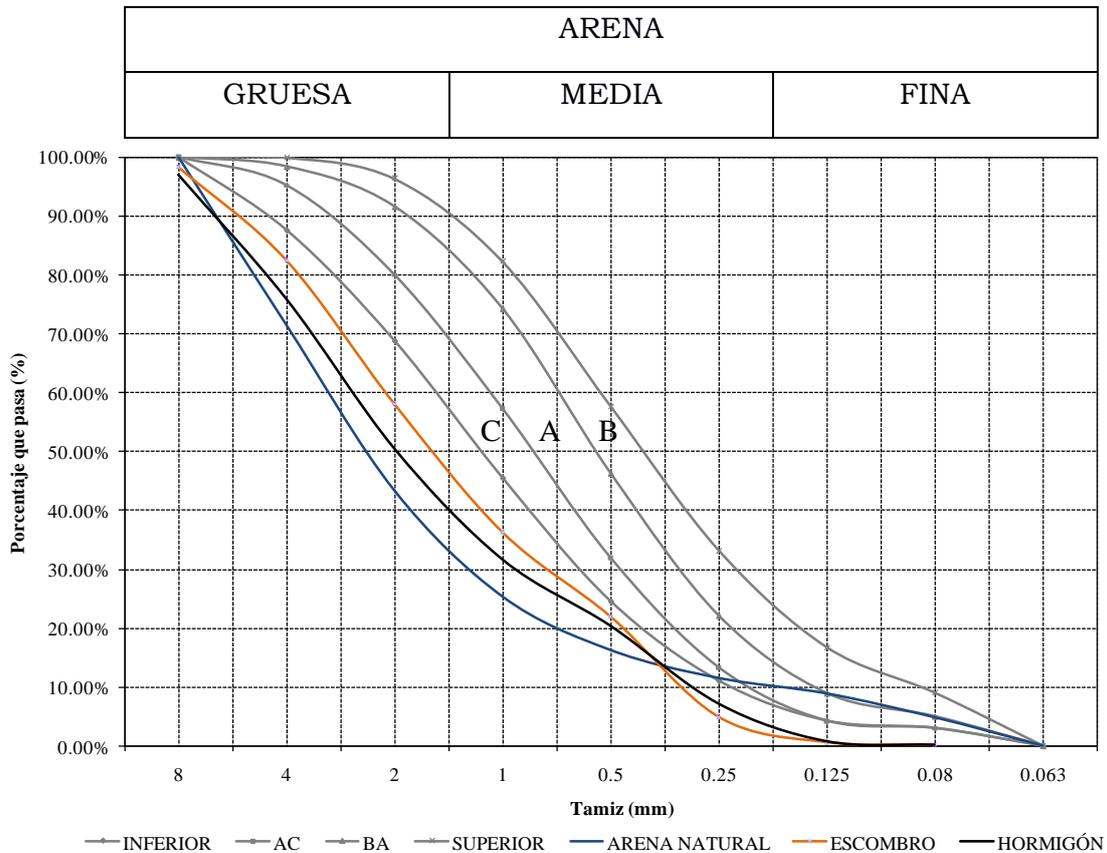
Así mismo se pudo observar que, tanto la arena natural como las recicladas, no se ajustaban a los husos granulométricos de las arenas según la Instrucción EHE-08, ASTM y Dreux (ver Figura 73 a Figura 76), quedando en todos los casos por debajo de sus límites inferiores, y resultando más cercanas a dichos límites las arenas recicladas que la natural. Esta apreciación queda constatada al estudiarles su módulo granulométrico que presenta un valor medio de 4.23 para la arena natural, 4.16 para la procedente de hormigón reciclado y 3.97 para la de escombros triturados, lo que corrobora que son arenas algo gruesas para elaborar hormigón, dando lugar a masas resistentes con disminución de la docilidad. Por el contrario, al ser comparadas con los husos DIN 1045-1 de la Figura 73 a la Figura 76, resultan todos los áridos favorables para la elaboración de un hormigón que presente buena docilidad, en estado fresco, y sea resistente mecánicamente.

Figura 74. Muestras de áridos según los husos granulométricos para la arena ASTM C 33-11



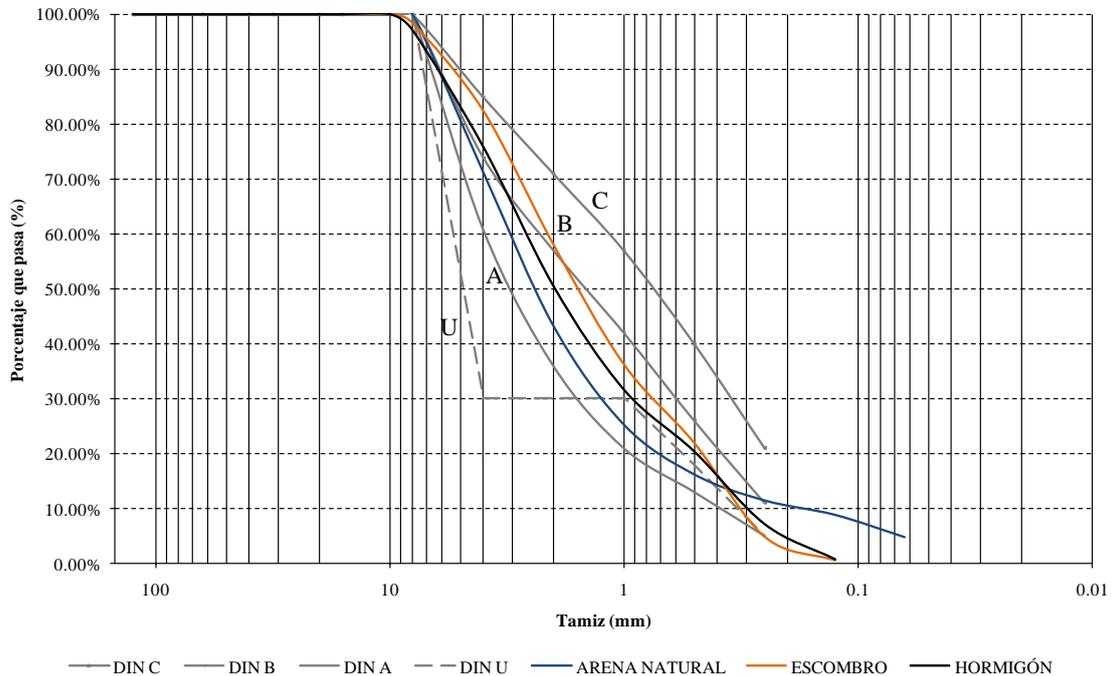
Fuente: Elaboración propia

Figura 75. Muestras de áridos para la elaboración de morteros comparadas con los husos Dreux



Fuente: Elaboración propia

Figura 76. Muestras de áridos para la elaboración de morteros comparadas con los husos granulométricos para la arena DIN 1045-1



Fuente: Elaboración propia

6.2.1.2. Determinación de la densidad y absorción de agua del árido reciclado

Los resultados de los ensayos conducentes a la determinación de la densidad y absorción al agua de los áridos estudiados se presentan en la Tabla 126, comprobándose que las densidades de las partículas tras secado en estufa y de las partículas saturadas con la superficie seca de los tres materiales son muy similares, aunque ligeramente inferior en el árido triturado procedente de hormigón (4.8%) y el mixto (6.6%) respecto del natural. Así mismo, la absorción de agua es mayor en los materiales reciclados, más alta en el caso del árido mixto, con un coeficiente de 6.430%, que en el hormigón triturado, con un 5.679%, respecto del árido natural, que es prácticamente nula, con un coeficiente de 0.141%. Estas notables diferencias en ambos parámetros, se deben a la presencia de mortero adherido en los áridos reciclados, sumada a la mayor cantidad de material cerámico que presenta el escombro triturado y que, por tanto, hace que durante la fabricación del material aglomerado requieran de una mayor cantidad de agua de amasado.

Según los resultados de densidad, con valores superiores a la limitación de 2.0 kg/dm³ establecida en la UNE-EN 12620, muy cercanos a los máximos contrastados en la bibliografía recogidos en la Tabla 64, los áridos reciclados resultarían viables para ser utilizados en la elaboración de hormigón.

Por su parte, en cuanto a los valores de absorción, según la limitación de fijada por la Instrucción EHE-08 en su artículo 28 (EHE-08 2008) del 5% máximo, las

muestras estudiadas no presentan el coeficiente de absorción adecuado para ser utilizadas. No obstante, según los datos contrastados en la bibliografía consultada, presentan para los áridos reciclados de este tamaño, coeficientes de absorción muy similares a los arrojados por el árido reciclado estudiado (Mas, Cladera et al. 2011, Padmini, Ramamurthy et al. 2009, WRAP 2007). En todo caso, según el anejo 15 se permitiría una mezcla de árido natural y reciclado para elaborar hormigón, en proporciones 80-20% respectivamente, de manera que la absorción total no resulte superior al 7%, lo que se conseguiría ampliamente con la incorporación de árido natural al árido reciclado.

Tabla 126. Valores de densidad y absorción de los áridos utilizados en la elaboración de morteros

MUESTRA	DENSIDAD DE LAS PARTÍCULAS (kg/dm ³)		ABSORCIÓN (%)
	Tras secado en estufa	Saturadas con superficie seca	
Hormigón	2.546	2.690	5.679
Mixto	2.498	2.658	6.430
Natural	2.675	2.679	0.141

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en los resultados de resistencia mecánica de los morteros elaborados con estos áridos, que se presentan a continuación en el apartado 6.2.2.2., en las pruebas iniciales se obtuvieron unos resultados de resistencia muy bajos, que se atribuyeron a la falta de adherencia que presentan el árido reciclado, de un considerable índice de absorción, con una pasta relativamente pobre en cemento y escasa en agua. Según la bibliografía consultada (Etxeberria, Vázquez 2010, Debieb, Kenai 2008, González-Fontebo, Martínez-Abella 2008, Katz 2003, Tam, Tam et al. 2007), para obtener una mayor adherencia en los componentes del mortero y por tanto una mayor resistencia en las probetas elaboradas con el árido reciclado, se procedió a su mojado con el 80% del agua correspondiente a su absorción, 24 horas antes de ser utilizado.

Tabla 127. Composición química de los áridos reciclados utilizados en los morteros

MUESTRA	COMPUESTOS DE AZUFRE			CLORUROS		PARTÍCULAS BLANDAS
	TOTALES	SOLUBLES EN AGUA	SOLUBLES EN ÁCIDO	SOLUBLES EN AGUA	SOLUBLES EN ÁCIDO	
Hormigón	0.66	0.53	0.54	0.014	0.007	0
Mixto	1.03	0.90	0.84	0.021	0.014	0

Fuente: Elaboración propia

6.2.1.3. Determinación de los componentes químicos del árido reciclado

La composición química de los materiales granulares objeto de estudio en esta fase de trabajo se muestra en la Tabla 127 donde se constata la viabilidad de los áridos reciclados según lo prescrito en la Instrucción EHE-08, salvo en el caso del

árido reciclado mixto que incumple tímidamente el valor máximo de sulfatos totales (1%) y solubles en ácido (0.80%).

6.2.1.4. Clasificación de los componentes de los áridos gruesos reciclados

La composición de los áridos reciclados influye considerablemente en las características de los productos que se elaboren con ellos. No obstante, recientes investigaciones han determinado que su comportamiento va a depender más del sistema de tratamiento recibido en la planta de valorización que de su propia composición (Barbudo 2012).

La recomendación que establece la norma UNE-EN 12620 en cuanto a la clasificación de los componentes de los áridos gruesos reciclados, así como a la declaración de la categoría, se presenta en la Tabla 128. Los áridos reciclados empleados en las fases de trabajo 2 y 3, conducentes a establecer las dosificaciones óptimas para la elaboración de las piezas prefabricadas, se han clasificado en función de los componentes de los áridos gruesos reciclados, según el método de ensayo establecido en la norma UNE- EN 933-11 (UNE EN 933-11 2009).

El árido reciclado de hormigón estudiado se clasificaría como un árido reciclado con un 80% de hormigón, un 8.34% de áridos no tratados y un 11.66% de material cerámico.

El árido reciclado mixto, por su parte, podría ser clasificado como un árido reciclado con un 63.01% de hormigón, un 5.00% de áridos no tratados, un 31.85% de material cerámico y un 0.14% de partículas flotantes.

Los resultados sobre la clasificación de ambos materiales granulares en función de su composición indican el incumplimiento del contenido máximo en material cerámico impuesto en el anejo 15 de la EHE-08 y fijado en un 5%.

Tabla 128. Clasificación de los áridos gruesos reciclados según UNE-EN 933-11 y categoría asignada según UNE-EN 12620

MUESTRA	CONSTITUYENTE	CONTENIDO (%)	CATEGORÍA DECLARADA
Hormigón	Rc	80.00	RC ₈₀
	Rc+Ru	88.34	RCu ₇₀
	Rb	11.66	Rb ₃₀₋
	FL	0.00	FL _{0.2-}
Mixto	Rc	63.01	RC ₅₀
	Rc+Ru	68.01	RCu ₅₀
	Rb	31.85	Rb ₅₀₋
	FL	0.14	FL _{0.2-}

Fuente: Elaboración propia

6.2.2. Aptitud de los morteros

6.2.2.1. Elaboración de probetas de mortero

La fabricación de los morteros se realizó inicialmente siguiendo exactamente el procedimiento operatorio normalizado descrito en la norma UNE-EN 196-1 (UNE-EN 196-1 2005), que especifica el método de ensayo para obtención de la resistencia a compresión, y opcionalmente a flexión, de morteros, así mismo se utilizó la dosificación propuesta por la empresa de prefabricados.

La dosificación del mortero patrón consistió en una mezcla del árido natural proporcionado por la empresa de prefabricados, compuesta por el 64% de tamaño 0/5mm y el 36% restante del tamaño 5/8, con una cantidad del 5% de cemento CEM I 42.5 R y una relación agua cemento de 0.61.

Las probetas elaboradas con árido reciclado, inicialmente, se ejecutaron siguiendo la dosificación del mortero patrón, con la incorporación del árido reciclado previamente mojado al 80% de la cantidad de agua correspondiente a su absorción (ver Tabla 126).

Posteriormente, en el primer ajuste, se aumentó la cantidad de cemento al 7.5% y se incorporaron los dos tipos de aditivos en dos proporciones diferentes (0.5 y 1%). El aditivo FRIOPLAST P de la casa SIKA, es un aditivo compuesto reductor de agua y plastificante, que se caracteriza por regular la viscosidad y facilitar la puesta en obra del hormigón mediante máquinas extrusionadoras. El aditivo reductor de agua y plastificante SIKAPAVER HC-1, de la misma casa comercial, está indicado para conseguir hormigones secos o semisecos de alta capacidad de compactación y desmoldeo instantáneo. Ambos aditivos se emplearon con el fin de mejorar la cohesión y compacidad de los morteros, ya que en el caso de piezas moldeadas se requiere poca cantidad de agua pues la trabajabilidad no es importante, aunque ésta se tenga que aumentar por el nivel de absorción del material cerámico (Poon, Chan 2007) y el mortero adherido que tiene el árido reciclado utilizado.

No sólo hubo que realizar ajustes en las dosificaciones. A sabiendas de que con el método de la norma era imposible conseguir la compacidad necesaria, se procedió a simular en laboratorio el proceso de compactación-vibración utilizado en fábrica, donde el equipo ponedor de prefabricados proporciona a la mezcla fresca una vibración de baja frecuencia a la par que una fuerte compactación por extrusión. Con esta pretensión se necesitó modificar la mesa de sacudidas, que simulaba la vibración de la ponedora en la fábrica, mientras que la presión se intentó conseguir con la fabricación de una tapa con tres casetones de las mismas dimensiones que los huecos del molde de probetas normalizadas de 4x4x16cm, que pretendía proporcionar la compresión necesaria en el momento de la extrusión, aplicando cargas distintas de 4.8kg (sólo la tapa), 9.3kg (tapa + pesa de 4.5kg) y 13.8kg (tapa + pesa de 9kg) sobre las probetas durante el momento de la compactación. En la Figura 77 aparece el equipo de compactación adaptado al ensayo de morteros para la elaboración de prefabricados de hormigón no estructural. Así mismo, en la Figura 78 y la Figura 79 se puede observar el

proceso de fabricación, llenado, desmoldeo y curado de las probetas de mortero elaboradas.

Finalmente, se elaboraron probetas de mortero con sustituciones del árido natural por el 80%, 60% y 40% de los áridos reciclados procedentes de hormigón y mixto.

Figura 77. Equipo de compactación adaptado



Fuente: Elaboración propia

Figura 78. Fabricación de mortero y llenado de probetas



Fuente: Elaboración propia

Figura 79. Desmoldeo y curado de probetas de mortero



Fuente: Elaboración propia

6.2.2.2. Determinación de las resistencias mecánicas de las probetas de mortero

Una vez fabricadas las probetas de mortero, según el procedimiento de la norma UNE-EN 196-1 (UNE-EN 196-1 2005) adaptado a las necesidades de la fábrica y, curadas adecuadamente en cámara húmeda, se procedió a la rotura a flexión y compresión, siguiendo el procedimiento descrito en dicha norma, tanto a la edad de 7 como a 28 días.

6.2.2.2.1. Pruebas iniciales

Las realización de las pruebas iniciales consistió en la fabricación y posterior rotura de probetas de mortero al objeto de determinar los ajustes en el procedimiento de ensayo. Para ello se fabricaron tres tipos de probetas:

- Probetas denominadas “ensayo inicial”, siguiendo el procedimiento de la norma UNE-EN 196-1 y empleando la dosificación proporcionada por la empresa de prefabricados.
- Probetas “sin collarín”, de la misma ejecución que las anteriores, sustituyendo el método de compactación de la norma por la mesa de sacudidas modificada.
- Probetas “con collarín”, igual que las anteriores, utilizando un collarín para evitar movimientos en el molde de las probetas durante la compactación. Este tipo de llenado y compactación de probetas es el que se adopta en las pruebas posteriores.

En la Tabla 129 se pueden comprobar los resultados de resistencia mecánica que se consiguieron en estas pruebas iniciales, que al trasladarlos a los correspondientes gráficos de barras (6.2.2.2.2. Primer ajuste

El primer ajuste realizado en la dosificación de los morteros respondió a la falta de aglutinante que, en muchas ocasiones, provocó que los componentes de las probetas no presentaran la suficiente cohesión, despegándose literalmente por la junta entre las dos tongadas de llenado de cada probeta durante el desmoldado de las mismas (Ver Figura 83).

Figura 81 a Figura 82) ponen de manifiesto las siguientes consideraciones:

- la baja resistencia mecánica tanto a compresión como a flexión que alcanzaron todos los morteros diseñados.
- La notable diferencia en el comportamiento mecánico de los morteros realizados con los áridos reciclados respecto de los elaborados con el árido natural.
- El mayor desarrollo de resistencias mecánicas iniciales a 7 días, tanto a compresión como a flexión, en los morteros fabricados con collarín.
- El mayor desarrollo de resistencias a 28 días, tanto a compresión como a flexión, en los morteros fabricados sin collarín.

Figura 80. Rotura de probetas de mortero a flexión y compresión



Fuente: Elaboración propia

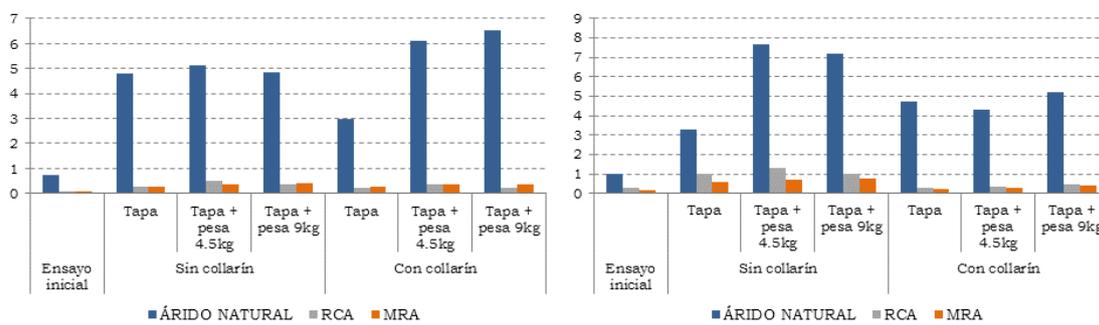
No obstante, la apreciación más significativa a la que se llega es la poca uniformidad observada en el comportamiento de los morteros, cuyas resistencias se presentan, en algunos casos, mayores a 7 días que a 28.

Estos resultados son consecuencia de la dosificación empleada que, junto con el método de compactación, dan lugar a la obtención de probetas de baja calidad. Por lo que, el procedimiento tuvo que ser modificado ya que, por una parte, la dosificación utilizada en la elaboración de prefabricados no estructurales requiere bajas relaciones agua/cemento y contenidos en cemento, de 67 kg/m^3 , muy inferior a los 380 kg/m^3 empleados por Soutsos et al. (Soutsos, Tang et al. 2011) en su investigación sobre adoquines, y a los $307 \pm 3 \text{ kg/m}^3$ que recomienda la ASTM C1646 (ASTM C1646-C1646M-08a 2008), para satisfacer la resistencia al hielo-deshielo; y por otra, ya que no se llegaba a alcanzar la adecuada compacidad del mortero con la mesa compactadora normalizada.

6.2.2.2.2. Primer ajuste

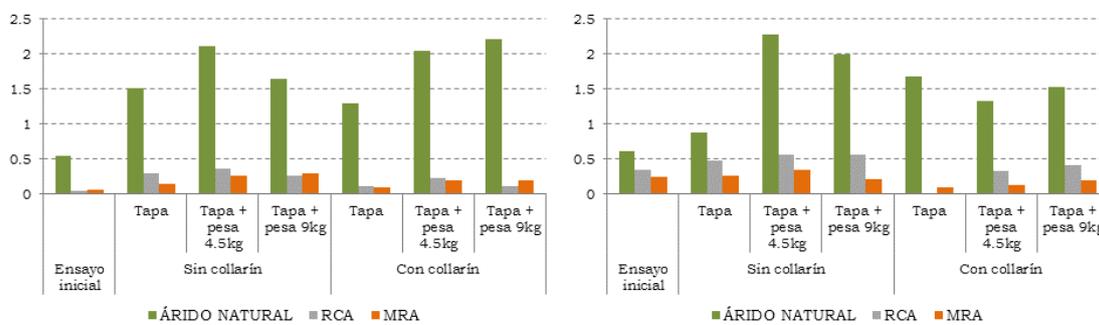
El primer ajuste realizado en la dosificación de los morteros respondió a la falta de aglutinante que, en muchas ocasiones, provocó que los componentes de las probetas no presentaran la suficiente cohesión, despegándose literalmente por la junta entre las dos tongadas de llenado de cada probeta durante el desmoldado de las mismas (Ver Figura 83).

Figura 81. Resistencias a compresión a 7 y 28 días obtenidas por los morteros en las pruebas iniciales



Fuente: elaboración propia

Figura 82. Resistencias a flexión a 7 y 28 días obtenidas por los morteros en las pruebas iniciales



Fuente: elaboración propia

Figura 83. Probetas defectuosas



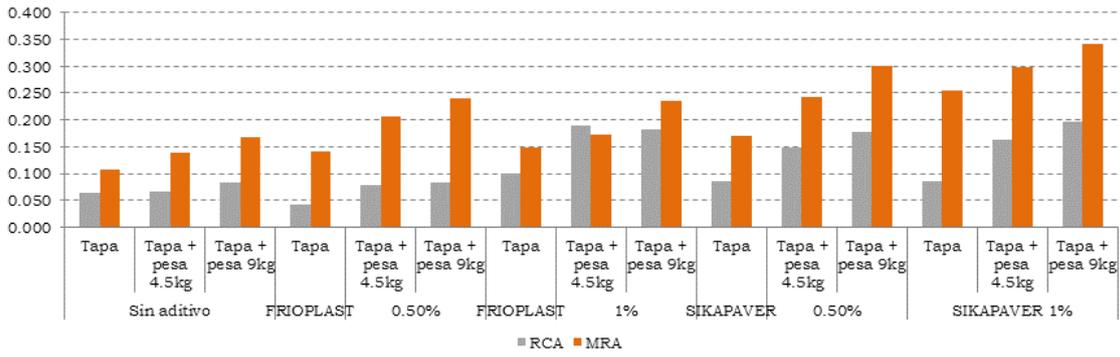
Fuente: Elaboración propia

Por lo que se procedió a aumentar la cantidad de cemento del 5% de las pruebas iniciales al 7.5% y, posteriormente, a incorporar aditivos reductores de agua que mejorasen la cohesión de la pasta. En la Tabla 130 se presentan los resultados arrojados por los ensayos de rotura de las probetas elaboradas con el primer ajuste, en cuya representación gráfica (ver Figura 84 a Figura 87) destaca lo siguiente:

- Un aumento considerable de la resistencia mecánica, en general, que se puede atribuir, por un lado, a la mayor cantidad de cemento añadida y, por otro, al aporte de cohesión en estado freco que proporcionan los aditivos.
- Un mayor desarrollo de resistencias mecánicas, fundamentalmente a corta edad, en los morteros elaborados con árido reciclado mixto (MRA) respecto de los elaborados con el de hormigón (RCA), que se puede atribuir, por una parte, al empleo de un cemento de alta resistencia inicial y, por otra, a la reacción puzolánica de los finos cerámicos.
- Los aditivos incorporados provocaron desarrollos en el comportamiento mecánico de los morteros muy diferentes en función del tipo y cantidad añadida. En general, la resistencia mecánica desarrollada con la incorporación de los aditivos es mayor a primeras edades, y mejor con la proporción más baja de aditivo.
- Se encontró un mejor comportamiento mecánico, en general, con la adición del aditivo FRIOPLAST que con la de SIKAPAVER.

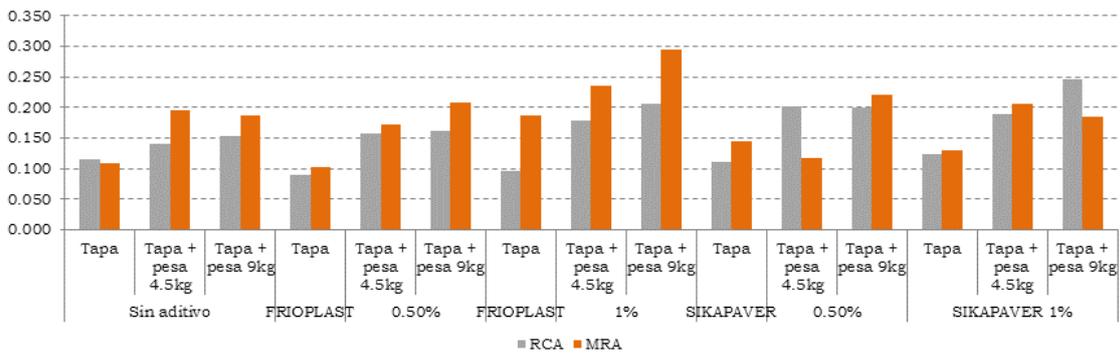
Fundamentalmente se pudo corroborar que, a pesar de que estos ajustes mostraron un desarrollo más uniforme en las resistencias mecánicas, a medida que se aumentaba la presión de compactación, no se pudo lograr resistencias próximas o similares a las arrojadas por las pruebas realizadas al mortero patrón. Además, el método de compactación seguía siendo deficiente y algunas probetas presentaban claros problemas de descohesión, por lo que tenían que ser elaboradas de nuevo.

Figura 84. Resistencias a flexión a 7 días de los morteros en el primer ajuste de dosificación



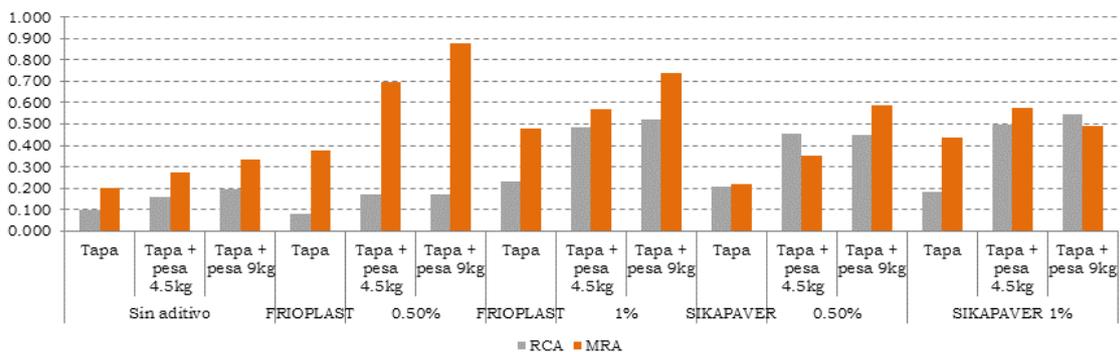
Fuente: Elaboración propia

Figura 85. Resistencias a flexión a 28 días de los morteros en el primer ajuste de dosificación



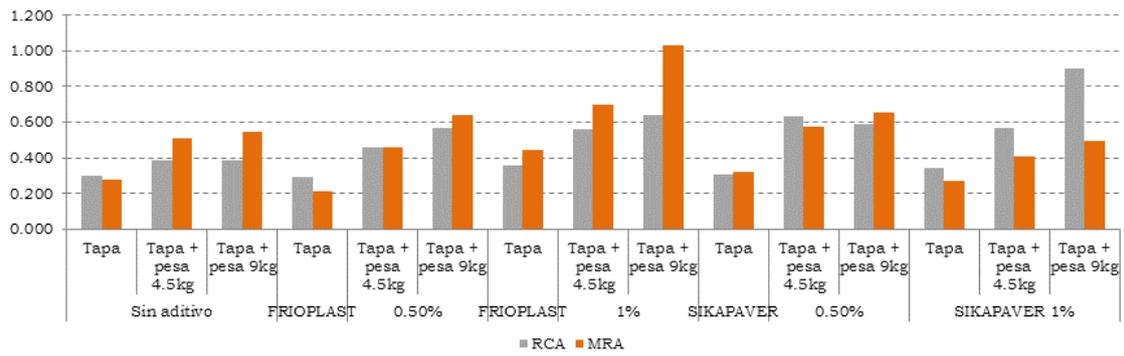
Fuente: Elaboración propia

Figura 86. Resistencias a compresión a 7 días de los morteros en el primer ajuste de dosificación



Fuente: Elaboración propia

Figura 87. Resistencias a compresión a 28 días de los morteros en el primer ajuste de dosificación



Fuente: Elaboración propia

Tabla 129. Resistencia de los morteros ensayados en la prueba inicial

		RESISTENCIA A FLEXIÓN (N/mm ²)						RESISTENCIA A COMPRESIÓN (N/mm ²)					
		7 DÍAS			28 DÍAS			7 DÍAS			28 DÍAS		
		AN	RCA	MRA	AN	RCA	MRA	AN	RCA	MRA	AN	RCA	MRA
Ensayo inicial		0.547	0.056	0.063	0.618	0.352	0.242	0.721	0.072	0.088	1.005	0.271	0.178
Con collarín	Tapa	1.516	0.297	0.156	0.883	0.477	0.258	4.783	0.258	0.254	3.306	0.988	0.588
	Tapa + pesa 4.5kg	2.109	0.367	0.273	2.281	0.570	0.343	5.120	0.498	0.378	7.652	1.286	0.731
	Tapa + pesa 9kg	1.648	0.273	0.297	1.992	0.570	0.211	4.841	0.363	0.418	7.171	1.032	0.767
Sin collarín	Tapa	1.289	0.117	0.102	1.672		0.102	2.997	0.216	0.273	4.712	0.272	0.229
	Tapa + pesa 4.5kg	2.039	0.227	0.199	1.336	0.336	0.133	6.098	0.377	0.350	4.294	0.376	0.305
	Tapa + pesa 9kg	2.211	0.109	0.197	1.532	0.422	0.195	6.522	0.207	0.365	5.198	0.503	0.386

Fuente: Elaboración propia

Tabla 130. Resistencia de los morteros ensayados en el primer ajuste

		RESISTENCIA A FLEXIÓN (N/mm ²)				RESISTENCIA A COMPRESIÓN (N/mm ²)			
		7 DÍAS		28 DÍAS		7 DÍAS		28 DÍAS	
		RCA	MRA	RCA	MRA	RCA	MRA	RCA	MRA
Sin aditivo	Tapa	0.063	0.107	0.115	0.108	0.098	0.201	0.299	0.276
	Tapa + pesa 4.5kg	0.067	0.138	0.141	0.195	0.162	0.273	0.386	0.509
	Tapa + pesa 9kg	0.083	0.168	0.154	0.187	0.194	0.332	0.386	0.547
Aditivo FRIOPLAST 0.5%	Tapa	0.043	0.141	0.091	0.102	0.081	0.376	0.295	0.215
	Tapa + pesa 4.5kg	0.078	0.206	0.156	0.173	0.171	0.698	0.461	0.460
	Tapa + pesa 9kg	0.084	0.239	0.162	0.209	0.172	0.875	0.569	0.642
Aditivo FRIOPLAST 1%	Tapa	0.099	0.148	0.096	0.186	0.232	0.478	0.357	0.442
	Tapa + pesa 4.5kg	0.190	0.172	0.179	0.236	0.488	0.570	0.560	0.695
	Tapa + pesa 9kg	0.183	0.234	0.206	0.295	0.520	0.741	0.637	1.028
Aditivo SIKAPAVER 0.5%	Tapa	0.086	0.171	0.110	0.144	0.209	0.222	0.304	0.319
	Tapa + pesa 4.5kg	0.149	0.242	0.201	0.116	0.456	0.355	0.633	0.578
	Tapa + pesa 9kg	0.177	0.301	0.199	0.221	0.450	0.586	0.590	0.653
Aditivo SIKAPAVER 1%	Tapa	0.087	0.255	0.123	0.130	0.183	0.440	0.343	0.273
	Tapa + pesa 4.5kg	0.163	0.298	0.188	0.206	0.496	0.573	0.571	0.412
	Tapa + pesa 9kg	0.196	0.341	0.246	0.185	0.544	0.491	0.901	0.498

Fuente: Elaboración propia

Tabla 131. Resistencia de los morteros ensayados con sustituciones parciales de árido natural por árido reciclado de hormigón (RCA)

		RESISTENCIA A FLEXIÓN (N/mm ²)								RESISTENCIA A COMPRESIÓN (N/mm ²)							
		7 DÍAS				28 DÍAS				7 DÍAS				28 DÍAS			
		100%	80%	60%	40%	100%	80%	60%	40%	100%	80%	60%	40%	100%	80%	60%	40%
Sin aditivo	Tapa	0.063	0.164	0.246	0.320	0.115	0.398	0.547	0.664	0.098	0.182	0.505	0.631	0.299	0.446	1.169	0.938
	T+4.5kg	0.067	0.250	0.547	0.672	0.141	0.625	0.805	0.953	0.162	0.624	1.055	1.384	0.386	0.910	1.515	2.046
	T+9kg	0.083	0.195	0.461	0.668	0.154	0.672	0.992	1.211	0.194	0.466	0.978	1.019	0.386	0.835	2.614	2.097
FRIO-PLAST 0.5%	Tapa	0.043	0.211	0.164	0.211	0.091	0.578	0.430	0.563	0.081	0.282	0.376	0.571	0.295	0.618	0.742	1.280
	T+4.5kg	0.078	0.297	0.336	0.945	0.156	0.844	0.688	0.875	0.171	0.644	0.865	2.639	0.461	1.285	1.547	1.982
	T+9kg	0.084	0.375	0.445	0.953	0.162	0.789	0.672	1.359	0.172	0.777	0.976	2.611	0.569	1.259	1.710	3.802
FRIO-PLAST 1%	Tapa	0.099	0.211	0.227	0.297	0.096	0.547	0.508	0.695	0.232	0.506	0.632	0.659	0.357	0.629	1.192	1.776
	T+4.5kg	0.190	0.258	0.484	0.695	0.179	0.680	0.664	1.281	0.488	0.670	1.217	1.760	0.560	1.020	1.425	2.833
	T+9kg	0.183	0.344	0.500	0.789	0.206	0.664	0.734	1.406	0.520	0.738	1.353	1.656	0.637	1.196	1.747	3.839
SIKA-PAVER 0.5%	Tapa	0.086	0.328	0.328	0.216	0.110	0.430	0.578	0.578	0.209	0.460	0.373	0.621	0.304	0.815	0.852	1.200
	T+4.5kg	0.149	0.430	0.688	0.633	0.201	0.539	0.898	0.961	0.456	0.708	1.056	1.616	0.633	1.401	1.735	2.469
	T+9kg	0.177	0.539	0.836	0.570	0.199	0.656	0.977	1.227	0.450	0.805	1.641	1.436	0.590	1.366	2.236	3.165
SIKA-PAVER 1%	Tapa	0.087	0.430	0.156	0.320	0.123	0.430	0.586	0.563	0.183	0.741	0.319	1.292	0.343	1.200	1.096	1.329
	T+4.5kg	0.163	0.391	0.531	0.883	0.188	0.781	0.898	0.875	0.496	0.656	1.375	1.986	0.571	2.468	1.960	2.365
	T+9kg	0.196	0.273	0.555	0.750	0.246	0.508	1.039	1.063	0.544	0.446	1.388	1.598	0.901	3.165	2.082	3.001

Fuente: Elaboración propia

Tabla 132. Resistencia de los morteros ensayados con sustituciones parciales de árido natural por árido reciclado mixto (MRA)

		RESISTENCIA A FLEXIÓN (N/mm ²)								RESISTENCIA A COMPRESIÓN (N/mm ²)							
		7 DÍAS				28 DÍAS				7 DÍAS				28 DÍAS			
		100%	80%	60%	40%	100%	80%	60%	40%	100%	80%	60%	40%	100%	80%	60%	40%
Sin aditivo	Tapa	0.107	0.063	0.281	0.844	0.108	0.307	0.516	0.656	0.201	0.305	0.801	1.238	0.276	0.436	1.117	1.781
	T+4.5kg	0.138	0.188	0.477	0.555	0.195	0.220	0.680	0.984	0.273	0.610	1.559	2.823	0.509	0.759	1.576	2.709
	T+9kg	0.168	0.289	0.695	0.414	0.187	0.427	0.480	1.211	0.332	0.776	2.024	2.627	0.547	1.177	1.010	3.717
FRIO- PLAST 0.5%	Tapa	0.141	0.129	0.461	0.430	0.102	0.349	0.375	0.594	0.376	0.353	1.158	2.726	0.215	0.827	1.241	1.725
	T+4.5kg	0.206	0.242	0.711	0.953	0.173	0.615	0.711	-	0.698	0.889	2.046	1.667	0.460	1.366	1.620	-
	T+9kg	0.239	0.320	0.883	0.695	0.209	0.770	0.852	1.156	0.875	0.898	2.648	1.224	0.642	1.919	2.242	3.389
FRIO- PLAST 1%	Tapa	0.148	0.141	0.500	0.398	0.186	0.309	0.344	0.711	0.478	0.524	1.638	1.189	0.442	0.608	0.956	2.090
	T+4.5kg	0.172	0.352	0.680	0.773	0.236	0.531	0.680	1.258	0.570	1.156	2.085	2.438	0.695	1.563	1.479	4.122
	T+9kg	0.234	0.344	0.742	0.906	0.295	0.763	0.727	1.320	0.741	1.117	2.556	2.304	1.028	1.522	1.507	4.532
SIKA- PAVER 0.5%	Tapa	0.171	0.164	0.258	0.633	0.144	0.250	0.453	0.598	0.222	0.428	1.100	2.323	0.319	0.757	1.186	1.528
	T+4.5kg	0.242	0.219	0.461	0.727	0.116	0.398	0.984	0.922	0.355	0.754	1.745	2.617	0.578	1.282	1.807	2.803
	T+ 9kg	0.301	0.359	0.516	0.992	0.221	0.484	0.930	0.984	0.586	0.981	1.946	2.973	0.653	1.203	1.405	3.104
SIKA- PAVER 1%	Tapa	0.255	0.102	0.227	1.547	0.130	0.156	0.578	0.773	0.440	0.444	1.292	1.505	0.273	0.399	2.016	2.307
	T+4.5kg	0.298	0.180	0.516	0.969	0.206	0.531	1.148	1.148	0.573	0.685	2.318	2.793	0.412	1.457	3.703	3.619
	T+9kg	0.341	0.289	0.914	1.094	0.185	0.422	1.258	1.133	0.491	0.960	2.826	3.247	0.498	1.143	3.983	2.903

Fuente: Elaboración propia

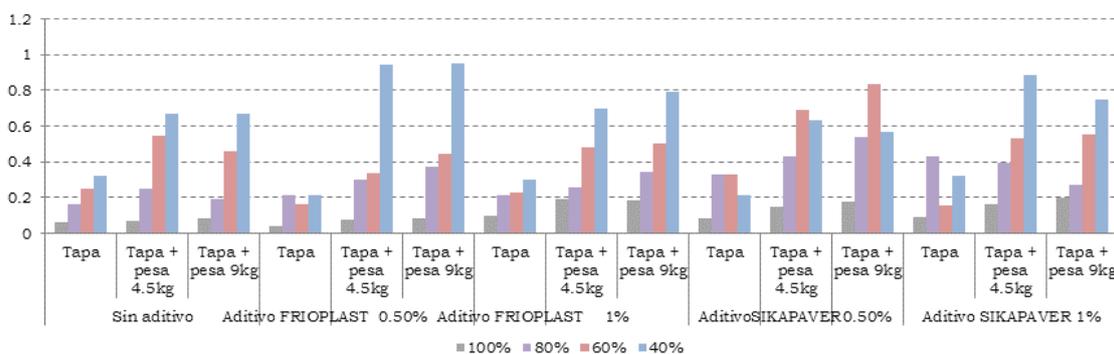
6.2.2.2.3. Sustituciones parciales de árido natural

En base a los deficientes resultados proporcionados por las pruebas anteriores, se procedió a realizar sustituciones parciales del árido natural por el 40%, 60% y 80% del árido reciclado al objeto de determinar la influencia del porcentaje de sustitución de árido natural en el comportamiento mecánico de los morteros, intentando obtener una desarrollo de resistencias más acorde con las ofrecidas por el mortero patrón.

La Tabla 131 y la Tabla 132 recogen los resultados arrojados por los ensayos, cuya representación gráfica se puede observar de la Figura 88 a la Figura 95, donde se puede apreciar lo siguiente:

- A todas las edades se produce un notable aumento de resistencia a medida que disminuye el porcentaje de sustitución de arena natural por las correspondientes arenas recicladas.
- El aumento de resistencia es considerable con porcentajes de sustitución entre el 60% y el 40%.
- Nuevamente el aditivo FRIOPLAST demostró ser el más eficaz que el SIKAPAVER, sobre todo en dosificaciones del 0.5%.

Figura 88. Resistencias a flexión a 7 días de los morteros con sutitución de RCA



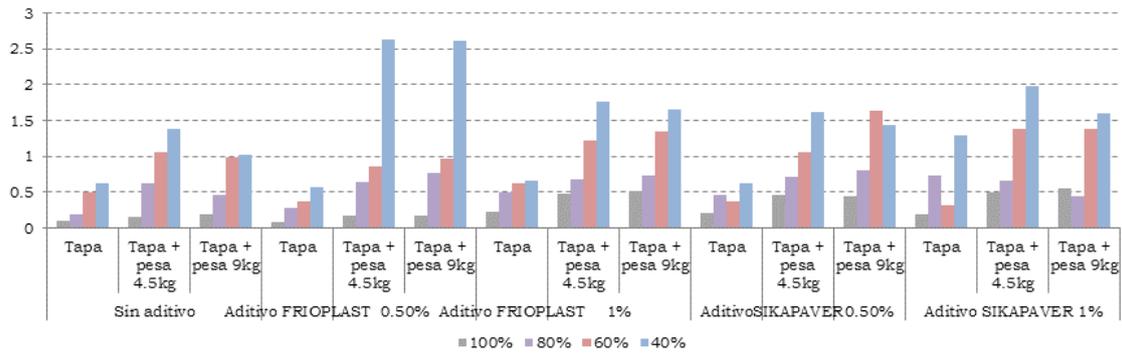
Fuente: Elaboración propia

Figura 89. Resistencias a flexión a 28 días de los morteros con sutitución de RCA



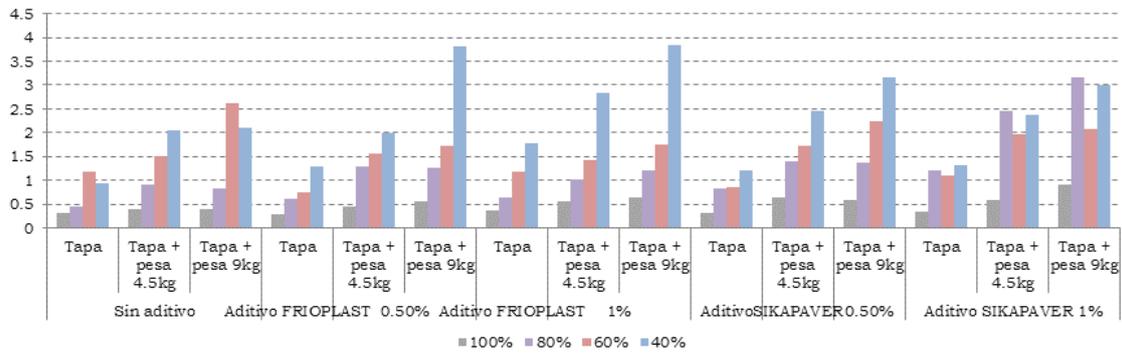
Fuente: Elaboración propia

Figura 90. Resistencias a compresión a 7 días de los morteros con sutitución de RCA



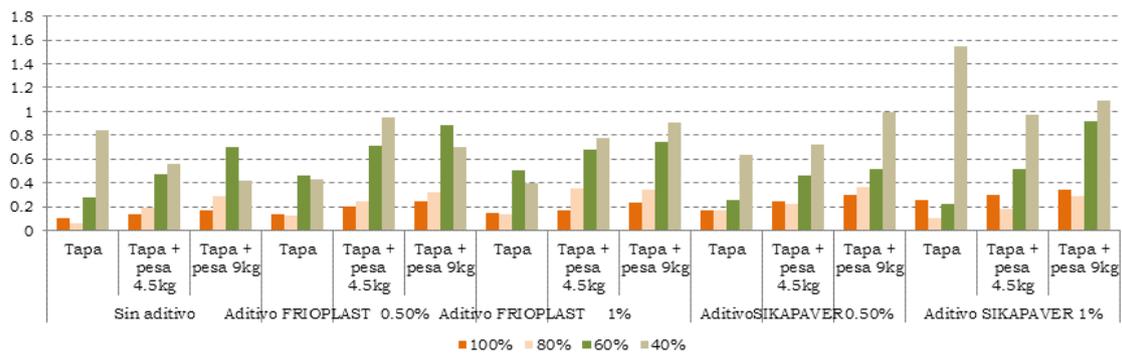
Fuente: Elaboración propia

Figura 91. Resistencias a compresión a 28 días de los morteros con sutitución de RCA



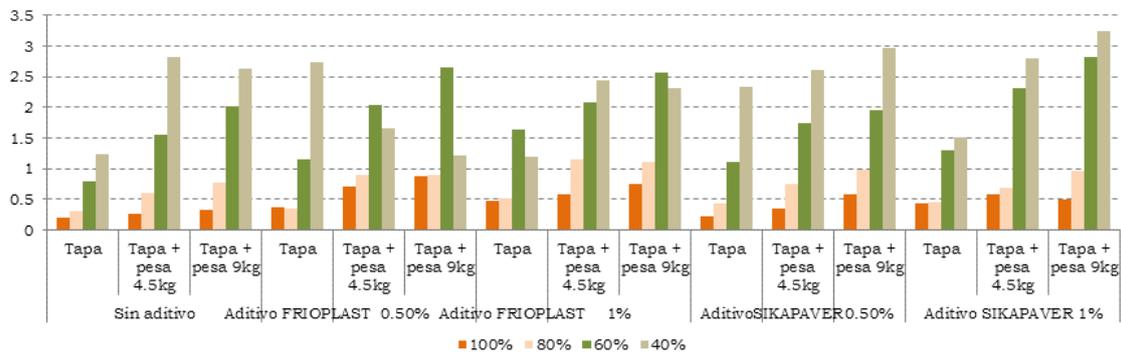
Fuente: Elaboración propia

Figura 92. Resistencias a flexión a 7 días de los morteros con sutitución de MRA



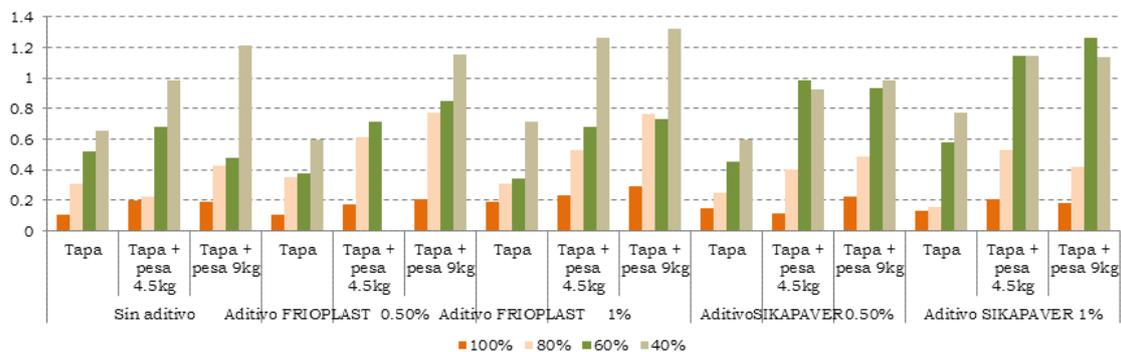
Fuente: Elaboración propia

Figura 93. Resistencias a flexión a 28 días de los morteros con sutitución de MRA



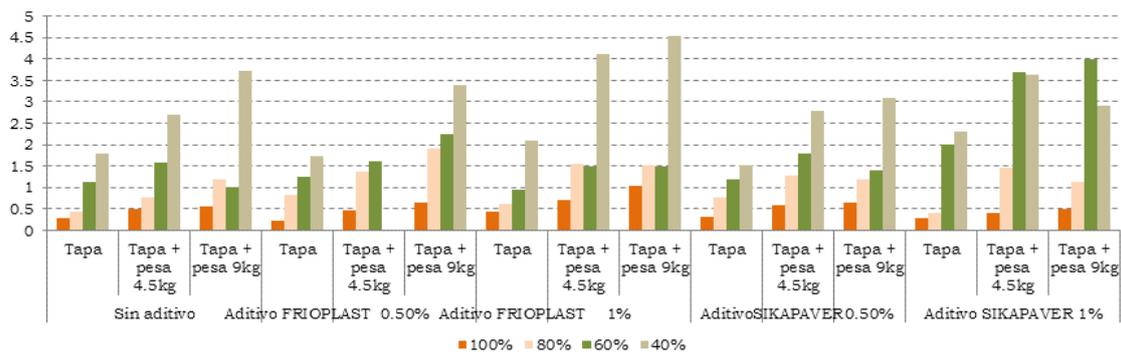
Fuente: Elaboración propia

Figura 94. Resistencias a compresión a 7 días de los morteros con sutitución de MRA



Fuente: Elaboración propia

Figura 95. Resistencias a compresión a 28 días de los morteros con sutitución de MRA



Fuente: Elaboración propia

En conclusión, esta segunda fase de trabajo proporcionó resultados poco fiables desde el punto de vista del establecimiento de un rango cuantitativo de resistencias mecánicas desarrolladas, aunque si resultaron utilizables para estimar el desarrollo de resistencias globales que experimentaron los mortertos, lo

que propiciaría la adopción de la fórmula de trabajo planteada en la tercera fase del estudio experimental que se desarrollará a continuación.

6.2.2.3. Determinación de la compacidad de las probetas de mortero

Paralalamente, en esta segunda fase de estudio se procedió a la comprobación de compacidad de los morteros a través de la determinación de la densidad alcanzada por los morteros con el sistema de vibración-presión adoptado. Para ello se empleó el método de medición de volumen por desplazamiento de mercurio descrito en la norma UNE 103108 (UNE 103108 1996).

Con la pretensión de conseguir en los morteros la compacidad que alcanza el hormigón en las piezas prefabricadas, se procedió a aplicar el método de ensayo tanto a las piezas prefabricadas, como a las probetas de mortero patrón y de las distintas combinaciones practicadas en la dosificación con árido reciclado. Para ello se eligieron bovedillas de hormigón como pieza prefabricada, a las cuales se les determinó la densidad en tres zonas diferentes, obteniéndose una densidad media de 2.484 kg/dm^3 .

Figura 96. Medición de volumen por desplazamiento de mercurio descrito en la norma UNE 103108



Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 133 y la Tabla 134 se puede constatar que los resultados poco uniformes de resistencia mecánica obtenidos en el apartado anterior se reflejan en los conseguidos con la determinación de la densidad de los morteros elaborados.

En primer lugar se observa que, tanto en los morteros elaborados con sustitución parcial como total, existe una falta de uniformidad en los resultados. Por una parte, es sustancial la diferencia existente con los morteros elaborados con árido natural, en los que se alcanza la compacidad más alta, arrojando en las piezas testadas valores superiores a 2.000 kg/dm^3 . Por otra parte, los morteros elaborados con árido reciclado procedente de hormigón (RCA) arrojan resultados de densidad comprendidos entre 1.600 y 2.170 kg/dm^3 , mientras que las

densidades de los elaborados con árido reciclado mixto (MRA), algo más bajas, oscilan entre 1.570 y 2.050 kg/dm³.

Tabla 133. Densidad de los morteros ensayados en la prueba inicial

		DENSIDAD (kg/dm ³)		
		AN	RCA	MRA
Ensayo inicial		2.014	1.572	1.422
Sin collarín	Tapa	2.344	1.733	1.764
	Tapa + pesa 4.5kg	2.284	1.538	1.496
	Tapa + pesa 9kg	2.212	1.895	1.504
Con collarín	Tapa	2.349	1.579	1.565
	Tapa + pesa 4.5kg	2.362	1.665	1.509
	Tapa + pesa 9kg	2.128	1.556	1.585

Fuente: Elaboración propia

Tabla 134. Densidad de los morteros ensayados con sustituciones parciales y total de árido natural por árido reciclado

		RCA				MRA			
		100%	80%	60%	40%	100%	80%	60%	40%
Sin aditivo	Tapa	1.740	1.690	1.940	1.910	1.740	1.720	1.730	1.750
	T+4.5kg	1.760	1.780	1.980	1.970	1.880	1.800	1.910	1.810
	T+9kg	2.000	1.680	1.790	1.970	2.030	1.810	1.840	1.990
FRIO-PLAST 0.5%	Tapa	1.710	1.760	1.740	1.880	1.640	1.570	1.820	1.760
	T+4.5kg	1.760	1.920	1.810	1.970	1.670	1.620	1.860	1.830
	T+9kg	1.990	1.730	1.850	1.930	1.710	1.670	1.950	1.780
FRIO-PLAST 1%	Tapa	1.920	1.800	1.860	1.930	1.750	1.790	1.790	1.820
	T+4.5kg	2.090	1.900	1.790	1.850	1.710	1.760	1.790	1.970
	T+9kg	2.010	1.960	1.790	1.880	1.800	1.810	1.840	1.870
SIKA-PAVER 0.5%	Tapa	1.980	1.880	1.740	1.780	1.770	1.750	1.820	1.950
	T+4.5kg	1.900	1.810	1.770	1.950	1.810	1.750	1.750	1.910
	T+ 9kg	2.170	1.910	1.830	1.910	1.890	1.780	1.870	1.820
SIKA-PAVER 1%	Tapa	1.900	1.890	1.820	1.650	1.810	1.740	1.850	1.820
	T+4.5kg	1.830	1.840	1.760	1.840	1.790	1.680	1.850	2.050
	T+9kg	1.900	1.600	1.900	1.840	1.780	1.810	1.950	1.960

Fuente: Elaboración propia

En resumen, los resultados obtenidos de la compacidad de los morteros elaborados en laboratorio vienen a corroborar que no se ha conseguido simular en laboratorio el proceso de trabajo utilizado en planta de prefabricados, lo que se puede atribuir, además de a la comentada deficiencia en el sistema de compactación empleado, a la menor cantidad de finos que presentan los áridos reciclados.

6.3. Análisis de resultados de los ensayos realizados al árido reciclado en la tercera fase de fabricación de piezas prefabricadas y discusión

Durante la tercera y última fase de trabajo se culmina finalmente el objetivo principal del proyecto de Tesis Doctoral: la utilización de árido reciclado procedente de RCD en la elaboración de piezas prefabricadas de hormigón no estructural.

Como ya se ha comentado, la elección de las piezas a fabricar: bloques y bovedillas de hormigón, viene motivada más por las circunstancias de la empresa de prefabricados que por las necesidades del estudio. Así mismo, la elección de los materiales y dosificaciones se ha visto condicionada por los resultados arrojados en las fases anteriores.

6.3.1. Aptitud de los bloques prefabricados de hormigón reciclado

6.3.1.1. Dosificaciones

En base a los resultados poco concluyentes de resistencia y densidad obtenidos con las sustituciones parciales consideradas en la fase anterior, y debido a la precariedad en la que se encontraba la empresa de prefabricados, se ha procedido a la fabricación de bloques prefabricados de hormigón reciclado.

Las dosificaciones, que responden a la patrón empleada en la fase de trabajo anterior, corresponden a la ejecución de piezas elaboradas con: (i) 50% de árido reciclado de hormigón y 50% natural; (ii) 50% de árido reciclado mixto y 50% natural; (iii) 100% de árido reciclado de hormigón sin aditivo (a petición de la planta); (iv) 100% de árido reciclado de hormigón; (v) 100% de árido reciclado mixto.

Indicar que el aditivo elegido, FRIOPLAST, y la cantidad dosificada, 0.5%, responde al comportamiento que presentó en esta proporción en la fase anterior de elaboración y rotura de morteros en laboratorio.

6.3.1.2. Resultados de los ensayos realizados a los bloques prefabricados de hormigón reciclado

La verificación de la aptitud de los bloques de hormigón prefabricados elaborados con árido reciclado queda supeditada, a falta de normativa técnica que especifique las exigencias mínimas que deben cumplir, a los valores declarados por el fabricante y a lo indicado en el CTE DB SE-F (Real Decreto 314/2006 2006).

La Tabla 135 y la Tabla 136 presentan los resultados de los requisitos que la norma UNE-EN 771-3 indica deben cumplir los bloque de hormigón prefabricado.

Desde el punto de vista del aspecto, los bloques prefabricados elaborados con árido reciclado, a excepción de la variación en el color de los que incluyen árido reciclado de escombros o mixto en su composición, no presentan diferencias en su aspecto, en cuanto a la homogeneidad y uniformidad de color y textura, respecto de los elaborados con áridos naturales.

En cuanto a la asignación de categoría de tolerancia, según los datos arrojados de los parámetros físicos relativos a las dimensiones de su longitud, altura y anchura (ver Tabla 135), se puede considerar que a todos los bloques se le pueden asignar una categoría de tolerancia D1 (desviación entre +3 y -5mm en longitud, anchura y altura), la misma que declara el fabricante, salvo a los de la serie 4, fabricados íntegramente con árido reciclado procedente de hormigón, que se categorizan como D2 (desviación en longitud y anchura de +1 a -3mm y en altura de ± 2 mm), lo que indica que las variaciones dimensionales están dentro de los límites prescritos.

Así mismo, respecto a la configuración de estas piezas prefabricadas, tanto las medidas que definen su volumen externo, como las de los tabiques interiores y las paredes exteriores, así como su paralelismo y planeidad, indican que los bloques fabricados con árido reciclado no presentan diferencias de configuración en comparación con los elaborados con árido natural.

Por el contrario, el resto de parámetros físicos y mecánicos diferencian sustancialmente el comportamiento de los bloques reciclados respecto del de los elaborados con árido natural.

La densidad aparente del hormigón reciclado de las piezas arroja valores que indican reducciones de la densidad del 6.42% (50% hormigón + 50% natural) al 16.51% (100% mixto), por lo que dado el considerable peso de este tipo de piezas, resultan más ligeras y, por tanto, más cómodas en su manejo. La Tabla 137 coteja el peso de los bloques fabricados, observándose que la reducción de peso respecto de los bloques naturales oscila entre el 5.50% en los elaborados con sustitución parcial de árido reciclado de hormigón al 14.71% en los elaborados en su totalidad con árido reciclado mixto.

Tabla 135. Dimensiones, tolerancias y aspecto de los bloques de hormigón según UNE-EN 772-3, UNE-EN 772-16 y UNE-EN 772-20

	Valor declarado por el fabricante	1		2		3		4		5		N	
		M	V	M	V	M	V	M	V	M	V	M	V
Largo L (mm)	400.00	398.00	-2.00	399.00	-1.00	398.60	-1.40	398.00	-2.00	399.00	-1.00	400.00	-
Ancho W (mm)	200.00	199.00	-1.00	199.00	-1.00	199.00	-1.00	198.60	-1.40	199.00	-1.00	199.50	-0.50
Alto H (mm)	200.00	199.60	-0.40	200.00	-	200.00	-	198.20	-1.80	200.00	-	199.00	-1.00
Categoría de tolerancia	D1	D1		D1		D1		D2		D1		D1	
Espesor de tabique (mm)	n.d.	21.16	-0.84	20.93	-1.07	21.28	-0.72	21.28	-0.72	21.44	-0.56	22.00	-
Espesor pared exterior(mm)	n.d.	21.96	-0.04	21.90	-0.10	21.80	-0.20	21.76	-0.24	21.64	-0.36	21.80	-0.20
Paralelismo (mm)	n.d.	199.67	-0.33	199.79	-0.21	199.80	-0.20	197.13	-2.87	199.92	-0.08	200.00	-
Planeidad (mm)	n.d.	445.00	-	445.00	-	445.00	-	445.00	-	445.00	-	445.00	-
M, media de los valores de las piezas ensayadas													
V, variación respecto de la medida declarada por el fabricante													
n.d. valor no declarado por el fabricante													

Fuente: Elaboración propia

Tabla 136. Propiedades físicas, mecánicas y durabilidad de los bloques de hormigón según UNE-EN 771-3

	Valor declarado por el fabricante	1		2		3		4		5		N		
		M	Desv.	M	Desv.	M	Desv.	M	Desv.	M	Desv.	M	Desv.	
Densidad (kg/dm ³)	1.90	2.04	0.041	1.89	0.098	1.91	0.031	1.89	0.021	1.82	0.023	2.18	0.006	
Disminución (%)	-	6.42		13.30		12.39		13.30		16.51		-		
Absorción por capilaridad (gr/m ² .s)	10.400	10.433	1.173	10.254	0.244	12.048	0.863	5.969	0.967	8.413	0.823	6.715	0.021	
Variación (%)	-	+ 55.37		+ 52.70		+ 79.42		-11.11		+25.29		-		
Absorción total (%)	n.d.	7.786	0.319	7.651	0.156	10.047	0.254	10.023	0.254	11.810	0.152	4.637	0.001	
Aumento (%)	-	67.91		64.99		116.67		116.15		154.69		-		
Resistencia a compresión (N/mm ²)	13.400	15.224	2.887	17.281	1.445	13.836	1.682	18.812	2.313	14.007	0.426	24.423	2.858	
Disminución (%)	-	37.67		29.24		43.35		22.97		38.72		-		
Categoría	R10	R15		R10		R10		R15		R10		R20		
Hielo-deshielo	R.compresión (N/mm ²)	n.d.	11.595	0.684	13.861	1.013	12.439	0.476	17.138	2.477	11.717	0.858	24.237	1.239
	Pérdida resistencia (%)	n.d.	23.83		19.79		10.10		8.90		16.35		0.76	
	Pérdida peso (%)	n.d.	10.23		3.41		5.94		6.16		6.29		2.68	
Clase de resistencia al fuego	A1	A1		A1		A1		A1		A1		A1		
Resistencia al envejecimiento niebla salina	Pérdida de peso (gr)	n.d.	453.75	25.10	349.25	20.86	430.75	26.517	283.00	83.43	382.00	49.498	175.00	46.669
	Disminución (%)	-	3.17		2.62		3.02		1.87		2.71		1.10	
	R. compresión (N/mm ²)	n.d.	13.469	0.182	13.965	0.260	12.115	0.191	15.368	1.256	10.027	0.338	21.070	2.841
	Disminución (%)	-	11.51		19.19		12.44		18.31		33.01		13.73	
M, media de los valores de las piezas ensayadas														
Desv., desviación estándar														
n.d. valor no declarado por el fabricante														
El % de variación, aumento o disminución se practica sobre la pieza patrón elaborada con árido natural														

Fuente: Elaboración propia

Tabla 137. Peso que presentan los bloques de hormigón reciclado

Nº	Bloque	Peso (gr)	Desviación estándar	% de disminución respecto del natural
1	50% AR hormigón + 50% AN	14851.1	439.964	5.50
2	50% AR mixto + 50% AN	14296.6	203.252	9.01
3	100% AR hormigón	13775.1	47.338	12.33
4	100% AR hormigón	13873.5	181.543	11.70
5	100% AR mixto	13400.2	171.494	14.71
N	100% natural	15712.0	90.510	

Fuente: Elaboración propia

Estas densidades se encuentran en consonancia con los resultados arrojados por el estudio de Matar y El Dalati (Matar and El Dalati 2011) que las cifran en torno a 2.200 kg/dm³ para sustituciones del árido grueso reciclado bajas y el 2.060 kg/dm³ para una sustitución total de esta fracción.

Indicar que en la disminución de la compacidad que experimentan las piezas prefabricadas recicladas, parece resultar determinante la capacidad aireante del aditivo empleado. Observese la mayor reducción porcentual que experimentan las piezas elaboradas con el 100% de RCA con incorporación de aditivo, respecto de las elaboradas sin aditivo alguno.

Por su parte, la absorción por capilaridad es sustancialmente mayor en las piezas elaboradas con la mezcla de áridos naturales y reciclados (más de un 50%) que en las elaboradas con el 100% de áridos reciclados, de las que incluso, la elaborada con árido reciclado de hormigón presenta una capilaridad inferior a la del bloque fabricado con árido natural. Este parámetro favorece la utilización de bloques elaborados con el 100% de árido reciclado en la ejecución de fábricas de bloques donde la absorción del agua del mortero de unión se necesite limitar. Por el contrario, la absorción por inmersión se duplica ampliamente en las piezas elaboradas con sustitución total respecto de las piezas patrón. La menor presencia de finos en estos materiales granulares justifica estos fenómenos relacionados con la humedad, en tanto que al proporcionar menor relleno en el hormigón, por una parte, se ve dificultada la ascensión del agua por capilaridad y, por otra, mayor es la capacidad de retenerla por inmersión total.

En este punto encontramos que, para interpretar estos parámetros físicos, no existen limitaciones en la norma, no obstante, las derogadas normas UNE 41166-1 y UNE 41166-2 (UNE-EN 41166-1 2000, UNE-EN 41166-2 2000) así como la Norma Tecnológica de Edificación NTE-EFB (NTE-EFB 1974), indicaban los requisitos a cumplir por parte de los bloques de hormigón. Dichos requisitos se resumen en la Tabla 138 en función de que las piezas sean utilizadas en la ejecución de fábricas vistas o sirvan para revestir.

Según las antiguas normas UNE, ni los bloques reciclados ni los patrón (0.20 gr/cm².5min) ofrecerían resultados aceptables de absorción por capilaridad. Sin embargo, según el índice de absorción por inmersión, los bloques elaborados con el 50% de sustitución y el patrón se podrían utilizar a cara vista, mientras que los

totalmente reciclados sólo se podrían emplear para revestir. En este sentido, la norma tecnológica sólo aceptaría para su uso los bloques prefabricados con sustitución parcial del árido.

Tabla 138. Requisitos de los bloques de hormigón según UNE 41166 y NTE-EFB

Requisito		UNE		NTE
		Bloque a cara vista	Boque a revestir	
Aspecto	Color	Homogéneo		
	Textura	Uniforme		
Geométricos (mm)	Tolerancias dimensiones	± 2	± 3	
	Espesor paredes y tabiquillos	No inferior a 20mm en ningún punto		
Absorción por capilaridad (g/cm ² en 5 min)		0.05-0.1		
Absorción por inmersión (%)	Grado I	≤9	≤11	<10%
	Grado II	Sin limitación		
Resistencia a compresión (N/mm ²)		>4-6 (*)		> 6
(*) La resistencia respecto de la sección neta será superior a 12.5 (N/mm ²) Grado I, función resistente				

Fuente: Elaboración propia

Los resultados de la capacidad resistente que presentan los bloques prefabricados elaborados con material granular reciclado resultan, cuanto menos, curiosos (ver Tabla 136). En base a los resultados físicos anteriores era de esperar la disminución de la resistencia mecánica a compresión, que oscila entre el 22.97% y el 43.35% en el bloque fabricado con el 100% de RCA, con aditivo y sin aditivo, respectivamente. Lo que viene a indicar que el aditivo consigue mejorar sustancialmente el poder aglutinante del cemento. Por otra parte, se observa que si bien la resistencia mecánica de los bloques con sustitución total árido reciclado de hormigón es mayor que la de los sustituidos al 50%, en el caso de los elaborados con el árido reciclado mixto, resulta mayor en los sustituidos parcialmente que en los de sustitución total.

La única limitación vigente que se encuentra, desde el punto de vista resistente, para los bloques prefabricados de hormigón, es la exigencia que establece el DB SE-F que, además de considerarlos clasificados como piezas macizas, a pesar de su gran volumen de huecos, prescribe un valor mínimo de 5N/mm². Este valor está en consonancia con lo indicado por las antiguas normas UNE y la NTE (ver Tabla 138) y, que sobradamente está cubierto por todas las piezas estudiadas.

Los pocos estudios consultados confirman los excelentes resultados en resistencia mecánica que presentan los bloques reciclados fabricados. Los experimentos llevados a cabo por Matar y El Dalati (Matar and El Dalati 2011), que sólo emplearon diferentes porcentajes de sustitución del árido grueso reciclado, encontraron resistencias a compresión en los bloques elaborados de entre 4.13 y 9.21 N/mm². Entre 10.5 y 12.5 N/mm² son las resistencias mecánicas que, según

la asociación española de prefabricados ANDECE, se han conseguido en una fábrica mallorquina con bloques prefabricados en los que el árido natural se ha sustituido totalmente por árido reciclado mixto. Los peores resultados, que oscilan entre 2.3 y 7.0 N/mm², se localizan en el estudio de Domínguez y sus colegas (Domínguez et al 2004).

Aunque no está contemplado en la normativa, se ha considerado necesario determinar la aptitud de los bloques prefabricados reciclados en determinados ambientes agresivos. En este sentido se han estudiado las pérdidas de peso y de resistencia mecánica que experimentan cuando se someten a simulaciones de ambientes en zonas de alta humedad con heladas y sales marinas.

Los productos reciclados estudiados sometidos a 25 ciclos de hielo-deshielo, consistentes en su congelación a -18°C, durante 3h, para posteriormente descongelarlos en inmersión total en agua, a aproximadamente 20°C, han visto reducida su resistencia mecánica en

Por su parte, al someter los bloques prefabricados a 60 ciclos de humectación-secado en cámara salina a 35°C, en la que durante 4h se les pulveriza agua con un 10% de cloruro sódico y durante 8h se les seca, se han producido una pérdida de peso relativamente baja, que discurre del 1.10% en el bloque patrón al 3.17% en el bloque parcialmente sustituido por árido reciclado de hormigón. Sometidas las piezas a una carga de compresión hasta la rotura tras este ensayo, se observa que la pérdida de resistencia mecánica no discurre en paralelo a la pérdida de peso. En este caso se ha podido constatar que las piezas que más peso pierden (50% hormigón+50%natural) son las que menos descenso de resistencia experimentan (11.51%), así mismo, las piezas elaboradas total o parcialmente con árido reciclado mixto son las que sufren pérdidas de resistencia mayores, cifradas en torno al 20% y 30%.

Para concluir con las prescripciones de los bloques prefabricados de hormigón indica que, según la resistencia al fuego de las piezas estudiadas se pueden considerar como clase A1, ya que está establecido por la norma que los productos prefabricados de hormigón con base de cemento, fabricados sin materias orgánicas, se pueden declarar sin necesidad de ensayo como clase A1 de resistencia al fuego.

Finalmente, los bloques de hormigón reciclado se designarían según la norma UNE-EN 771-3 con el número y fecha de publicación de la norma europea, el tipo de pieza, las dimensiones de fabricación y sus tolerancias, y la resistencia a compresión. En la

Tabla 139 se presentan las designaciones de las piezas estudiadas según las indicaciones de la norma, en las que el valor de la resistencia a compresión se ha llevado al número múltiplo de 5 inferior a la media obtenida en los resultados de los ensayos.

En conclusión, resulta necesario indicar que, según los aceptables resultados arrojados por los estudios practicados a los bloques prefabricados de hormigón elaborados con áridos reciclados, de los cuales los elaborados con árido reciclado

procedente de residuos de construcción y demolición de hormigón presentan un mejor comportamiento físico, mecánico y una durabilidad mayor que los correspondientes elaborados con el árido reciclado mixto, ante una posible revisión de la norma UNE-EN 771-3, se debería contemplar el uso de este tipo de áridos en la elaboración de estas piezas, debiéndose incluir en la designación la indicación de si están elaborados con dichos materiales granulares.

Tabla 139. Designación de los bloques de hormigón reciclado

Nº	Bloque	Designación
1	50% RCA + 50% AN	EN 771-3:2011 BLOQUE HORMIGÓN 400x200x200 D4 R15
2	50% MRA + 50% AN	EN 771-3:2011 BLOQUE HORMIGÓN 400x200x200 D4 R15
3	100% RCA	EN 771-3:2011 BLOQUE HORMIGÓN 400x200x200 D4 R10
4	100% RCA	EN 771-3:2011 BLOQUE HORMIGÓN 400x200x200 D2 R15
5	100% MRA	EN 771-3:2011 BLOQUE HORMIGÓN 400x200x200 D4 R15
N	100% natural	EN 771-3:2011 BLOQUE HORMIGÓN 400x200x200 D4 R20
La resistencia mecánica en el valor inmediatamente inferior al obtenido en el correspondiente ensayo en una cantidad múltiplo de 5		

Fuente: Elaboración propia

6.3.2. Aptitud de las bovedillas prefabricadas de hormigón reciclado

6.3.2.1. Dosificaciones

Las dosificaciones empleadas en la elaboración de bovedillas de hormigón prefabricado con áridos reciclados se han realizado siguiendo la dosificación patrón empleada en la fase de trabajo anterior. Las diferentes combinaciones de áridos han dado lugar a la ejecución de piezas elaboradas con las siguientes proporciones de materiales granulares: (i) 55% de árido reciclado de hormigón y 45% de árido reciclado mixto (a petición de la planta); (ii) 50% de árido reciclado de hormigón y 50% natural; (iii) 50% de árido reciclado mixto y 50% natural; (iv) 100% de árido reciclado de hormigón; (v) 100% de árido reciclado mixto.

Posteriormente se realizó un ajuste en la dosificación al objeto de mejorar el comportamiento mecánico de estas piezas, aumentando la cantidad de cemento de la dosificación patrón hasta el 10.5%, que es la utilizada por la empresa de prefabricados. Con este último ajuste se elaboraron piezas con: (vi) 100% de árido reciclado de hormigón; y (vii) 100% de árido reciclado mixto.

6.3.2.2. Resultados de los ensayos realizados a las bovedillas prefabricadas de hormigón reciclado

La verificación de la aptitud de las bovedillas de hormigón prefabricadas elaboradas con árido reciclado responde exclusivamente a los valores declarados por el fabricante. En la Tabla 140 y Tabla 141 se presentan dichos valores, así como los resultados de los ensayos físicos y mecánicos practicados sobre las bovedillas fabricadas.

Desde el punto de vista de las propiedades geométricas (ver Tabla 140) todas las bovedillas fabricadas se pueden clasificar como:

- Clase T1, según las tolerancias de fabricación, y
- Clase N2, por las dimensiones mínimas de la anchura efectiva del rebaje.

El comportamiento físico de las bovedillas de hormigón prefabricadas se define por las prescripciones contempladas en la Tabla 141, donde se puede observar que la densidad de hormigón prefabricado reciclado es considerablemente inferior a la del elaborado con árido natural, esta disminución de la densidad se cifra entre el 11.26% y el 19.79% en las bovedillas elaboradas, respectivamente, con el reemplazo parcial y total por árido reciclado de hormigón.

La variación volumétrica que experimentan las bovedillas cuando retraen por secado (CMRS) y dilatan por humectación (CMDH) se expresan mediante el correspondiente coeficiente de movimiento total de la muestra (CMTM), que indica el rango de variación lineal en mm/m. En este sentido, se observa que las piezas que contienen parcialmente árido natural presentan un coeficiente mucho menor que las que solamente se elaboraron con los áridos reciclados. Así mismo, esta variación es significativamente mayor en las que se emplea el árido reciclado mixto.

La resistencia mecánica de las bovedillas debe ser declarada por el fabricante como clase R1 o R2 según sean verificadas, respectivamente, la resistencia a cargas concentradas en todas las bovedillas y la resistencia longitudinal característica a compresión en las resistentes y semirresistentes, o bien la resistencia a flexión en todas las bovedillas y la resistencia longitudinal característica a compresión en las resistentes y semirresistentes. Para el tipo de bovedilla estudiada, teniendo en cuenta que ha sido declarada por el fabricante como no resistente (NR), se ha procedido a la realización de los dos ensayos prescritos de resistencia: a cargas concentradas y a flexión, aunque este último no está declarado por el fabricante.

Tabla 140. Dimensiones y tolerancias de las bovedillas de hormigón según UNE-EN 15037-2

	Valor declarado	1		2		3		4		5		6		7		N	
		M	V	M	V	M	V	M	V	M	V	M	V	M	V	M	V
Largo L (mm)	205.00	202.8	-2.17	203.2	-1.83	204.8	-0.17	204.3	-0.67	203.4	-1.58	203.5	-1.50	203.6	-1.40	205.0	-
Ancho W (mm)	625.00	622.9	-0.08	622.1	-0.92	620.7	-2.33	621.7	-1.33	621.3	-1.67	622.8	-0.20	622.8	-0.25	623.0	-
Alto H (mm)	250.00	250.0	-	249.2	-0.83	246.6	-3.42	248.8	-1.17	249.7	-0.33	249.8	-0.23	249.3	-0.68	250.0	-
Categ. tolerancia	T1	T1		T1													
Anchura rebaje	45.00	45.00	-	45.00	-	45.00	-	44.58	-0.42	45.00	-	45.00	-	45.00	-	45.00	-
Clase	N2	N2		N2													
Prof. rebaje (mm)	n.d.	58.00	-	58.00	-	58.00	-	58.00	-	58.00	-	58.00	-	58.00	-	58.00	-
Esp. alma (mm)	25.00	24.50	-	23.50	-1.00	24.00	-0.50	23.96	-0.54	24.00	-0.50	24.38	-0.12	24.50	-	24.50	-
Esp. lámina(mm)	n.d.	23.00	-0.50	23.28	-0.22	23.08	-0.42	23.50	-	23.48	-0.02	23.50	-	23.50	-	23.50	-
M, media de los valores de las piezas ensayadas V, variación respecto de la medida declarada por el fabricante n.d. valor no declarado por el fabricante																	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 141. Propiedades físicas y mecánicas de las bovedillas de hormigón según UNE-EN 15037-2

	Valor declarado	1		2		3		4		5		6		7		N		
		M	Des.	M	Des.	M	Des.	M	Des.	M	Des.	M	Des.	M	Des.	M	Des.	
Densidad (kg/dm ³)	1.95	1.83	0.04	1.99	0.08	1.91	0.04	1.80	0.13	1.84	0.34					2.24	0.01	
Disminución (%)	-	18.36		11.26		14.75		19.79		17.61						-		
Retracción por secado	CMDH (mm/m)	n.d.	1.73	0.85	2.40	0.24						2.27	0.56	2.09	0.02	0.82	0.02	
	CMRS (mm/m)	n.d.	0.71	0.03	5.92	1.98	10.87	1.40	1.04	0.11						0.62	0.03	
	CMTM (mm/m)	n.d.	2.44		8.32											1.44		
	Aumento (%)	-	68.75		577.43												-	
Resistencia mecánica	C. concentrada (kN)	3.65	1.99	0.06	2.84	0.02	2.14	0.69	2.66	0.35	1.99	0.13	3.16	0.13	2.27	0.41	4.15	0.35
	Disminución (%)	-	52.05		31.57		51.57		35.90		52.05		23.86		45.30		-	
	Clase	R1	R1		R1		R1		R1		R1		R1		R1		R1	
	Flexión (kN)	n.d.	1.80	0.16	2.02	0.21	1.72	0.15	1.13	0.17	1.07	0.16	2.44	0.54	2.21	0.16	3.19	0.11
	Disminución (%)		43.57		36.68		46.08		64.58		66.46		23.51		30.72		-	
	Clase	n.d.	-		R2		-		-		-		R2		R2		R2	
Clase de resistencia al fuego	A1	A1		A1		A1		A1		A1		A1		A1		A1		
M, media de los valores de las piezas ensayadas Desv., desviación estándar n.d. valor no declarado por el fabricante CMDH, coeficiente medio de dilatación por humectación CMRS, coeficiente medio de retracción por secado CMTM, coeficiente de movimiento total de la muestra El % de disminución se practica sobre la pieza patrón elaborada con árido natural																		

Fuente: Elaboración propia

Según la resistencia mecánica que presentan las bovedillas a cargas concentradas, realizada mediante la aplicación gradual de una carga a compresión a través de una pieza de madera de 50x50mm centrada sobre la bovedilla y colocada transversalmente en la posición más crítica, mientras la bovedilla se encuentra sobre apoyos que representan a las viguetas, se podrían clasificar estas piezas prefabricadas como clase R1.

La resistencia mínima a cargas concentradas es el único parámetro que define a las bovedillas según la norma UNE-EN 15031-2, y concretamente lo hace diferenciando entre las que se consideran como no resistentes ($NR > 1.5$ kN), de las semirresistentes ($SS > 2$ kN) o de las resistentes ($RR > 2.5$ kN). Por lo que, todas las bovedillas fabricadas con árido reciclado cumplen sobradamente con este parámetro. Diferenciando por tipos de áridos empleados en su fabricación, se puede comprobar que el peor comportamiento lo ofrecen, sin distinción, las bovedillas elaboradas con el 100% de árido reciclado mixto y las elaboradas con la mezcla de hormigón y mixto que, soportando 1.99 kN, ofrecen un 52.05% menos de resistencia que las bovedillas patrón.

Estos resultados se encuentran en consonancia con los aportados por López Gayarre et al. (López Gayarre, López-Colina et al 2011), cuyas piezas elaboradas con sustituciones parciales y totales de árido reciclado de hormigón resultaron más resistentes que las elaboradas con árido reciclado mixto. Los resultados arrojados resultaron muy similares a los obtenidos en nuestro estudio, sin embargo, ellos colocaron la carga concentrada sobre tabiquillo, que resulta mucho más favorable que sobre el vano central, como ha sido en nuestro caso. A modo de información, aunque estos resultados no se han reflejado en el presente documento, la resistencia a cargas concentradas sobre tabiquillos en las probetas estudiadas también se estimó y resultó entre 7.5 y 18.0kN, es decir la resistencia a cargas concentradas sobre tabiquillos resulta de 4 a 6 veces superior a la obtenida sobre vano central.

Por su parte, en cuanto a la resistencia mecánica a flexión, la norma UNE-EN 15037-2 establece que todas las bovedillas resistan como mínimo una carga linealmente distribuida mínima $P = 12 L$ en kN (siendo L la longitud de la bovedilla) actuando en el centro de la bovedilla, no debiendo ser nunca esta carga inferior a 2.0 kN. La carga mínima para las bovedillas estudiadas de 205.00mm de longitud, resultaría de 2.46 kN. Por lo que a resultados de la resistencia a flexión sólo se podrían categorizar como clase R2 las bovedillas patrón. No obstante, las bovedillas elaboradas con el 10.5% de cemento y las elaboradas con sustitución parcial de árido reciclado de hormigón cumplirían al menos los 2.0kN mínimos, por lo que éstas también se podrían clasificar como R2.

En el estudio de López Gayarre (López Gayarre, López-Colina et al 2011) también se obtuvo la resistencia a flexión de las bovedillas de hormigón reciclado, arrojando resultados del orden de dos veces superiores a los obtenidos en nuestro estudio. No obstante, no se pueden comparar ya que al igual que en caso anterior, los valores que

obtuvieron resultados del ensayo realizado con la carga sobre tabiquillo, mientras nosotros cargamos sobre vano central, lo que resulta mucho más desfavorable.

Finalmente, al igual que los bloques de hormigón, las bovedillas se pueden declarar, sin necesidad de ensayo, como clase A.1 de resistencia al fuego.

7. PUBLICACIONES EN LAS QUE SE INCLUYEN PARTE DE LOS RESULTADOS DE LA TESIS DOCTORAL

A continuación se incorporan al presente documento de Tesis Doctoral tres artículos publicados en las correspondientes revistas de impacto, que avalan la fase de caracterización de los áridos reciclados desarrollada.

7.1. Primera publicación

El primer artículo titulado: “Characterization of recycled aggregates construction and demolition waste for concrete production following the Spanish Structural Concrete Code EHE-08”, fue publicada en 2011 en el volumen 25 (2) de la revista CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS (Martín-Morales *et al.* 2011).

Actualmente, en el *Journal Citation Report*, la revista tiene un índice de impacto de 1.834, encontrándose, en primer cuartil de la categoría CONSTRUCTION & BUILDING TECHNOLOGY, siendo la 8 de 56, y en segundo cuartil de la categoría MATERIAL SCIENCE, MULTIDISCIPLINARY siendo la 71 de 232.

Según SCOPUS la calidad del artículo está respaldada por 13 citas en los siguientes artículos:

Thomas, C., Cimentada, A., Polanco, J.A., Setién, J., Méndez, D., Rico, J. (2013). Influence of recycled aggregates containing sulphur on properties of recycled aggregate mortar and concrete. *Composites Part B: Engineering* 45 (1), pp. 474-485.

Thomas, C., Setién, J., Polanco, J.A., Alaejos, P., Sánchez De Juan, M. (2013). Durability of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials* 40, pp. 1054-1065.

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

Ogawa, H., Nawa, T. (2012). Improving the quality of recycled fine aggregate by elective removal of brittle defects. *Journal of Advanced Concrete Technology* 10 (12), pp. 395-410.

Pacheco-Torgal, F., Ding, Y., Miraldo, S., Abdollahnejad, Z., Labrincha, J.A. (2012). Are geopolymers more suitable than Portland cement to produce high volume recycled aggregates HPC?. *Construction and Building Materials* 36, pp. 1048-1052.

Badr, A., McGivern, L. (2012). Repair of deteriorated concrete containing recycled aggregates. *Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting III - Proceedings of the 3rd International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting, ICCRRR 2012*, pp. 910-915.

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

Barbudo, A., Galvín, A.P., Agrela, F., Ayuso, J., 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.

Barbudo, A., Agrela, F., Ayuso, J., Jiménez, J.R., 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.

Che, C.-C., Li, D., Chen, F.-D. (2012). Study on the cracking sensitivity of recycled fine aggregate concrete based on orthogonal experiment. *Advanced Materials Research* 450-451, pp. 641-645.

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

Hiete, M., Stengel, J., Ludwig, J., Schultmann, F. (2011). Matching construction and demolition waste supply to recycling demand: A regional management chain model. *Building Research and Information* 39 (4), pp. 333-351.

Chan, C.-M., Mizutani, T.-A., Kikuchi, Y., Kawabata, Y. (2011). On the strength characteristics of dredged clay solidified with recycled cement. *European Journal of Scientific Research* 51 (4), pp. 457-466.

A continuación se incluye una copia del artículo:

Construction and Building Materials 25 (2011) 742–748



Contents lists available at ScienceDirect

Construction and Building Materials

journal homepage: www.elsevier.com/locate/conbuildmat



Characterization of recycled aggregates construction and demolition waste for concrete production following the Spanish Structural Concrete Code EHE-08

M. Martín-Morales^{a,*}, M. Zamorano^b, A. Ruiz-Moyano^a, I. Valverde-Espinosa^a

^a Department of Building Construction, Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica, University of Granada, Campus de Fuentenueva s/n 18071, Granada, Spain
^b Department of Civil Engineering, ETS Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, University of Granada, Campus de Fuentenueva s/n 18071, Granada, Spain

ARTICLE INFO

Article history:

Received 9 March 2010
Received in revised form 5 July 2010
Accepted 18 July 2010
Available online 13 August 2010

Keywords:

Construction waste
Demolition waste
Recycled aggregate
Structural concrete
Spanish Code EHE-08

ABSTRACT

Construction and demolition waste can be used as recycled aggregate in construction. The more thoroughly the waste is treated, the higher the quality of the aggregate. However, high-quality aggregate is expensive, and thus, economically unviable in countries where natural aggregate is cheaply obtained. This paper examines the characteristics of recycled aggregate, resulting from a non-exhaustive production process. This aggregate was found to contain impurities, such as crushed clay brick, crushed ceramic materials, and gypsum. The tests used to analyze this material were those recommended in the Spanish Structural Concrete Code (EHE-08). The results obtained were then compared with the guidelines in this code, which regulate the use of this material as a component in structural concrete. The result showed that none of the fractions fulfilled all the requirements in this especially in the case of the fulfillment of guidelines established to certain properties of the recycled aggregate, basically water absorption sulfate content, and chloride content. In contrast, particle shape, density, assessment of fines and resistance to fragmentation were in compliance with the EHE-08 recommendations.

© 2010 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

Concrete is the world's most widely used construction material, but at the same time, it is not an environmentally friendly material because it destroys and uses up large quantities of natural resources and it is also a source of environmental impact because after its use, it is generally deposited in landfills [1]. In recent years, the recyclable potential of construction and demolition (C&D) waste has made it a target of interest and the main focus of waste management policies encouraging minimization, reuse, recycling, and valorization of the waste as opposed to its final disposal in landfills [2,3].

Recycled concrete aggregate differs from natural aggregate in that it is mainly composed of two materials, namely, the original aggregate and adhered mortar [4,5]. However, it often contains impurities, such as crushed clay brick, crushed ceramic materials, and gypsum contributing to the existence of contaminants, for example chlorides, sulfates, siliceous gel, oil, or other harmful materials. Adhered mortar, impurities, and contaminants have a negative influence on the physical, mechanical and chemical properties of the recycled concrete [1,4–7].

Many European countries and regional governments within these countries have established regulations and procedures in an effort to encourage the reuse of these materials in construction

applications [8–10]. In Spain, there is no national law regulating the environmental assessment of recycled materials. As a result, the environmental agencies of the various regional governments are mainly responsible for regulating the use of secondary materials in road building and other construction applications [3]. However, there are various technical specifications for materials used in construction. For example, the Spanish Structural Concrete Code EHE-08 sets out the specifications for concrete structures. More specifically, Article 28 gives the requirements for aggregates, and Annex 15 lists the specifications for recycled aggregates [11].

In the province of Granada (Andalusia, Spain), C&D Waste Management Planning has been implemented, and the resulting program manages these types of waste in some stationary recycling plants. Recycled aggregates, which can be used in construction and other recyclable products (e.g. plastic, wood, and metal) were thus recovered, and the rest of the materials were deposited in landfills. This plan was implemented with a view to achieving the objectives in Royal Decree 105/2008 [12], which regulates the production and management of C&D waste.

The characteristics of the recycled aggregate depend on the production process in the C&D waste plant [4,5,13] just like the properties of the demolished concrete [14]. In consequence, there are important differences between the characteristics of the recycled aggregates produced at different plants. In fact, even materials from the same plant can show composition changes, depending on the characteristics of demolition source [13].

* Corresponding author. Tel.: +34 958240051; fax: +34 958248989.
E-mail address: mariam@ugr.es (M. Martín-Morales).

In this context, the material produced in C&D waste treatment centers in Granada must comply with technical and environmental specifications in order to be of sufficiently high quality for potential applications. This paper characterizes the recycled aggregate from one of the previously mentioned C&D stationary recycling plants, operating in Granada (Spain). The Spanish Structural Concrete Code (EHE-08) recommends a battery of tests for such material, which include particle size distribution, sand equivalent test, fines content, flakiness index, particle density, water absorption, the Los Angeles degradation test, and the chemical analysis of chlorides, water-soluble sulfates, total sulfur compounds, and organic matter.

2. Materials and methods

2.1. The C&D waste treatment process

For this study, samples were taken from a stationary recycling plant, located south of the province of Granada. The C&D waste treatment process at these installations consists of a simple impact crushing, and separation with vibrating screens. Metallic elements are removed by a magnetic conveyor belt and impurities, such as plastics, paper, glass, and gypsum are extracted by hand before the crushing process. Three different fractions of recycled aggregates are produced by the plant: 10/50 mm, 6/10 mm, and 0/6 mm. Non-recyclable fractions are deposited in a landfill.

2.2. Sampling program

The samples studied were collected from the C&D waste treatment plant according to the UNE-EN 932-1 [15] and UNE-EN 932-2 [16]. Four different fractions were studied: the sample 001 was the unselected fraction resulting of simple impact crushing before the vibrating screen process; the samples 002, 003 and 004 were the 10/50, 6/10 and 0/6 mm recycled aggregates produced in the plant respectively.

2.3. Laboratory procedures

The battery of tests was in accordance with the recommendations in Article 28 of the EHE-08. Three samples of each fraction have been selected to make each test and finally average values were determined. Table 1 shows the properties of the aggregate studied, the testing method used, the Spanish standard applied, the limits established, and the aggregate fractions tested.

Table 1
Properties of recycled aggregates studied, samples tested, test methods Spanish standard applied, limits established considering the Spanish Structural Concrete Code EHE-08 [11].

Properties and test method	Spanish standard applied	Limit value	Fraction
Geometrical	Particle size distribution. Sieving method	UNE-EN 933-1:1998 [18]	See Fig. 1
			001
			002
Assessment of fines	Percentage of fines	UNE-EN 933-1:1998 [18]	1.5%
			001
			002
			003
Sand equivalent	UNE-EN 933-8:2000 [19]	General conditions I, IIa, IIb >70 Rest of cases >75	004 ^a
			001
			002
Physical-mechanical	Particle density	UNE-EN 1097-6:2001 [20]	No limit
			001
Water absorption	UNE-EN 1097-6:2001 [20]	<5%	001
			002
			003
			004
Resistance to fragmentation. Los Angeles abrasion	UNE-EN 1097-2:1999 [21]	<40	002 ^b
			001 ^c
Chemical	Chlorides content	UNE-EN 1744-1:1999 [22]	Mass and reinforced concrete <0.05%
			Pre-stressed concrete <0.03%
			001 ^c
			002 ^b
Water-soluble sulfates	UNE-EN 1744-1:1999 [22]	<0.8%	001 ^c
			002 ^b
			003
Total sulfates	UNE-EN 1744-1:1999 [22]	<1%	001 ^c
			002 ^b
Organic matter content	UNE-EN 1744-1:1999 [22]	Coarse aggregates <1% Fine aggregates <0.5%	001 ^c
			002 ^b

^a The test is only applicable to sizes between 0 and 4 mm.

^b The test is only applicable to sizes between 14 and 10 mm.

^c The test is only applicable to sizes between 16 and 0 mm.

2.3.1. Maximum and minimum size of aggregates

The maximum (D) and minimum (d) size of aggregates is defined in EHE-08 [11] and the general requirements, depending on the aggregate type and sieve opening according to UNE-EN 933-2 [17], have been summarized in Table 2.

2.3.2. Aggregates denomination

The EHE-08 [11] provides general criteria for the designation of aggregates in accordance with the following scheme:

GR – d/D – IL – N

where

- GR refers to the aggregate group, namely, coarse aggregates (AG), fine aggregates (AF), and fines (FN);
- d is the minimum aggregate size (mm);
- D is the maximum aggregate size (mm);
- IL is the presentation of the aggregates, i.e. rounded (R), crushed (T), and mixture (M);
- N is the aggregate nature, i.e. limestone (C), siliceous (S), dolomite (D), artificial (A), and recycling (R).

These requirements were used to characterize the aggregate samples in our study.

2.3.3. Geometrical requirements

2.3.3.1. Particle size distribution. The EHE-08 [11] specifies the optimal particle size distribution of coarse aggregate, sand, and fines that can be used to make concrete. The aggregate should be large enough for the ratio D/d to be greater than 1.4. The purpose is to obtain a uniform grading in all sizes, which is conducive to greater

Table 2
General requirements to maximum (D) and minimum size (d) of aggregates [11].

		Percentage that pass across the sieve (in mass)				
		2D	1.4D	D	d	d/2
Coarse aggregate	$D > 11.2 \delta$ $D/d > 2$	100	98–100	90–99	0–15	0–5
	$D \leq 11.2 \delta$ $D/d \leq 2$	100	98–100	85–99	0–20	0–5
Fine aggregate	$D \leq 4$ y $d = 0$	100	95–100	85–99	–	–

compactness, and thus, greater strength and durability of the concrete. This means that the size distribution curve is continuous and non-uniform, thus guaranteeing optimal properties in fresh and hardened concrete.

It is also recommended that the particle size distribution curve of sands should be included within the areas defined in Fig. 1.

The particle size distribution was determined for all aggregate fractions with the testing procedure for the geometrical properties of aggregates, specified in the Spanish standard UNE-EN 933-1 [18].

2.3.3.2. Assessment of fines. The EHE-08 [11] establishes requirements for the assessment of fines related to the quantity and quality of this fraction. In terms of quality, the sand equivalent index (EA) is used to determine the presence of clay-like fines, including limits that depend on the general class of exposure. In relation to the quantity of fines, the EHE-08 limits the percentage of fines in aggregates, depending on particle shape (round or crushed) and exposure. The sand equivalent index was determined for sample 004 with the testing procedure for the geometrical properties of aggregates, specified in the Spanish standard UNE-EN 933-8 [19].

2.3.4. Physical–mechanical requirements

2.3.4.1. Density. The dry particle density of recycled aggregates was determined for all the fractions with the testing procedure for the mechanical and physical properties of aggregates, specified in the UNE-EN 1097-6:2001 [20].

2.3.4.2. Water absorption. The water absorption of recycled aggregates was determined for all the samples studied with the testing procedure for the mechanical and physical properties of aggregates, specified in the UNE-EN 1097-6:2001 [20].

2.3.4.3. Resistance to fragmentation. The EHE-08 [11] recommends using the Los Angeles degradation test to evaluate the resistance of coarse recycled aggregates to possible degradation, due to the effects of abrasion, wear, and impact. Resistance to fragmentation was determined for sample 002 with the testing procedure for the mechanical and physical properties of aggregates, specified in the UNE-EN 1097-2 [21].

2.3.5. Chemical requirements

Chloride, water-soluble sulfates, total sulfur compounds, and the organic matter of recycled aggregates are limited by the EHE-08 code because of their negative effects on concrete and its durability. Accordingly, the chloride content, water-soluble sulfates, and the organic matter content of recycled aggregates were determined for sample 001 with the testing procedure for the chemical properties of aggregates, specified in the UNE-EN 1744-1 [22].

3. Results and discussion

3.1. Maximum and minimum size of aggregates

Table 3 shows the percentage of aggregate passing through sieves UNE-EN 933-2 [17]. Values in grey are in consonance with the requirements of Table 2. They define the maximum and minimum sizes of the aggregate fractions studied. Maximum sizes were 63, 125, 16, and 8 mm for fractions 001, 002, 003, and 004, respectively.

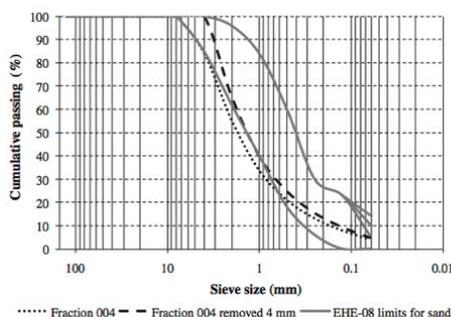


Fig. 1. Particle size distribution of fraction 004 of recycled aggregate studied, limits established in EHE-08 for sand and fraction 004 removed sizes larger than 4 mm.

tively. The minimum sizes were 1, 16, 4, and 0.25 mm for the same fractions, respectively.

3.2. Aggregate denomination

Table 4 shows the designation of the recycled aggregate fractions in this study. The EHE-08 [11] defines fine aggregate as the size of the smallest particle of aggregate with a D equal to or lower than 4 mm. The maximum size of the particles of all the fractions was greater than 4 mm. Thus, they were all classified as coarse aggregate. However even though fraction 004 was technically classified as coarse aggregate, in practice, it should be classified as fine aggregate or sand because the percentage of particles higher than 4 mm was unrepresentative (see Table 3). In fact, according to the criteria of the Spanish Structural Concrete Code (EHE-98) it would be classified as sand [23].

3.3. Geometrical requirements

3.3.1. Particle size distribution

Particle size distribution is important because it has a direct effect on the properties of concrete, such as workability, porosity, permeability, strength, degree of compaction, and durability [4,14]. A continuous particle size distribution indicates that the aggregate is uniformly graded in all sizes, which allows greater scope for interaction between particles, and provides a greater degree of compactness and mechanical strength [24].

The EHE-08 [11] recommends a continuous and non-uniform distribution curve of the aggregates; just like the ratio D/d should be greater than 1.4. Furthermore the distribution curve of sands should be included within the zones defined in Fig. 1.

Figs. 1 and 2 show the grain size distribution of different samples studied, and the last column of Table 4 shows that ratio D/d of the aggregates was greater than 1.4. These results reflect that

Table 3
 Percentage of aggregate passing across sieves series UNE-EN 933-2 [17]. Determination of maximum and minimum size of studied recycled aggregate fractions.

Sieve	Fraction			
	001	002	003	004
125	100.00	100.00	100.00	100.00
63	97.01	86.83	100.00	100.00
40	91.54	73.29	100.00	100.00
31.5	86.17	56.62	100.00	100.00
20	67.75	22.97	100.00	100.00
16	61.57	13.21	99.90	100.00
10	50.02	1.48	65.67	100.00
8	45.50	1.05	29.88	100.00
4	34.56	0.82	1.18	84.36
2	24.32	0.69	0.67	55.31
1	15.05	0.58	0.58	33.69
0.5	9.12	0.48	0.50	20.97
0.25	5.66	0.39	0.43	13.06
0.125	3.13	0.25	0.35	7.88
0.063	1.17	0.10	0.17	4.10

Table 4
 Designation and ratio D/d of fraction of recycled aggregate studied.

Sample	Designation	Ratio D/d
001	AG-1/63-T-R	63.00
002	AG-16/125-T-R	7.81
003	AG-4/16-T-R	4.00
004	AG-0.25/8-T-R ^a AF-0.25/8-T-R ^b	32.00

^a Considering EHE-08 requirements.
^b Considering EHE-98 requirements.

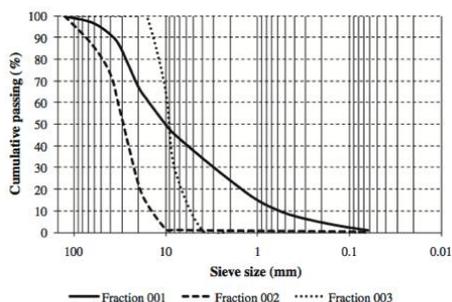


Fig. 2. Particle size distribution of fractions 001, 002 and 003 of recycled aggregates studied.

on the one hand, the samples studied had continuous and non-uniform curves, guaranteeing properties both in fresh and hardened concrete. On the other hand, the sand recycled from sample 004 fell outside of these zones since grain sizes larger than 0.5 mm (see Fig. 1), indicate a low percentage of particles of these sizes. The elimination of particle sizes larger than 4 mm in sample 004, with maximum particle size 8 mm, would suppose an increase of particles in the area where a deviation occurred (see Fig. 1).

3.3.2. Assessment of fines

The assessment of fines concerns the content of particles smaller than 0.063 mm. The presence of fines should be considered insofar as their quantity and composition, and take into account the possible existence of silt, clay, organic humus, and others. Fine particles provide a greater available surface for the aggregate. They demand more water, and therefore, increase the need for cement to maintain the water/cement ratio and increase the retraction. In consequence, the cost of concrete and the hydraulic retraction increase as well as the adhesion failures. Moreover, the fines attached to the aggregate prevent a good bond with the paste. As a result, the mortar-aggregate interface is a weak area where the concrete can easily break [13,25,26]. The fines in concrete can take the form of loose particles, clumps, or even be attached to the aggregate particles.

In relation to the composition of the fine fraction, the EHE-08 [11] code says that fine aggregates with a sand equivalent index lower than 70 should not be used for constructions subjected to the general class of exposure¹, IIa or IIb as well as no specific class. In other cases (IIIa, IIIb, IIIc, IV and specific classes of exposure,² the index should not be lower than 75. Table 5 shows the average values and standard deviation of the results obtained in sample 004. It was possible to conclude that the sand equivalent index of the samples had average values between 64 and 79. The average value was in consonance with the limits specified in the EHE-08 under the general class of exposure I, IIa and IIb, and no specific class. When the results obtained are compared with the values established by other authors [24] for natural aggregate, the nature and average quality of the sand

¹ Concrete general classes of exposure: (I) non aggressive; (IIa) aggressivity by high humidity without chloride; (IIb) aggressivity by medium humidity without chloride; (IIIa) aggressivity by marine aerial humidity with chloride; (IIIb) aggressivity by marine submerged humidity with chloride; (IIIc) aggressivity by marine humidity in tidal zones with chloride.

² Concrete specific classes of exposure: (Qa) weak chemical aggressiveness; (Qb), medium chemical aggressiveness; (Qc) high chemical aggressiveness; (H) frost aggression without melting salts; (F) frost aggression with melting salts; (E) aggressive erosion.

studied, with an equivalent sand index of around 69 falls within the range of values between 60 and 70. This value corresponds to sands with little clay and a degree of permissible cleaning, which produce a normal-quality concrete without fear of retraction [27].

In terms of quantity, the percentage of fines should be lower than 1.5% in the case of coarse aggregate and between 6% and 16% for fines aggregates, depending on the type (round or crushed) and the class of exposure. Table 5 shows the average content in fines of different samples. All samples thus fulfilled these requirements except for fraction 004, when it was classified as coarse aggregate.

Therefore, it can be concluded that the samples of the recycled aggregate used did not meet all the EHE-08 requirements in relation to assessment of fines. However, when fraction 004 was regarded as fine aggregate, it also fulfilled the requirements. In relation to the quality of fines, the results of the sand equivalent index did not assume that they were of a clayey nature. Annex 15 of the EHE-08 code [11] explains that in the case of recycled aggregates, fines could proceed from the crushing of cement mortar that attached itself to the recycled material with a high fineness modulus, similar to that of fine clay. This feature results in the worst aggregate properties that adversely affect the quality of concrete. In all likelihood, this is the main reason that its use is restricted in the elaboration of structural concrete.

3.3.3. Particle shape

Elongated and slab particles lower concrete quality. They decrease its workability, since they demand a greater quantity of water and sand. This reduces the strength of the concrete, and also requires an excessive amount of cement. Consequently, the particles break more easily. Moreover, the slab forms tend to be focused on a horizontal plane, underneath which there is an accumulation of air and water. This adversely affects the durability of concrete [25]. The Spanish standard UNE-EN 933-3 explains how to obtain the flakiness index [28], which is used to determine the particle shape of aggregates. For coarse aggregates, the EHE-08 [11] establishes that this index should be lower than 35%.

Natural aggregate has a higher flakiness index than recycled aggregate (i.e. 5–9%) [13,14]. This is because the mortar sticking to the corners tends to make round particles more angular. In the case of recycled aggregates, particle shape is determined largely by the crushing equipment. Impact mills used in the recycling plants produce cube-shaped aggregates. Experience at the recycling plant has shown that concrete tends to break into small blocks without generating slabs.

The flakiness index was not determined because the samples studied were produced in a recycling plant with an impact mill. As a result, particles tended to break into small blocks without generating slabs. It would not be difficult to assure the EHE-08 limits regarding to particle shape were fulfilled by the aggregate samples in our study.

3.4. Physical-mechanical requirements

3.4.1. Density

The EHE-08 does not limit the particle density of aggregates. However, density is an essential property for concrete mix design. It is also crucial for calculating the concrete volume produced from a certain mass of materials. The particle density of an aggregate is the ratio between the mass of the particle material and the volume occupied by the individual particles. The lower the density of the aggregate, the higher its cement mortar content will be. Consequently, the density of the recycled aggregate is significantly lower than that of natural aggregate. Lower particle density in the aggregate increases its absorption capacity and reduces its strength. As a result, a greater amount of water and cement is required, and this

Table 5
Properties of recycled aggregates studied and fulfillment of limits considering the EHE-08 [11] and Rilem recommendation [30].

Properties		Fraction							
		001		002		003		004	
		Average	Conforming	Average	Conforming	Average	Conforming	Average	Conforming
Geometrical	Ratio D/d	See Table 4	Yes	See Table 4	Yes	See Table 4	Yes	See Table 4	Yes ^a
	Sand particle size distribution	–	–	–	–	–	See Fig. 1	–	–
	Assessment of fines	Percentage of fines	1.17	Yes	0.10	Yes	0.17	Yes	4.10
		Sand equivalent	–	–	–	–	–	69.33	Yes ^a
Physical-mechanical	Dry density ^b	2.23	Yes	2.14	Yes	2.15	Yes	2.50	Yes
	Water absorption	10.64	No ^c	10.74	No ^d	8.43	No ^c	3.74	No ^c
	Resistance to fragmentation	–	–	29	Yes	–	–	–	–
Chemical	Chlorides content	–	–	–	–	–	–	0.053	No
	Water-soluble sulfates	–	–	–	–	–	–	1.52	No
	Organic matter content	Not existed	Yes	Not existed	Yes	Not existed	Yes	Not existed	Yes

^a If fraction 004 was classified as fine aggregate it would fulfill EHE-08 requirements.

^b EHE-08 code does not include a limit for this property. Rilem recommendation has been considered in this study.

^c Considering EHE-08 limits.

^d Considering Rilem recommendation limits.

makes it more difficult to achieve the required levels of concrete strength and durability [4,14,29]. For this reason, this property was included in the study. Different recommendations give limits for this parameter. For example, the Rilem recommendations [30], which provide specifications for concrete made from recycled aggregates, divide recycled aggregates into three categories (Types I–III); Type I pertains to aggregates primarily from masonry rubble, and which, according to these recommendations, should have a minimum dry particle density of 1500 kg/m³.

The specific gravity for recycled aggregates is relatively lower because the mortar phase has a higher porosity than that of the aggregate phase. Hence, recycled aggregates absorb more water than natural aggregates [29]. Indeed, the high amount of mortar attached to the crushed clay brick particle leads to a decrease in particle density and an increase in the water absorption value [31].

Table 5 shows the average value of dry density of the particles of the fractions. As can be observed, the dry density values of the recycled aggregates were similar to the values of other recycled aggregates (i.e. 2150 kg/m³), regardless of the type of cement [14,29,32]. The lower density was the result of the high content of adhered concrete, ceramic, and crushed clay brick particles in the samples [33]. All the fractions in our study were in compliance with the Rilem recommendations.

3.4.2. Water absorption

Absorption is the moisture measured when every pore is saturated by water, but when the surface is dry. The water absorption rate can influence both fresh and hardened concrete properties [4,34]. Concrete made of recycled aggregate had less compressive strength and resistance to freezing and thawing than concrete made of natural aggregate [14,35]. However, the absorption capacity of aggregate also affects the workability of concrete [33,36]. In consequence, the EHE-08 [11] limits this property to values lower than 5% for natural aggregate, and allows a value up to 7% for the coarse recycled aggregate used in the manufacture of the structural concrete.

The absorption capacity of aggregates depends either upon a consistent degree of particle porosity or represents an average va-

lue for a mixture of variously high and low absorption materials [35]. Normally, recycled aggregate is more absorptive than natural aggregate. Due to its high absorption capacity, recycled coarse aggregate must be wet before its use in making concrete. If the recycled coarse aggregate is not humid, it absorbs water from the paste, thus losing both its workability in the fresh concrete, and also the control of the effective w/c ratio in the paste [29]. In consequence, the increased absorption of recycled aggregates means that concrete made with recycled coarse aggregate and natural sand typically needs 5% more water than conventional concrete in order to obtain the same workability [4].

The water absorption values of the recycled aggregate in our study varied from one fraction to another (Table 5). Nevertheless, the values obtained were 3–12%, which were values similar to those obtained in other studies [32,37]. Higher values than EHE-08 limit were observed in all fractions except in fraction (004) with particles of a smaller size. It was also observed that higher water absorption values were related to the larger particle size of samples. A possible reason for this could be the higher absorption rate of the cement mortar attached to the aggregate particles in the case of the fraction with larger particles, and thus, with a higher water absorption capacity [4,34,38,39]. As particle size decreased, the amount of cement particles adhering to them was lower, and consequently, the water absorption capacity also decreased.

Other recommendations consulted were not as strict as the EHE-08 code. For example, the Rilem guidelines [30] specified a water absorption limit lower than 10%. If we compare our results with these guidelines, fractions 003 and 004 complied with them, whereas fraction 001 and 002 did not.

3.4.3. Resistance to fragmentation

It is important that the aggregate for making concrete be strong in a general sense [35]. In most cases, inherent aggregate strength is dependent upon aggregate toughness, a property broadly analogous to impact strength. The strength of the crushed concrete affects the abrasion capability of the aggregate, i.e. stronger concrete results in less loss [13]. Coarse aggregate, under abrasion or physical effort can wear and suffer breakage of the particles,

Table 5
Properties of recycled aggregates studied and fulfillment of limits considering the EHE-08 [11] and Rilem recommendation [30].

Properties		Fraction							
		001		002		003		004	
		Average	Conforming	Average	Conforming	Average	Conforming	Average	Conforming
Geometrical	Ratio D/d	See Table 4	Yes	See Table 4	Yes	See Table 4	Yes	See Table 4	Yes ^a
	Sand particle size distribution	–	–	–	–	–	See Fig. 1	–	–
	Assessment of fines	Percentage of fines Sand equivalent	1.17	Yes	0.10	Yes	0.17	Yes	4.10
Physical-mechanical	Dry density ^b	2.23	Yes	2.14	Yes	2.15	Yes	2.50	Yes
	Water absorption	10.64	No ^c No ^d	10.74	No ^c No ^d	8.43	No ^c Yes ^d	3.74	No ^c Yes ^d
	Resistance to fragmentation	–	–	29	Yes	–	–	–	–
	Chemical	Chlorides content	–	–	–	–	–	–	0.053
	Water-soluble sulfates	–	–	–	–	–	–	1.52	No
	Organic matter content	Not existed	Yes	Not existed	Yes	Not existed	Yes	Not existed	Yes

^a If fraction 004 was classified as fine aggregate it would fulfill EHE-08 requirements.

^b EHE-08 code does not include a limit for this property. Rilem recommendation has been considered in this study.

^c Considering EHE-08 limits.

^d Considering Rilem recommendation limits.

makes it more difficult to achieve the required levels of concrete strength and durability [4,14,29]. For this reason, this property was included in the study. Different recommendations give limits for this parameter. For example, the Rilem recommendations [30], which provide specifications for concrete made from recycled aggregates, divide recycled aggregates into three categories (Types I–III); Type I pertains to aggregates primarily from masonry rubble, and which, according to these recommendations, should have a minimum dry particle density of 1500 kg/m³.

The specific gravity for recycled aggregates is relatively lower because the mortar phase has a higher porosity than that of the aggregate phase. Hence, recycled aggregates absorb more water than natural aggregates [29]. Indeed, the high amount of mortar attached to the crushed clay brick particle leads to a decrease in particle density and an increase in the water absorption value [31].

Table 5 shows the average value of dry density of the particles of the fractions. As can be observed, the dry density values of the recycled aggregates were similar to the values of other recycled aggregates (i.e. 2150 kg/m³), regardless of the type of cement [14,29,32]. The lower density was the result of the high content of adhered concrete, ceramic, and crushed clay brick particles in the samples [33]. All the fractions in our study were in compliance with the Rilem recommendations.

3.4.2. Water absorption

Absorption is the moisture measured when every pore is saturated by water, but when the surface is dry. The water absorption rate can influence both fresh and hardened concrete properties [4,34]. Concrete made of recycled aggregate had less compressive strength and resistance to freezing and thawing than concrete made of natural aggregate [14,35]. However, the absorption capacity of aggregate also affects the workability of concrete [33,36]. In consequence, the EHE-08 [11] limits this property to values lower than 5% for natural aggregate, and allows a value up to 7% for the coarse recycled aggregate used in the manufacture of the structural concrete.

The absorption capacity of aggregates depends either upon a consistent degree of particle porosity or represents an average va-

lue for a mixture of variously high and low absorption materials [35]. Normally, recycled aggregate is more absorptive than natural aggregate. Due to its high absorption capacity, recycled coarse aggregate must be wet before its use in making concrete. If the recycled coarse aggregate is not humid, it absorbs water from the paste, thus losing both its workability in the fresh concrete, and also the control of the effective w/c ratio in the paste [29]. In consequence, the increased absorption of recycled aggregates means that concrete made with recycled coarse aggregate and natural sand typically needs 5% more water than conventional concrete in order to obtain the same workability [4].

The water absorption values of the recycled aggregate in our study varied from one fraction to another (Table 5). Nevertheless, the values obtained were 3–12%, which were values similar to those obtained in other studies [32,37]. Higher values than EHE-08 limit were observed in all fractions except in fraction (004) with particles of a smaller size. It was also observed that higher water absorption values were related to the larger particle size of samples. A possible reason for this could be the higher absorption rate of the cement mortar attached to the aggregate particles in the case of the fraction with larger particles, and thus, with a higher water absorption capacity [4,34,38,39]. As particle size decreased, the amount of cement particles adhering to them was lower, and consequently, the water absorption capacity also decreased.

Other recommendations consulted were not as strict as the EHE-08 code. For example, the Rilem guidelines [30] specified a water absorption limit lower than 10%. If we compare our results with these guidelines, fractions 003 and 004 complied with them, whereas fraction 001 and 002 did not.

3.4.3. Resistance to fragmentation

It is important that the aggregate for making concrete be strong in a general sense [35]. In most cases, inherent aggregate strength is dependent upon aggregate toughness, a property broadly analogous to impact strength. The strength of the crushed concrete affects the abrasion capability of the aggregate, i.e. stronger concrete results in less loss [13]. Coarse aggregate, under abrasion or physical effort can wear and suffer breakage of the particles,

- [4] Etxeberria M, Vázquez E, Mari A, Barra M. Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. *Cem Concr Res* 2007;37:735–42.
- [5] de Juan MS, Gutierrez PA. Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate. *Construct Build Mater* 2009;23:872–7.
- [6] Rahal K. Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate. *Build Environ* 2007;42:407–15.
- [7] Debieb F, Courard L, Kenai S, Degeimbre R. Roller compacted concrete with contaminated recycled aggregates. *Construct Build Mater* 2009;23:3382–7.
- [8] Dutch Ministry of Housing, Spatial planning and the environment. Dutch soil dictrorate. Building materials decree. Sdu Uitgevers, The Hague, Holland; 1999.
- [9] Collins RJ, Nixon PJ. Implications of the harmonisation of construction product standards for the use of recycled and secondary aggregates. The Waste and Resources Action Programme (WRAP), Banbury, UK; 2003.
- [10] Van Gerven T, Geysen D, Stoffels L, Jaspers M, Wauters G, Vandecasteele C. Management of incinerator residues in Flanders (Belgium) and in neighbouring countries. A comparison. *Waste Manage* 2005;25:75–87.
- [11] Spanish Minister of Public Works. Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08 (Spanish Structural Concrete Code); 2008.
- [12] Real D. Ecreto 105/2008, por el que se regula la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición (Royal Decree 105/2008, which regulates the production and management of construction and demolition waste). *BOE* 2008;105:22260–4.
- [13] De Juan MS. Estudio sobre la utilización de árido reciclado para la fabricación de Hormigón Estructural (study on the use of recycled aggregate in structural concrete). PhD thesis. Universidad Politécnica de Madrid. E.T.S de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Spain; 2005.
- [14] Tam VVWY, Wang K, Tam CM. Assessing relationship among properties of demolished concrete, recycled aggregate and recycled aggregate concrete using regression analysis. *J Hazard Mater* 2008;152:703–14.
- [15] Spanish standard UNE-EN 932-1:1997. Test for general properties of aggregates. Part 1: methods for sampling.
- [16] Spanish standard UNE-EN 932-2:1999. Test for general properties of aggregates. Part 2: methods for reducing laboratory samples.
- [17] Spanish UNE EN 933-2. Test for geometrical properties of aggregates. Part 2: determination of particle size distribution. Test sieves, nominal size of apertures.
- [18] Spanish standard UNE-EN 933-1. Test for geometrical properties of aggregates. Part 1: determination of particle size distribution. Sieving method.
- [19] Spanish standard UNE-EN 933-8, about test for geometrical properties of aggregates. Part 8: assessment of fines. Sand equivalent test.
- [20] Spanish standard UNE-EN 1097-6:2001 about test for mechanical and physical properties of aggregates. Part 6: determination of particle density and water absorption.
- [21] Spanish standard UNE-EN 1097-2 about test for mechanical and physical properties of aggregates. Part 2: methods for the determination of resistance to fragmentation (Los Angeles degradation test).
- [22] Spanish standard UNE-EN 1744-1 about test for chemical properties of aggregates. Part 1: chemical analysis.
- [23] Spanish Minister of Public Works. Instrucción de Hormigón Estructural EHE-98 (Spanish Structural Concrete Code); 1998.
- [24] Kraemer C, Pardillo JM, Rocci S, Romana MG, Sánchez Blanco V, Del Val MA. Ingeniería de carreteras, volumen 2 (road engineering, part 2). Madrid: McGraw Hill; 2004.
- [25] Fueyo L. Equipos de trituración, molienda y clasificación. Tecnología, Diseño y Aplicación (equipment for crushing, grinding and classification. Technology, design and implementation). Editorial Rocas y Minerales; 2002.
- [26] Lee S-T. Influence of recycled fine aggregates on the resistance of mortars to magnesium sulfate attack. *Waste Manage* 2009;29:2385–91.
- [27] Gorisse F. Ensayos y control de los hormigones (testing and control of concrete) Ingeniero. Editores Técnicos Asociados; 1981.
- [28] Spanish standard UNE-EN 933-3. Test for geometrical properties of aggregates. Parte 3: determination of particle shape. Flakiness index.
- [29] Padmini AK, Ramamurthy K, Mathews MS. Influence of parent concrete on the properties of recycled aggregate concrete. *Construct Build Mater* 2009;23:829–36.
- [30] Rilem recommendation 121-DRG guidande for demolition and reuse of concrete and masonry. Specifications for concrete with recycled aggregates. *Mater Struct* 1994;27:557–9.
- [31] Poon CS, Chan D. Feasible use of recycled concrete aggregates and crushed clay brick as unbound road sub-base. *Construct Build Mater* 2006;20:578–85.
- [32] Katz A. Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete. *Cem Concr Res* 2003;33:703–11.
- [33] Rao A, Jha KN, Misra S. Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete. *Resour Conserv Recycl* 2007;50:71–81.
- [34] Lamond JF, Campbell RL, Campbell JA, Giraldo A, Halczak W, Hale HC. Removal and reuse of hardened concrete: reported by ACI committee 555. *ACI Mater J* 2002;99:300–25.
- [35] Tam VVWY, Gao XF, Tam CM, Chan CH. New approach in measuring water absorption of recycled aggregates. *Construct Build Mater* 2008;22:364–9.
- [36] Nealen A, Schenk S. The influence of recycled aggregate core moisture on freshly mixed and hardened concrete properties. Darmstadt concrete. *Ann J*, vol. 13; 1998. <<http://www.b-i-m.de/public/tudmassiv/dacon13nealenschenk.htm>>.
- [37] Gómez-Sobero J. Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate: an experimental study. *Cem Concr Res* 2002;32:1301–11.
- [38] Hansen TC. Elasticity and drying shrinkage of recycled aggregate concrete. *ACI J* 1985;5:82.
- [39] Kobayashi S, Kawano H. Properties and usage of recycled aggregate concrete. Demolition and reuse of concrete and masonry: reuse of demolition waste. London: Chapman and Hall; 1988. 547–556.
- [40] Tabshand SW, Abdelfatah AS. Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete. *Construct Build Mater* 2009;23:1163–7.
- [41] Chini AR, Kuo S-S, Armaghani JM, Duxbury JP. Test of recycled concrete aggregate in accelerated test track. *J Transport Eng* 2001;127:486–92.
- [42] Hansen TC, Narud H. Strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate. *Concr Int – Des Construct* 1983;5:79–83.
- [43] Sri Ravindrarajah R, Loo YH, Tam CT. Recycled concrete as fine and coarse aggregates in concrete. *Mag Concr Resour* 1987;39:214–20.

7.2. Segunda publicación

El segundo artículo titulado: Métodos granulométricos en la caracterización del árido reciclado para su uso en hormigón estructural (Size grading methods to characterize construction and demolition waste for its use in structural concrete), ha sido aceptado para su publicación en la revista MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN, encontrándose actualmente en prensa.

En el Journal Citation Report, la revista cuenta actualmente con un índice de impacto de 0.437, encontrándose en el tercer cuartil de la categoría CONSTRUCTION & BUILDING TECHNOLOGY, siendo la 36 de 56, y en el cuarto cuartil de la categoría MATERIAL SCIENCE, MULTIDISCIPLINARY siendo la 192 de 232.

A continuación se incluye la carta de aceptación y la versión en inglés del artículo aceptado.



MINISTERIO DE
CIENCIA E
INNOVACIÓN



CONSEJO SUPERIOR
DE INVESTIGACIONES
CIENTÍFICAS

INSTITUTO DE CIENCIAS
DE LA CONSTRUCCIÓN
EDUARDO TORROJA (IETcc)

Madrid, 26 de julio de 2012

M^a del Mar Alonso López, como Secretaria del Comité de Redacción de la Revista MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN certifico que:

El artículo titulado “MÉTODOS GRANULOMÉTRICOS EN LA CARACTERIZACIÓN DEL ÁRIDO RECICLADO PARA SU USO EN HORMIGÓN ESTRUCTURAL” MC# 065-11 de M. Martín-Morales, Z. Sánchez-Roldán, M. Zamorano, I. Valverde-Palacios, ha sido aceptado con fecha final 2 de julio de 2012 para su publicación en la revista MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN.

Y para que conste a los efectos oportunos firmo el presente certificado en Madrid a 26 de julio de 2012



M^a del Mar Alonso
Secretaria del Comité de Redacción de la Revista
MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

Métodos granulométricos en la caracterización del árido reciclado para su uso en hormigón estructural
Size grading methods to characterize construction and demolition waste for its use in structural concrete

M. Martín-Morales^{1,*}, Z. Sánchez-Roldán², M. Zamorano³, I. Valverde-Palacios⁴

¹*Arquitecta Técnica y Licenciada en Geografía. Department of Building Construction. ETS Ingeniería de Edificación, University of Granada. Campus de Fuentenueva s/n 18071, Granada, Spain*

²*Ingeniera de Edificación. Department of Building Construction. ETS Ingeniería de Edificación, University of Granada. Campus de Fuentenueva s/n 18071, Granada, Spain*

³*Ingeniera de Caminos, Canales y Puertos. Department of Civil Engineering. ETS Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. University of Granada. Campus de Fuentenueva s/n 18071, Granada, Spain*

⁴*Licenciado en Ciencias Geológicas. Department of Building Construction. ETS Ingeniería de Edificación, University of Granada. Campus de Fuentenueva s/n 18071, Granada, Spain*

*Corresponding author: Tel.: +034 958240051; fax: +034 958248989. E-mail address: mariam@ugr.es (M. Martín-Morales)

Send 11th of november, 2011

Abstract

Recycled aggregate produced at construction and demolition waste plants is frequently used as an ingredient in structural concrete. Nevertheless, the physical, chemical and mechanical properties of this aggregate must be supervised in order to ensure the quality of the final product. Of these properties, one of the most important is particle size which depends to a great extent on the process used to manufacture the aggregate and it directly affects the consistency, workability, uniformity, and mechanical strength of concrete as well as its density, compactness, permeability and resistance to wear. This paper analyzes recycled aggregate samples with various size grading methods to determine their potential use in concrete. On the one hand, results have showed that some differences between different methods existed; on the other hand the manufacturing process should be modified so that the particle size of the recycled aggregate complied with the guidelines in the EHE-08 Code.

Keywords: concrete; construction and demolition waste; grading methods; recycled aggregate; Structural Concrete Code EHE-08

1. Introduction

The large quantities of waste generated by the construction industry have led to environmental policies aimed at the minimization, reuse and recycling of construction and demolition waste (C&D waste). Regulations regarding C&D waste were enacted in the 1990s by the European Union (1), and subsequently implemented in Spain at the national, regional and local levels. In Spain, it is estimated that the generation of construction waste ranges from 120kg/m² (new construction) to 1.229kg/m² (demolition). The source of 28% of C&D waste is the construction of civil engineering structures (2).

When construction and demolition waste is treated in suitable industrial installations, the quality of the recycled aggregate is apt for building and road construction (3), resulting in a product both economically and environmentally viable. Some references have shown the use of recycled aggregates for road construction using mixed C&D waste (4), the production of structural concrete applying ceramic C&D waste and coarse recycled aggregates from concrete precast (4, 6), or the use of fine fraction to produce mortars (7). Nevertheless, the physical, chemical and mechanical properties of recycled aggregate can vary considerably since they depend on the following: (i) the source materials of the aggregate; (ii) the aggressiveness of the environment to which the aggregate has been exposed during its useful life; (iii) the production process.

Aggregate particle size is one of the most influential factors in the performance of structural concrete (8). In the case of fresh concrete, aggregate particle size significantly affects consistency, workability and uniformity (9,10). In hardened concrete, particle size affects density, compactness, permeability and resistance to wear (11-13).

In order to determine the suitability of the particle size of recycled aggregate for structural concrete, a study was made of four samples that had been produced at a waste treatment plant in the province of Granada (Spain). The samples were analyzed with various grading methods that are conventionally applied to natural aggregate. Also taken into consideration were the requirements in the EHE-08 (14) for both natural aggregate (Article 28) and recycled aggregate (Annex 15).

Currently, manufacturers of recycled aggregate produce different fractions based more on productivity criteria than on the need of the construction sector for high-quality structural concrete. The purpose of this study was to make manufacturers aware that recycled aggregate should comply with official guidelines pertaining to particle size and distribution. This will enhance its quality and make it a more competitive and cost-effective product.

2. Materials and methods

2.1. Sampling program

Four fractions were taken from the C&D waste treatment plant for this study: (i) fraction 001 was the unselected fraction resulting of simple impact crushing before the vibrating screen process; (ii) 002 was a coarse fraction (10/50 mm); (iii) 003 was a medium-size fraction (6/10 mm); and (iv) 004 was a fine fraction (0/6 mm).

The samples were collected according to the standards UNE-EN 932-1 (15) and UNE-EN 932-2 (16)

2.2. Particle size requirements of aggregate

The study presented in this paper is based on the EHE-08 (14) particle size requirements for aggregate used to make concrete, as well as on other continuous grading methods to ensure the quality of aggregate.

2.2.1. Particle size requirements in article 28 of the EHE-08

The EHE-08 (14) specifies the requirements for aggregate used to make concrete. Both crushed and round coarse aggregate and sand are viable for this purpose. In fact, any kind of aggregate which in practice has shown good performance can be used.

The EHE-08 provides general criteria for the characterization of aggregate in accordance with the following scheme:

GR-d/D-IL-N

Where *GR* refers to the aggregate group, namely, coarse aggregate (AG), fine aggregate (AF), and fines (FN); *d* is the minimum aggregate size (mm); *D* is the maximum aggregate size (mm); *IL*

refers to the shape of the aggregate, i.e. round (R), crushed (T), and mixed (M); *N* refers to its intrinsic nature, i.e. limestone (C), siliceous (S), dolomite (D), artificial (A), and recycled (R). These criteria were used to characterize the aggregate samples in our study (see Table 1).

Muestra/Sample	Designación/Designation
001	AG-1/63-T-R
002	AG-16/125-T-R
003	AG-4/16-T-R
004	AG-0.25/8-T-R ¹
	AF-0.25/8-T-R ²
¹ Según requisitos EHE-08 / According to EHE-08 requirements	
² Según requisitos EHE de 1998 / According to EHE of 1998 requirements (23)	

Table 1. Designation and ratio *D/d* of recycled aggregate fractions (14)

The UNE-EN 933-2 (17) defines the maximum (*D*) and minimum (*d*) size of coarse or fine aggregate in terms of the sieve opening. Table 2 shows the general requirements in relation to aggregate size (14).

		Porcentaje que pasa a través del tamiz (en masa) / Percentage that passes through the sieve (in mass)				
		2D	1.4D	D	d	d/2
Árido grueso / Coarse aggregate	$D > 11.2$ o / or $D/d > 2$	100	98-100	90-99	0-15	0-5
Árido fino / Fine aggregate	$D \leq 4$ y / and $d = 0$	100	95-100	85-99	-	-

Table 2. General requirements for maximum (*D*) and minimum (*d*) aggregate size (14)

According to the UNE-EN 933-1 (18), the particle-size distribution of the aggregate must comply with the requirements for *d/D*. This distribution should not vary during the execution of the work because of its impact on the amount of cement and water in the concrete. The EHE-08 (14) recommends the use of the UNE-EN 933-2 (17) to determine the particle-size distribution of aggregate and places no restrictions on the particle-size distribution of all-in aggregate and coarse aggregate. However, it does include restrictions regarding sand, and specifies a grading based on established grain sizes (see Figure 1).

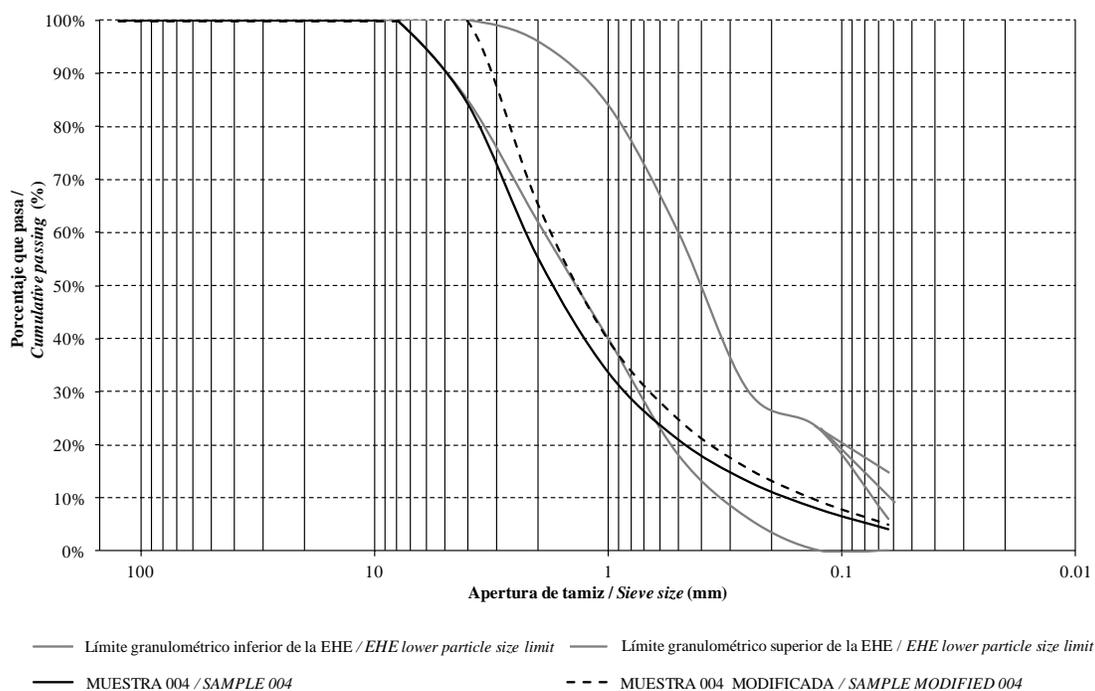


Figure 1. EHE-08 particle size domains for sand (14). Particle size distribution of sample 004 and modified sample 004

Accordingly to the quantity of the fines in aggregate (see Table 3), the percentage of fines should be less than 1.5% in the case of coarse aggregate, and between 6-16% in fine aggregate. In regards to the composition of the fine fraction, it is stipulates that fine aggregate with a sand equivalent index lower than 70 should not be used in constructions subjected to class of exposure type I, IIa or IIb as well as to no specific type of exposure. In all other cases, the index should not be lower than 75.

2.2.2. Annex 15 of the EHE-08

The use of recycled aggregate is even feasible if it complies with the provisions in Annex 15 (14). According to Annex 15, recycled concrete can be produced from coarse aggregate derived from crushed concrete waste. However, this type of recycled concrete aggregate should not exceed 20% of the total aggregate used. This is to maintain the quality of the recycled concrete and ensure that it has the same properties as conventional concrete. The percentage of recycled aggregate can only be increased if specific studies have first been performed. The fact that recycled sand cannot be used in structural concrete is due to its greater responsibility in the properties of concrete. The recycled aggregate should possess a content of fines less than or equal to 10% and less than 5% of the aggregate should pass through the 4 mm sieve (see Table 3).

Muestra / Sample	Contenido en finos / Fines content	Límite / Limit Art. 28	Límite Anejo 15 / Limit	Partículas menores de / Particles	Límite Anejo 15 / Limit	Índice equivalente arena /	Límite / Limit Art. 28
---------------------	--	------------------------------	-------------------------------	---	-------------------------------	----------------------------------	------------------------------

			Annex 15	<i>smaller than</i> 4mm	<i>Annex15</i>	<i>Sand</i> <i>equivalent</i> <i>index</i>	
001	1.17%±0.69%	1.5%	10%	35.48%±7.88%	5%	69.33	70-75
002	0.10%±0.03%	1.5%	10%	0.82%±0.61%	5%	-	-
003	0.17%±0.06%	1.5%	10%	1.18%±0.20%	5%	-	-
004	4.10%±1.77%	1.5% ²	10%	84.36%±2.54%	5%	69.33	70-75

¹Ensayo realizado en la fracción 0/4mm / *Test performed on fractions with 0/4mm grains.*

²Para la arena el límite se incrementa a 6-16% dependiendo del tipo de partículas (rodada o triturada) y la exposición ambiental / *For sand the limit increases to 6-16% depending on particle type (round or crushed) and environmental exposure.*

Table 3. EHE-08 requirements for sand and fines (14)

Annex 15 also states that the installations that produce recycled aggregate should obtain a coarse fraction with a shape coefficient, slab index and particle size distribution that comply with the particle sizes recommended for structural concrete.

2.2.3. Aggregate particle-size requirements by other authors

The grading curve reflects the weighted distribution of basic aggregates that make up a particular aggregate d/D . If the particle density of the aggregate is assumed to be constant, despite the size of the particles, the volume distribution is then equal to the weighted distribution. In any case, the grading curves of the fractions can be regarded as fit to the theoretical reference curves of other authors. Thus, the proportions of the aggregate for each sieve need not exactly match these curves. It is sufficient for the areas between the curve studied and the theoretical reference curve to concur. This indicates that both have the same particle size modulus. This study used continuous grading methods.

2.2.3.1. The Fuller method

According to Fuller (19), continuous grading could be obtained with rounded aggregates with a maximum size of 50 ± 20 mm and a cement content greater than 300 kg/m^3 . In the case of crushed aggregate, the quantity of fines should be increased. Fuller suggested that the particle distribution curve of the aggregate (Figure 2) should fit the following equation, where p is the percentage that passes through each sieve; d is the opening of each sieve; and D is the maximum size of the aggregate.

$$p = \sqrt{\frac{d}{D}}$$

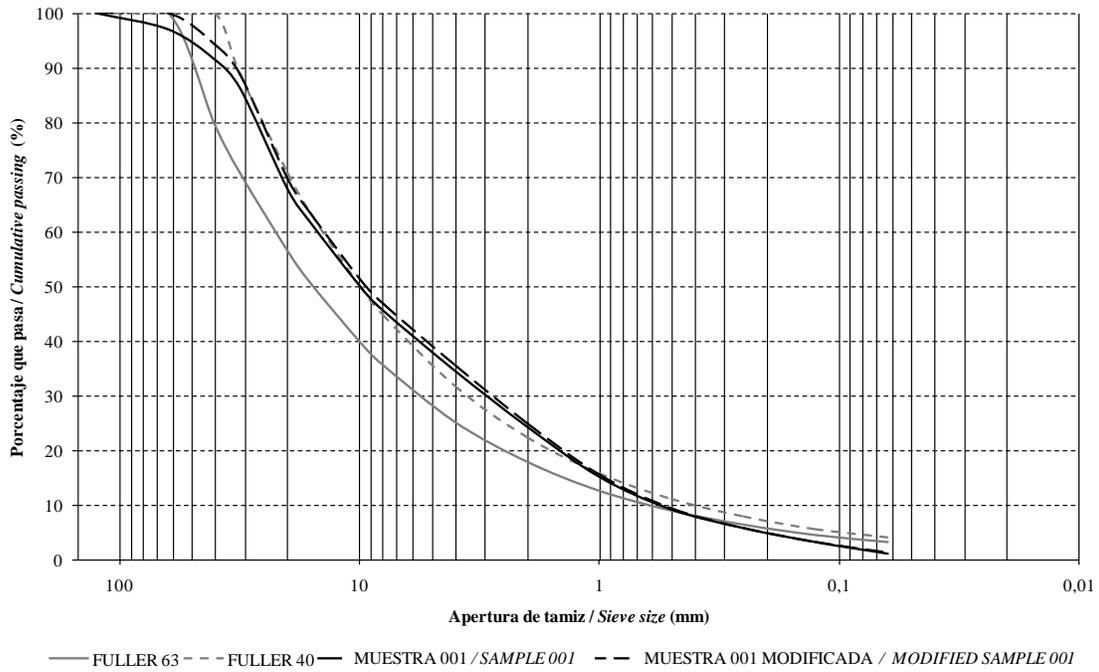


Figure 2. Fuller particle size distribution for maximum sizes 40 and 63 mm (19). Particle size distribution of sample 001 and modified sample 001

2.2.3.2. The Bolomey method

The Bolomey method (19) involves a reference grading curve (see Figures 3 and 4) based on the following expression where p is the percentage that passes through each sieve; d is the opening of each sieve; D is the maximum size of the aggregate; and A that varies with the consistency of the concrete (dry, plastic, soft and fluid) and of the aggregate (ranging from 10 to 14):

$$p = A + (100 - A)\sqrt{\frac{d}{D}}$$

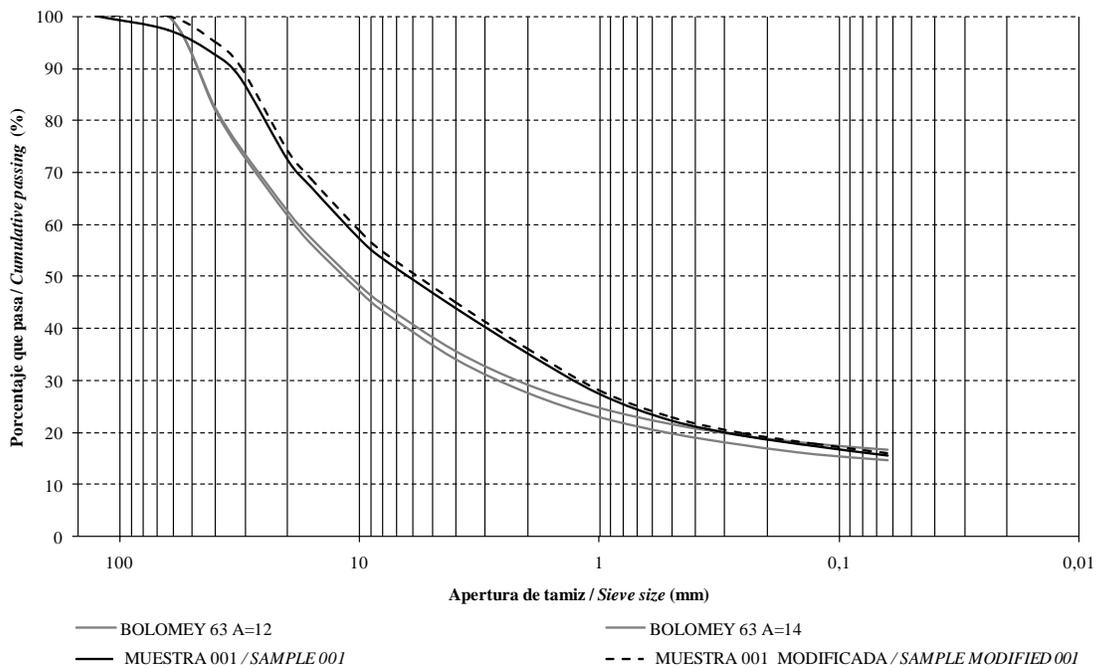


Figure 3. Bolomey particle size distribution for maximum size 63mm (19). Particle size distribution of sample 001 and modified sample 001

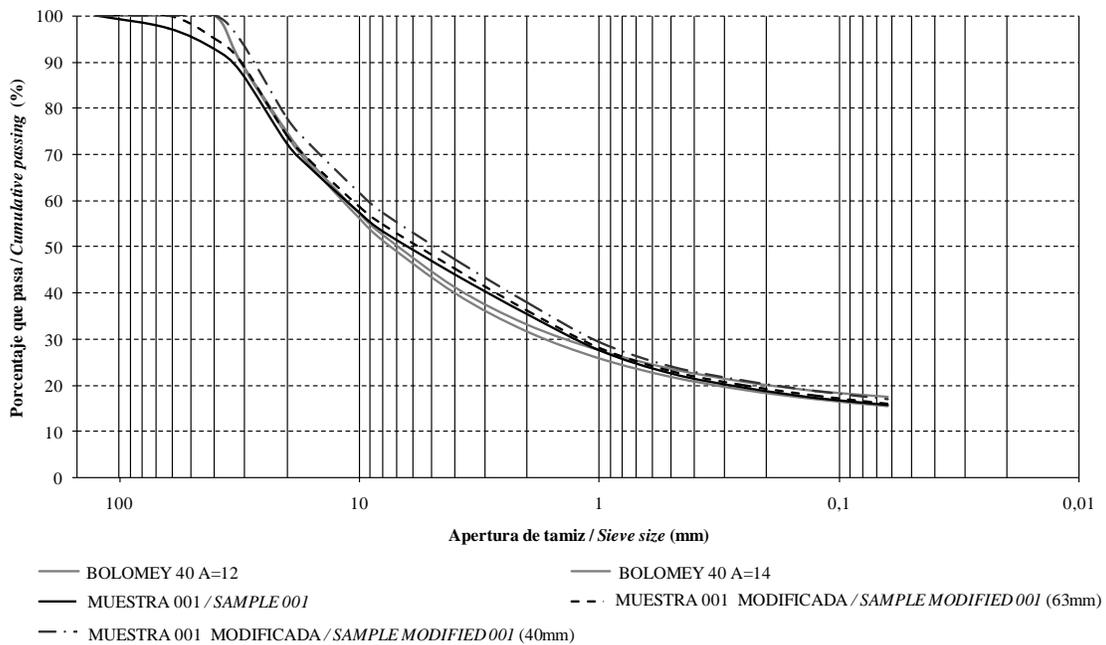


Figure 4. Bolomey particle size distribution for maximum size 40mm (19). Particle size distribution of sample 001 and modified sample 001 (removal of particles larger than 63 and 40mm).

The Bolomey curve takes into account the type of aggregate and the consistency of the concrete. It also includes the cement content in the concrete (approximately 300 kg/m^3). Therefore, for the same maximum size, Bolomey curves are always above Fuller curve.

2.2.3.3. Abrams' fineness modulus

The fineness modulus is obtained by calculating the cumulative percentages of aggregate retained on sieves 0.125, 0.25, 0.5, 1, 2, 4, 8, 16, 31.5, 63 and 125, divided by 100. This modulus gives an idea of the average size of the aggregate used. Fuller adopted the fineness modulus as a way of fitting particle size distribution to what he considered to be the optimal (19).

According to Abrams and other authors, it is not necessary to follow a theoretical grading curve. It is sufficient for the fineness modulus of the aggregate to be the same as the theoretical curve. It should have equal consistency since all mixtures with the same modulus require the same amount of water to produce concrete of the same docility and strength, provided that the same amount of cement is used. Table 4 shows the optimal fineness modulus of the aggregate as determined by Abrams, depending on the maximum size of the aggregate. With this method, it is possible to obtain the fineness modulus from a mixture of two or more aggregate fractions by using a system of two equations with two unknowns.

Muestra / <i>Sample</i>	D	MG / <i>PSM</i>	MG Abrams / <i>Abrams PSM</i>
001	63	6.17	6.68
	40		5.82
002	125	8.38	7.61
003	16	6.65	4.80
004	8	3.84	3.89

Table 4. Particle size modulus (PSM) of samples for maximum particle size (19)

2.2.3.4. Particle size domains in the DIN 1045-1

The DIN 1045-1 standard (20) establishes particle size domains defined by four grading curves based on maximum particle size. These domains are also included in the DEB-FIP Model Code (21). Continuous grading curves A, B and C define the following domains (see Figures 5 and 6): A-B refers to favourable particle sizes that produce docile, workable masses and high-strength concrete; B-C, refers to still usable particle sizes that produce concrete with low-strength and retraction; above C leads to unsuitable particle sizes that demand too much mixing water; Below U leads to unsuitable particle sizes that produce a mixture that is difficult to place.

For continuous grading, curves defining suitable particle sizes are located between U and C. The higher the curve is on the graph, the more water is required.

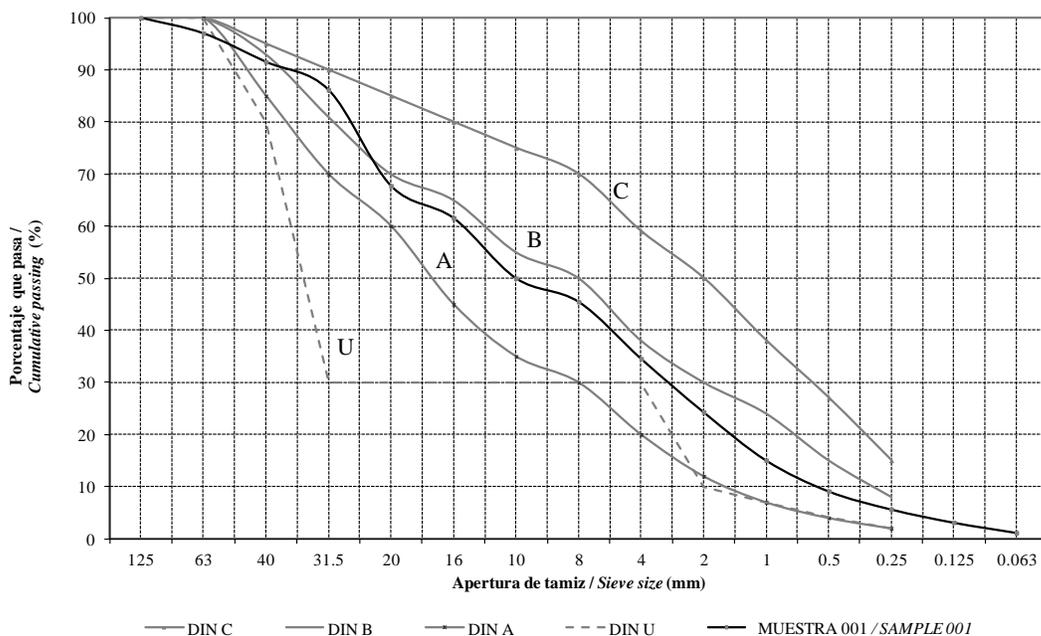


Figure 5. DIN 1045-1 particle size domains for maximum size 63mm (20). Particle size distribution of sample 001

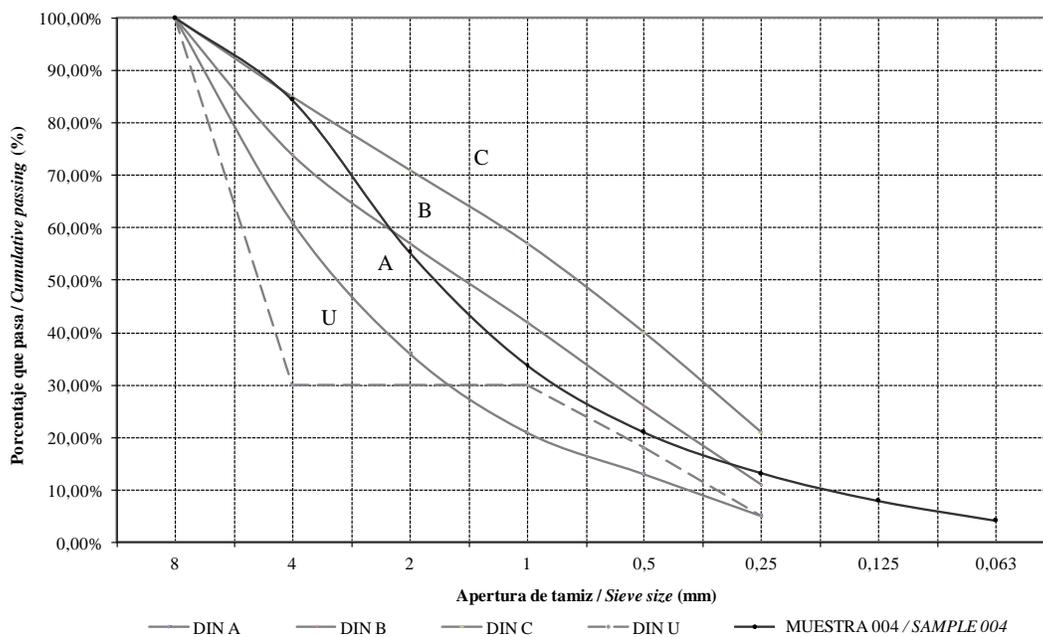


Figure 6. DIN 1045-1 particle size domains for maximum size 8mm (20). Particle size distribution of sample 004

2.2.3.5. Dreux method

The Dreux method (19) is one of the most popular French concrete mix design methods. It is based on the particle size modulus of sand. This is showed in Figure 7, where: Zone A represents a particle size modulus of 2.20–2.80. This is known as preferential sand. It produces concrete of good workability and strength, and with a low risk of segregation; Zone B represents a particle size modulus of 1.80–2.20. This is known as fine sand, which produces concrete of somewhat less strength; Zone C represents a particle size modulus of 2.80–3.20. This is known as coarse sand. Its produces concrete of higher strength, but with lower workability and a higher risk of segregation.

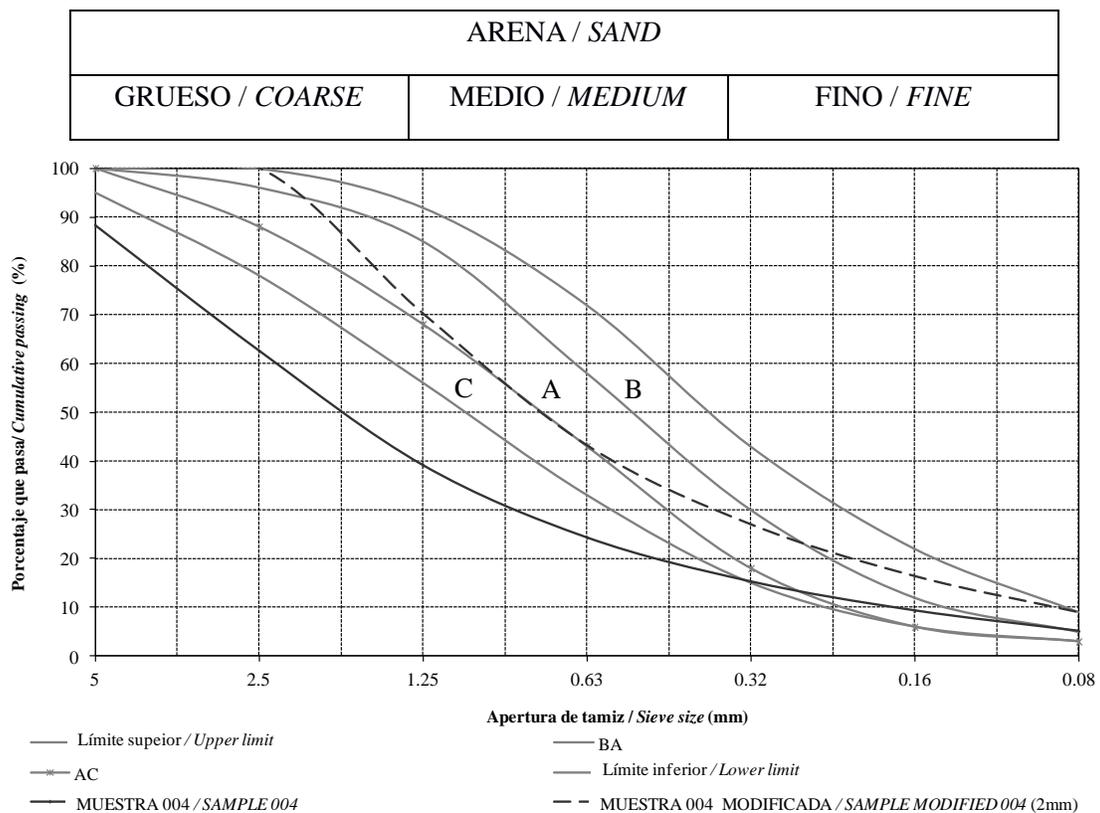
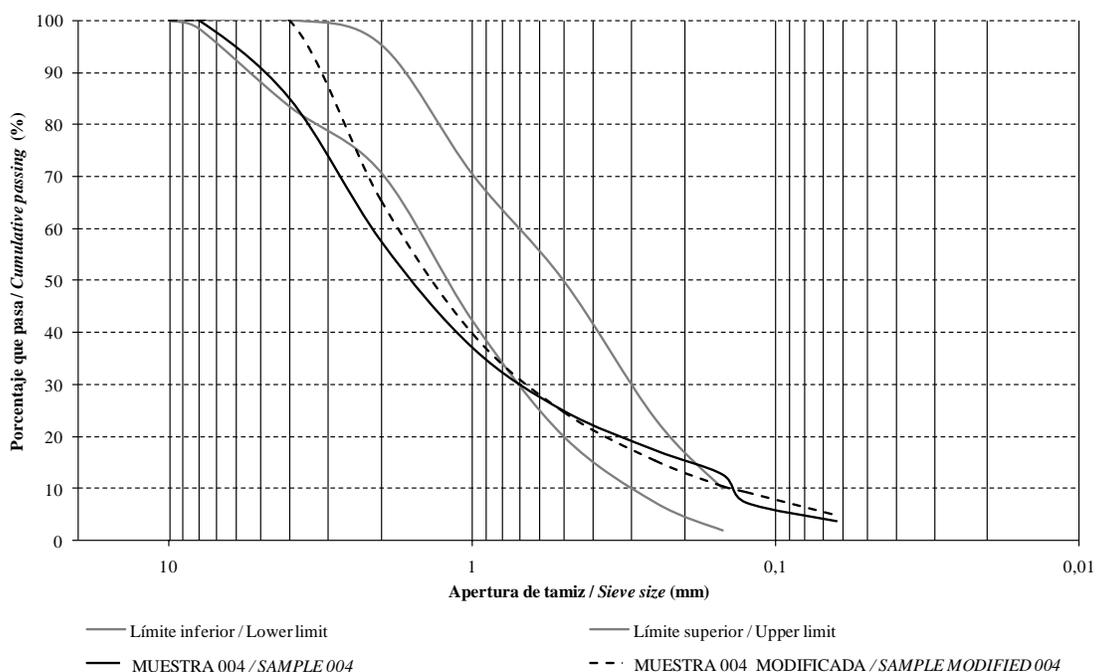


Figure 7. Dreux particle size distributions for sand (19). Particle size distribution of sample 004 and modified sample 004 (removal of particles larger than 2mm)

2.2.3.6. Sand particle sizes in the ASTM C 33-08

The American Standard ASTM C33-08 (22) limits the domain of sand into two curves (Figure 8). The upper curve corresponds to fine sand, and the lower curve corresponds to coarse sand.



Muestra / <i>Sample</i>	Método / <i>Method</i>						
	Fuller	Bolomey	Abrams	DIN	EHE	Dreux	ASTM
001	X	X	X	X			
0021			X				
0031			X				
004			X	X	X	X	X

¹ La distribución granulométrica de las muestras 002 y 003 no se ajusta a ninguna curva de referencia porque son una fracción del árido conjunto / *The particle size distributions of samples 002 and 003 did not fit any reference curve because they are a portion of the whole aggregate.*

Table 5. Methods applied in the study

3.2. Sample 001

The quantity of fines in sample 001 (Table 3) was lower than the limit specified in the EHE-08 (14), depending on aggregate type and environmental exposure. Although the sample had a fines content of less than 10%, it did not comply with the specifications in Annex 15 pertaining to the content of particles smaller than 4mm (Table 3).

Regarding the quality of fines in coarse aggregate, the sand equivalent index for the 0/4mm portion of fraction 001 was between 64 and 79. The mean value (69.33) approximated the EHE-08 limits for general class of exposure I, IIa and IIb, as well as for no specific exposure class. However, two of the three samples studied obtained a value that was lower than these limit values. When these results were compared with the values established by other authors (24) for natural aggregate, the nature and average quality of our samples (equivalent sand index of approximately 69) was within the range of values between 60 and 70. This value corresponds to aggregate whose sand has little clay and an acceptable level of cleanliness. It produces a normal-quality concrete without risk of retraction.

When fraction 001 was compared with the grading curves of Fuller, Bolomey and the DIN 1045-1 (19, 20), the following was observed:

- Fraction 001 was found to have a continuous grading closer to Fuller's curve for maximum size 40 than for maximum size 63 (Figure 2). Moreover, the removal of particles larger than 63mm gave fraction 001 a better fit to Fuller's curve defined by this maximum size. This was because the areas above and below Fuller's curve compensated each other.
- Whenever the grading curve of the aggregate was compared with Bolomey's reference curve for a maximum size of 63mm, there was a flaw in virtually all particle sizes except for fines (Figure 3). Therefore the maximum size that could be fit to the particle size distribution of the recycled aggregate was 40mm (Figure 4), at least for sizes below 8mm. This evidenced an excessive quantity of particles larger than 40mm, the removal of which gave fraction 001 a better fit to the Bolomey curve, defined by this maximum size.
- If fraction 001 was compared with the particle size domains defined in the DIN 1045-1 for a maximum size of 63, it was found that virtually all particle sizes were located between reference curves B and A. This meant that the sample had a suitable particle

size distribution that would result in a docile, workable and strong concrete. The only exception was particle sizes of 20–40 mm, which, though still usable, produced concrete of lower strength and greater shrinkage. Particle sizes larger than 63mm were not suitable, and had discontinuities that made them difficult to use for this purpose. This fraction fit the recommended particle sizes after the removal of particles larger than 63mm (Figure 5).

Even if the particle size modulus of fraction 001 was compared with Abrams' fineness modulus (19), it was found to be 92% similar in regards to the Abrams' modulus for a maximum size of 63mm and 6% higher for a maximum size of 40mm (Table 4). Since the particle size modulus indicates the size of the whole aggregate, fraction 001 was found to be adequate to shape concrete (25).

Accordingly, fraction 001 could not be used to make concrete because it did not fulfil EHE-08 (14). requirements for particles smaller than 4mm and for the equivalent sand index. However, it had a continuous particle size distribution that conformed to the various grading methods studied. It could thus be used to make concrete when larger particle sizes were eliminated. The Fuller, Bolomey and Abrams methods (19) were found to be more in consonance with the concept of maximum size in the EHE of 1998 (23), whereas the DIN 1045-1(20) was more in consonance with the current EHE-08 (14) in which the maximum size is actually greater than that of the real particle size distribution.

3.3. Samples 002 and 003

In contrast to fraction 001, the content of fines and particles smaller than 4mm in fractions 002 and 003 satisfied all the particle-size requirements in Article 28 and Annex 15 of the EHE-08 (14) (see Table 3). When the fractions were analyzed with other grading methods, their particle size distribution did not fit any reference curve because they are a portion of the whole aggregate.

The particle-size moduli of samples 002 and 003 (Table 4) were not close to Abrams' fineness moduli (19). Sample 002 was 10% higher and Sample 003 was 39% higher. This meant that they were too coarse to be used to make structural concrete by themselves since they did not have sufficient particles larger than 10-50mm and smaller than 10-6mm, respectively. The problem was that they lacked a fine fraction that was necessary to make concrete of sufficient docility, workability and compactness. This could be remedied if both samples were mixed with sand that met the requirements regarding particle-size distribution, quality and content in fines for making concrete.

3.4. Sample 004

Based on the EHE-08 particle size distributions (Table 3) and EHE 1998 criteria (23), sample 004 was classified as coarse sand. Therefore the allowable percentage of fines was 6–16%. According to Annex 15, the greatest problem with this fraction was its high percentage of particles smaller than 4mm, which was 84.36%, greater than the 5% limited.

In respect to the fines in fine aggregate, the sand equivalent index of portion 0/4mm of fraction 004 was the same as for fraction 001 (69.33). This was below the minimum of 70, although two of the three samples studied were found to fulfil the requirement. When the sample was analyzed with

other methods (i.e. the EHE-08 (14), Dreux (19), DIN 1045-1 (20), and ASTM C33-08 (22)), the following was observed:

- Recycled sand lacked particles between sizes 0.5 and 4mm in comparison to EHE-08 sand particle sizes. This could be remedied if sizes larger than 4mm were eliminated so that the sand curve tended upwards (Figure 1).
- This fraction provided a continuous grading according to the DIN 1045-1 particle-size domains for a maximum size of 8 mm (Figure 6). It was found that particles smaller than 2mm were preferable since they provided concrete with suitable docility, workability and strength. In contrast, particle sizes larger than 2mm were located between lines B and C. Although these sizes were still usable, they produced concrete of less strength and greater shrinkage.
- According to the Dreux method fraction 004 had an excessively large particle size modulus (Figure 7), which produced fresh concrete that was less workable and with a greater risk of segregation. Nevertheless, when the concrete hardened, it had greater mechanical strength. Its fine sand content was found to be appropriate for the particle size distribution. However, its medium and coarse sand content had a higher percentage of particles that made its particle size modulus higher than desired. The removal of particle sizes larger than 2mm made the curve of the recycled sand fit the domains better though the content in coarse and fine sand was still slightly high.
- In relation to the ASTM C33-08, the particle size distribution of fraction 004 had an excess of fine particles and a lack of particles of sizes 0.5–4mm. After the removal of particles larger than 4mm, there was a lack of particles of sizes 0.5–2mm. This could be improved by increasing the quantity of particles of these sizes (Figure 8).

A comparison of the particle size modulus of fraction 004 with the Abrams' fineness modulus (19) showed that fraction 004 had a particle size modulus that was 99% similar to it (see Table 4). It was thus possible to conclude that the recycled sands should not be used in structural concrete, as stipulated in Annex 15. Within the context of strict quality grading, recycled sand was found to be suitable for making concrete when larger particle sizes were eliminated. The Dreux method (19) was the most restrictive method for recycled sand, and the least restrictive, as in the case of coarse recycled aggregate, was the DIN 1045-1 method (20). This study found that the most effective grading methods for recycled sand, even with adjustments, were those recommended by the EHE-08 (14) and ASTM C33-08 (22).

4. Conclusions

Based solely on their particle size distribution, recycled aggregate from construction and demolition waste can be used to make structural concrete. Nevertheless, it is necessary for the fraction of recycled sand to be replaced by natural sand; it supplies workability, in fresh state, and strength and durability when it is hardened.

The particle size of recycled aggregate produced at a construction and demolition waste treatment plant in the province of Granada (Spain) was analyzed with different grading methods to find out whether it was apt to be used in concrete, showing differences between them. For example, the DIN 1045-1 grading method led to a maximum size aggregate that was as large as the EHE-08. In contrast, the Fuller and Bolomey methods required maximum aggregate sizes that were as small, as the one defined in the EHE of 1998. In the case of fine aggregate, the DIN 1045-1 grading method also provided particle sizes that were similar to those in the EHE-08, whereas the particle sizes of the ASTM were closer to those defined in the EHE of 1998. The Dreux method was the one that required the smallest maximum size.

Likewise, it was observed that the approach adopted by the EHE-08 regarding maximum particle size is too restrictive for the particle size distributions studied; in consequence, the criteria in the EHE of 1998 were more suitable.

Finally, the results of this study reflected the fact that producers of recycled aggregate should modify the manufacturing process. The aggregate produced should have the particle sizes demanded by the construction sector for high-quality concrete. This would make the final product both economically and environmentally viable, and able to compete with natural aggregate.

Acknowledgements

This research would not have been possible without the assistance of staff working at the C&D waste treatment center in Vélez de Benaudalla (Granada, Spain), FCC S.L, and RESUR (Consortio Provincial de Residuos Urbanos de Granada). Funding for this study was also received from the research group, Approximate Reasoning and Artificial Intelligence (ARAI-TIC 111), the Department of Building Construction at the University of Granada and the Innovation and Science Division of the Andalusian Regional Government (research project TIC-02913).

References

- (1) Vegas, I., Iañez, J.A., San José, J.T., Urzelai, A.: “Construction demolition wastes, Waelz slag and MSWI bottom ash: A comparative technical analysis as material for road construction”, *Waste Management*, Vol 28 (2008), pp. 565–574. doi:10.1016/j.wasman.2007.01.016
- (2) Ministry of the Environment and Rural and Marine Affairs: “Plan Nacional Integrado de Residuos para el período 2008-2015” (Integrated National Plan of Waste 2008-2015), *Spanish Official Gazette* 49 (2009), pp. 19893-20016.
- (3) Sagoe-Crentsil, K.K., Brown, T., Taylor, A.H.: “Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate”, *Cement and Concrete Research*, Vol 31(2001), pp 707–712. doi:10.1016/S0008-8846(00)00476-2
- (4) Jiménez, J.R., Agrela, F., Ayuso, J., López, M.: “A comparative study of recycled aggregates from concrete and mixed debris as material for unbound road sub-base”, *Mater Construcc*, Vol 61 302 (2011), pp 289-302. doi: 10.3989/mc.2010.54009
- (5) Medina, C., Juan, A., Frías, M., Sánchez de Rojas, M.I., Morán, J.M., Guerra, M.I.: “Characterization of concrete made with recycled aggregate from ceramic sanitary ware”, *Mater Construcc*, Vol 61 304 (2011), pp 533-546. doi: 10.3989/mc.2011.59710
- (6) Pérez-Benedicto, J.A., del Río –Merino, M., Peralta-Canudo, J.L., de la Rosa-Mata, M.: “Mechanical characteristics of concrete with recycled aggregates coming from prefabricated discarded units”, *Mater Construcc*, Vol 62 305 (2012), pp 25-37. doi: 10.3989/mc.2011.62110
- (7) Vegas, I., Azkarate, I., Juarrero, A., Frias, M.: “Design and performance of masonry mortars made with recycled concrete aggregates”, *Mater Construcc*, Vol 59 295 (2009), pp 5-18. doi: 10.3989/mc.2009.44207
- (8) Limbachiya, M.C., Marrocchino, E., Koulouris, A.: “Chemical–mineralogical characterisation of coarse recycled concrete aggregate”, *Waste Management*, Vol 27 (2007), pp. 201–208. doi:10.1016/j.wasman.2006.01.005
- (9) Etxeberria, M., Vázquez, E., Mari, A., Barra, M.: “Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete”, *Cement and Concrete Research*, Vol 37 (2007), pp. 735–742. doi:10.1016/j.cemconres.2007.02.002
- (10) Domingo-Cabo, A., Lázaro, C., López-Gayarre, F., Serrano-López, M.A., Serna, P., Castaño-Tabares, J.O.: “Creep and shrinkage of recycled aggregate concrete”, *Construction and Building Materials*, Vol 23 (2009), pp. 2545–2553. doi:10.1016/j.conbuildmat.2009.02.018

- (11) Meddah, M.S., Zitouni, S., Belaabes, S.: “Effect of content and particle size distribution of coarse aggregate on the compressive strength of concrete”, *Construction and Building Materials*, Vol 24 (2010), pp. 505–512. doi:10.1016/j.conbuildmat.2009.10.009
- (12) Jamkar, S.S., Rao, C.B.K.: “ Index of Aggregate Particle Shape and Texture of coarse aggregate as a parameter for concrete mix proportioning”, *Cement and Concrete Research*, Vol 34 (2004), pp. 2021–2027. doi:10.1016/j.cemconres.2004.03.010
- (13) Berndt, M.L.: “Properties of sustainable concrete containing fly ash, slag and recycled concrete aggregate”, *Construction and Building Materials*, Vol 23 (2009), pp. 2606–2613. doi:10.1016/j.conbuildmat.2009.02.011
- (14) Spanish Ministry of Public Works: “Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08 (Spanish Structural Concrete Code)”, Madrid (2008).
- (15) UNE-EN 932-1. Test for general properties of aggregates. Part 1: methods for sampling, AENOR, Madrid (1997).
- (16) UNE-EN 932-2. Test for general properties of aggregates. Part 2: methods for reducing laboratory samples, AENOR, Madrid (1999).
- (17) UNE-EN 933-2. Test for geometrical properties of aggregates. Part 2: determination of particle size distribution. Test sieves, nominal size of aggregates, AENOR, Madrid (1996).
- (18) UNE-EN 933-1/A1. Test for geometrical properties of aggregates. Part 1: determination of particle size distribution. Sieving methods, AENOR, Madrid (2006).
- (19) Jiménez Montoya, P., García Meseguer, A., Morán Cabré, F.: “Hormigón Armado”, GG, Barcelona (2000).
- (20) DIN 1045-1. Concrete, reinforced concrete and prestressed concrete structures. Part 1. Design and construction. Beuth Verliag GmbH, Berlin (2008).
- (21) GEHO-CEB Grupo Español del Hormigón.: “Código modelo CEB-FIP 1990 para hormigón estructural” (DEB-FIP Model Code for Structural Concrete), Madrid (1995).
- (22) ASTM C 33 – 08. Standard Specification for Concrete Aggregates. West Conshohocken, USA (2008).
- (23) Spanish Ministry of Public Works.: “Instrucción de Hormigón Estructural EHE” (Spanish Structural Concrete Code), Madrid (1998).
- (24) Poon, C.S., Chan, D.: “Feasible use of recycled concrete aggregates and crushed clay brick as unbound road sub-base”, *Construction and Building Materials*, Vol 20 (2006), pp. 578-585. doi:10.1016/j.conbuildmat.2005.01.045
- (25) Gómez Soberón, J.M., Vázquez Ramonich, E., Agulló Fité, L.: “Hormigón con áridos reciclados. Una guía de diseño para el material” (In Spanish), Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, Barcelona (2001).

7.3. Tercera publicación

El tercer artículo titulado: Un estudio para la aplicación del árido reciclado en obras de carreteras en España siguiendo las especificaciones del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3) (Recycled aggregate in road construction following the Spanish General Technical Specifications for Roads and Bridge Works (PG-3): a case study), ha sido aceptado para su publicación en la revista INFORMES DE LA CONSTRUCCIÓN, encontrándose actualmente en prensa.

En el Journal Citation Report, la revista cuenta actualmente con un índice de impacto de 0.260, encontrándose en el cuarto cuartil de la categoría CONSTRUCTION & BUILDING TECHNOLOGY, siendo la 47 de 56.

A continuación se incluye la carta de aceptación y la versión en inglés del artículo aceptado.



informes
de la construcción

Madrid, 13 de junio de 2012

Por la presente se hace constar que, el artículo titulado: **UN ESTUDIO PARA LA APLICACIÓN DEL ÁRIDO RECICLADO EN OBRAS DE CARRETERAS EN ESPAÑA SIGUIENDO LAS ESPECIFICACIONES DEL PLIEGO DE PRESCRIPCIONES TÉCNICAS GENERALES PARA OBRAS DE CARRETERAS Y PUENTES (PG-3)**

Firmado por los autores: **M. Martín-Morales, G.M. Cuenca, M. Zamorano, I. Valverde-Palacios.**

Identificado como «IC-11-125» y enviado a nuestra revista el día 26/10/2011 ha sido aceptado para su publicación en "Informes de la Construcción" y saldrá editado en un próximo número de acuerdo con lo que decida el Consejo de Redacción.

La revista Informes de la Construcción, con ISSN 0020-0883, se publica trimestralmente en el Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (IETcc), centro perteneciente al Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC).

Nuestra revista aparece en diferentes bases de datos y ha sido seleccionada por Scopus y Thomson-Reuters para ser indexada y sus resúmenes publicados en los siguientes índices:

- › Science Citation Index Ampliado (SciSearch)
- › Journal Citation Reports/Edición científica
- › Avery Index to architectural periodicals
- › Iconda
- › Scopus
- › Latindex

En enero de 2012, ha recibido la calificación de EXCELENTE para la certificación de la Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología – FECYT.

Un atento saludo,

Ignacio Oteiza
Director de la Revista

informes
de la construcción
Informes@ietcc.csic.es
<http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es>



C/ Serrano Galvache, 4
28033 Madrid-España
Tel.: 91 302 04 40
Fax: 91 302 07 00

Un estudio para la aplicación del árido reciclado en obras de carreteras en España siguiendo las especificaciones del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3)

Recycled aggregate in road construction following the Spanish General Technical Specifications for Roads and Bridge Works (PG-3): a case study

M. Martín-Morales^{*}, G.M. Cuenca^{**}, M. Zamorano^{***}, I. Valverde-Palacios^{****}

^{*} *Department of Building Construction, Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Edificación, University of Granada, Campus de Fuentenueva s/n 18071, Granada, Spain, E-mail: mariam@ugr.es*

^{**} *Department of Building Construction, Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Edificación, University of Granada, Campus de Fuentenueva s/n 18071, Granada, Spain, E-mail: gloriacumoy@hotmail.com*

^{***} *Department of Civil Engineering, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, University of Granada, Campus de Fuentenueva s/n, 18071 Granada, Spain, E-mail: zamorano@ugr.es*

^{****} *Department of Building Construction, Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Edificación, University of Granada, Campus de Fuentenueva s/n 18071, Granada, Spain, E-mail: nachoval@ugr.es*

Persona de contacto/Corresponding author: mariam@ugr.es (M. Martín-Morales)

Resumen

En esta investigación se han caracterizado cuatro muestras de árido reciclado para su potencial uso en obras de carreteras en España siguiendo el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3). Aunque algunas fracciones presentaron suficiente calidad para la construcción de terraplenes, rellenos localizados y rellenos todo en uno, resultaron inadecuadas para la construcción de drenes subterráneos, zahorras, suelos estabilizados y pavimentos de hormigón. Obtuvieron una evaluación negativa en cuanto a distribución granulométrica y contenido en sulfatos. No obstante, la calidad de este árido reciclado podría mejorar sustancialmente eliminando manualmente el yeso antes de la trituración en planta o seleccionando el material con un mayor cuidado al inicio del proceso. Finalmente, recomendamos que los empresarios de las plantas de residuos de construcción y demolición modifiquen el procedimiento de fabricación para obtener una distribución granulométrica adecuada, de acuerdo con los requisitos del PG-3 y el uso previsto del árido.

Palabras clave: Residuos de construcción; Residuos de demolición; árido reciclado; obras de carreteras; Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3)

Abstract

This research characterizes four samples of recycled aggregate for their potential use in road construction projects in consonance with the Spanish General Technical Specifications for Roads and Bridge Works (PG-3). Although some fractions were of sufficient quality for the construction of embankments, backfills, and quarry-run fills, they were ultimately found to be unsuitable for the construction of underground drainage, granular structural layers, soil stabilization and concrete pavements. They were negatively evaluated because of their particle size distribution and sulfate content. Nevertheless, the quality of this recycled aggregate could be substantially improved by manually removing the gypsum before the crushing process at the plant or by selecting the material with greater care at the beginning of the process. Finally, we suggest that C&D waste plant managers should modify the manufacturing process to obtain a suitable particle size distribution in accordance with PG-3 requirements and the projected use of the aggregate.

Keywords: Construction waste; demolition waste; recycled aggregate; road construction; Spanish General Technical Specifications for Roads and Bridge Works (PG-3)

1. Introduction and objective

During the past decades, Construction and Demolition (C&D) waste has been most often disposed of in landfills. However, in recent years, recognition of the potential for the diversion of waste components from landfills has made C&D waste management a focus of interest in European Union legislation. EU policies are based on establishing a hierarchy of options for effective waste management (1, 2). Firstly, waste reduction should take place at the site of origin. Secondly, after reducing waste at the site, priority must then be given to its reuse, recycling, and valorization before opting for its final disposal in landfills (3, 4).

Many European countries and regions have established methods and regulations to foment the collection, evaluation, and reuse of waste in construction (5, 6). In Spain, there is still no national legislation regulating the environmental assessment of secondary materials. Therefore, the environmental agencies of the regional governments in Spain are responsible for regulating the use of secondary materials in roads and other construction applications (3). However, there are sets of technical specifications for construction materials. This is the case of the Spanish General Technical Specifications for Roads and Bridge Works (PG-3) regulates the materials used in road sections profiles (7).

Nowadays, recycled aggregate made from C&D waste offers a viable solution to the problem of waste disposal and environmental pollution. Using this waste also helps to safeguard natural resources, reduce construction cost, and increase the supply of sand and gravel (8, 9). Even though there has been a wide range of studies on the use of recycled aggregate in mortar (10, 11), concrete (12, 13) and precast concrete (14, 15), little research has been done on the use of mixed recycled aggregates in road construction. For example, Jimenez *et al.* (16) showed that recycled aggregate from C&D waste can be used as an alternative to natural aggregate in unpaved rural road construction. Agrela *et al.* (17) studied the use of recycled aggregate from masonry waste as cement-treated recycled aggregate in the construction of the sub-base layers of road surface courses. This waste was used to pave the access ramp to a highway in Malaga (Spain). Studies from Vegas *et al.* (18) and Melbouci (19) can also be highlighted, showing that the application of C&D waste aggregate in road layers contributes to the consolidation of this granular material, as evidenced in the quantity of ceramic fines generated in the crushing process of the ceramic fraction of the recycled aggregate, which improves mechanical resistances. Even though this mixed recycled aggregate is unsuitable for hot mix asphalt because of its poor stripping behaviour (20), the use of recycled brick powder as a replacement for the filler in the asphalt mix was found to have better mechanical properties than limestone filler (21).

In the province of Granada (Spain), a C&D Waste Management Plan has been implemented geared to managing this type of waste. This C&D Waste Management Plan proposed the construction of 16 installations to manage 90% of this waste in the province of Granada. The installations for this purpose consisted of waste treatment and disposal centers, depending on the amount of C&D waste generated. In the case of areas with a waste production greater than 14,000 m³ per year, the construction of a stationary recycling plant was proposed.

Recycled aggregate for use in construction and other recyclable products (e.g. plastic, wood, and metal) were thus recovered, and the rest of the materials were deposited in landfills. In areas with waste production less than 14,000 m³ per year, landfills were regarded as the most effective solution for waste disposal.

The aim of this research study is to characterize the mixed recycled aggregates obtained from a C&D waste plant operating in Granada, verifying its potential use in all aspects of road construction. This includes roadbeds (i.e. embankments, backfills, and quarry-run fills) drainage fillers, structural layers (i.e. artificial graded aggregates, lime-stabilized soils, soilcement, and cement-bound gravel) and road surfaces (i.e. prime coats, seal coats, concrete pavement, and lean concrete pavement). In this sense, the PG-3 only recommends the use of recycled aggregates, from C&D waste, in road layers, cement-bound gravel, and lean concrete pavement.

This research will contribute to a more in-depth study on the use of C&D aggregates. Furthermore, the results obtained will provide a basis for the possible modification of current technical standards. This would encourage a more widespread use of recycled aggregate and would also promote secondary markets for this type of waste.

2. Materials and methods

2.1. The C&D waste treatment process

For this study, samples of mixed recycled aggregates were taken from a stationary recycling plant, located in the southern part of the province of Granada (Spain). The C&D waste treatment process at these installations consists of simple impact crushing, and separation with vibrating screens. Metallic elements are removed by a magnetic conveyor belt, and large impurities, such as plastics, paper, glass, and gypsum are extracted by hand before the crushing process. Three different fractions of recycled aggregate are produced by the plant: 10/50 mm, 6/10 mm, and 0/6 mm. Non-recyclable fractions are deposited in a landfill.

2.2. Sampling program

Our study focused on four mixed fractions from the C&D waste treatment plant. Fraction 001, which was the unselected fraction, was the result of simple impact crushing before the vibrating screen process. The other samples corresponded to the three fractions of recycled aggregate produced by the plant: (i) 002 was a coarse fraction (10/50 mm); (ii) 003 was a medium-size fraction (6/10 mm); (iii) 004 was a fine fraction (0/6 mm). Table 1 shows the state of tests performed. For each one there have been realized three trials per sample in order to obtain an average value.

The samples were collected according to the Spanish Standard UNE-EN 932-1 (22). Since the objective was to obtain a representative bulk sample, a stack sampling procedure was used. Accordingly, sample fractions of similar size were taken from different points, heights, and depths of the stack. Following the procedure described in the UNE-EN 932-2 (23), a laboratory 50 mm sample divider was used to reduce samples, and obtain coarse aggregate, as well as medium and fine fractions.

2.3. Laboratory procedures

The battery of tests run on the aggregate fractions in accordance with PG-3 recommendations were: particle size distribution (24, 25), sand equivalent (26), resistance to fragmentation (27), plasticity (28, 29), CBR value (30) water-soluble sulfates and organic matter content (31).

3. Results and discussion

Table 1 summarize the results obtained within the laboratory procedures conducted. Characterization results have been analyzed, according to the specifications of the PG-3, in order to study the feasibility of using the mixed recycled aggregates selected as alternative materials in: roadbeds, drainage fillers, road structural layers and road surfaces.

Properties	Fraction				
	001	002	003	004	
Sand equivalent value ¹	-	-	-	69.25±9.75	
Geometrical	Particle shape	No flakiness	No flakiness	No flakiness	No flakiness
	Percentage of crushed particles (%)	100	100	100	100
	CBR ² (%)	81.47±49.74	-	-	-
Physical-mechanical	Resistance to fragmentation ³ (LA)	-	29±2	-	-
	Free swelling	None	None	None	None
	Plasticity	Non-plastic	Non-plastic	Non-plastic	Non-plastic
Chemical	Water soluble sulfates content ⁴ (%)	1.52±0.46	-	-	-
	Organic matter content (%)	None	None	None	None

¹Test performed on fraction 0/4mm grains according to UNE-EN 933-8 (26)

²Test performed on fraction 0/20mm grains according to UNE-EN 103502 (30)

³Test performed on fraction 10/14mm grains according to UNE-EN 1097-2 (27)

⁴Test performed on fraction 0/16mm grains according to UNE-EN 1744-1 (31)

Table 1. Results of properties of recycled aggregates studied

3.1. Characterization of materials for roadbeds

The PG-3 (7) specifies three types of roadbeds: embankments, backfills, and quarry-run fills. Table 2 summarizes the geometrical, physical-mechanical and chemical properties of materials used in roadbeds.

The technical requirements also include a soil classification system, which defines five levels of soil quality, depending on its organic matter content. This involves testing for water-soluble salts and gypsum content, particle size distribution, liquid limit, plasticity index, normal proctor test and free swelling. These five soil quality groups from the lowest to highest quality are the following: (i) Selected Soils (SS); (ii) Appropriate Soils (AS); (iii) Tolerable Soils (TS); (iv) Marginal Soils (MS); (v) Unsuitable Soils (US). Table 3 summarizes the technical requirements for soil quality. Unsuitable soils are those not included in any of the above categories.

PG-3 article and application		Soil classification	Particle size distribution	Maximum particle size	CBR
330 Embankment	Crown	Selected Soil (SS) Appropriate soils (AS)	#20>70% or #0.08>35%	-	≥ 5
	Foundation	Selected Soil (SS) Appropriate soils (AS)		-	≥ 3
	Core	Tolerable soils (TS)		-	
332 Backfills	-	-	-	-	>10 > 20 backfill for engineering structures
333 Quarry-run fills	-	-	#20>70% or 30%>#0.08>35% #20<30% or #0.08≥10%	< 100 mm	-

Table 2. PG-3 technical requirements for aggregates used in the construction of roadbeds (7)

In relation to the soil classification limit values established in the technical requirements (see Table 3), none of the fractions studied could be categorized as Selected and Appropriate Soil because of their high water-soluble salts content (even though they fulfilled the rest of the technical requirements). In addition, fraction 002 did not fulfill the limit for maximum particle size. Despite the fact that the content of total sulfur compounds was not determined, the high values of water-soluble sulfates signify that the content in total sulfur compounds exceeded the PG-3 limits for this type of soil.

Requirements	Soil categories			
	Selected (SS)	Appropriate (AS)	Tolerable (TS)	Marginal (MS) ⁵
Organic matter content (OM)	< 0.2 %	< 1 %	< 2 %	< 5%
Water-soluble salts content, including gypsum (SS)	< 0.2 %	< 0.2 %	-	-
Maximum particle size (D_{max})	< 100 mm	< 100 mm	-	-
Percentage of particles passing # 0.4 UNE	≤ 15 % < 75 % ¹	< 80 %	-	-
Percentage of particles passing # 2 UNE	< 80% ¹	-	-	-
Percentage of particles passing # 0.08 UNE	< 25 % ¹	< 35 %	-	-
Liquid limit (LL)	< 30	< 40	< 65	-
Plasticity index (IP)	< 10	> 40 ²	> 0.73 x (LL-20) ³	> 0.73 x (LL-20) ⁴
Free swelling test	-	-	< 3 %	< 5 %

¹ These values are only applicable if the percentage of particles passing # 0.4 UNE is higher than 15%

² This value is only applicable if LL > 30

³ This value is only applicable if LL > 40

⁴ This value is only applicable if LL > 90

⁵ This type of soil cannot be included in the other categories, but fulfills the requirements included below

Table 3. PG-3 technical requirements for soil used in the construction of roadbeds (7)

The soluble salt content in the materials in a roadbed must be limited to prevent possible aqueous dissolutions which might lead to subsidence or loss of roadbed resistance (6). Water-soluble sulfate-based products are common contaminants in C&D waste (32) mainly due to the presence of calcium and sulfate ions associated with gypsum, especially in those aggregates from mixed debris. Manual selection before the crushing process removes large impurities, including gypsum. Nevertheless, since a high percentage of the smaller-size fraction passed into the crushing process, the mean sulfate content of our samples was higher than the percentage established in the PG-3 for water-soluble salts content (including gypsum). In consequence all samples were classified as Tolerable Soil.

When the results of the particle-size distribution of the samples were compared with the PG-3 limits (see Table 2), it was evident that fractions 001 and 002 did not fulfill the limits stipulated for embankments and backfills. In contrast, fractions 003 and 004 met the technical requirements for embankments (# 20 > 70%), but not those for backfills.

When the CBR test was performed on fraction 001, the value obtained (81.47±49.74) exceeded the limit value established for embankments (≥ 5 for the crown and ≥ 3 for the foundations and core) and backfills (> 10 and > 20 for the backfilling of engineering structures). In this respect, our results were similar to those obtained in other studies. For example, Vegas et al. (6) obtained values of 47% - 107% for granular materials from recycled construction and demolition. The variability of this index could be due to varying quantities of fine particles as well as to the morphology of samples. For example, Poon and Chan (33) concluded that the presence of ceramic materials have resulted in lower values attributed to the lower particle density and higher water absorption and on the other hand Vegas et al. (18) founded that this material could grow the value by the fact that brick particles act by slipping between the coarse grains, which confers to the materials a good compactness and a low water contents (19).

The result of the soil plastic limit test on sample 004 reflected its non-plastic state, which indicated the good performance of this material in relation to water content. Likewise, free swelling parameter was not performed on the samples in our study because the fractions were all coarse-aggregate. However, no swelling after immersion in water was detected in the CBR test development (30).

Fractions 001 and 002 thus fulfilled the requirements for backfills, whereas 003 and 004 could be used in embankments, though only for the core and foundations. However, they could not be used in the crown, which is the most critical layer of an embankment.

3.2. Characterization of materials for drainage fillers

Drainage filler consists of the spreading and compaction of drainage material in ditches, the backfill of engineering structure and any other area whose size does not permit the use of heavy equipment (7). The restrictions on the use of aggregate as drainage material depends on its properties as well as on those of the soil to be drained related on Table 4.

Properties	Soil types		
	Non-cohesive soils	Cohesive soils	Blind drains
Cleanliness	Absence of clay, marl, organic material, and other foreign substances		
Resistance to fragmentation (LA)	< 40	< 40	< 40
Plasticity	non-plastic	non-plastic	non-plastic
Particle size distribution	#0.08<5%	#0.08<5%	#0.08<5%
Sand equivalent index	>30	>30	>30
Maximum particle size (mm)	< 76	< 76	20-80
Uniformity coefficient (F60/F10)	< 20	< 20	<4
Filter conditions	F ₁₅ (mm)	< 1	0.1-0.4
	F ₁₅ /d ₈₅	<5	-
	F ₁₅ /d ₁₅	>5	-
	F ₅₀ /d ₅₀	<25	<25
F ₈₅	Perforated pipes	F ₈₅ /orifice diameter >1	F ₈₅ / orifice diameter >1
	Open joint pipes	F ₈₅ /joint opening > 1.2	F ₈₅ / joint opening > 1.2
	Porous concrete pipes	F ₈₅ /d ₁₅ pipe aggregate >0.2	F ₈₅ /d ₁₅ pipe aggregate >0.2
	Putlog holes	F ₈₅ /putlog hole diameter >1	F ₈₅ / putlog hole diameter >1

Table 4. PG-3 technical requirements for aggregates used in the construction of drainage fillers (7)

The results obtained for drainage material parameters indicated that none of the fractions tested could be used as drainage fillers. Despite the fact that the fractions fulfilled the requirements for cleanliness, resistance to fragmentation, plasticity and the sand equivalent index, some of the particle size requirements were not fulfilled. More specifically, fraction 001 did not fulfill the requirements related to F₁₅ for all types of soil, as well as the uniformity coefficient of 16 in the case of blind drains. Fractions 002 and 003 did not fulfill the limits related to F₁₅ (20 and 8 respectively) for all types of soils. Finally fraction 004 did not fulfill the limits for maximum aggregate size (8 mm) and the uniformity coefficient of 16 in the case of blind drains (see Table 5).

	Fraction			
	001	002	003	004
D ₁	63	125	16	8
Characteristics of filtering material				
F ₆₀	16	40	10	4
F ₁₀	1	16	8	0.25
F ₆₀ /F ₁₀	16	2.5	1.2	16
F ₁₅	1	20	8	0.4
F ₅₀	10	31.5	10	2
F ₈₅	31.5	63	16	8

¹ Maximum size of the aggregate (D) is defined as the first sieve opening UNE EN 933-2 retaining more than 10% of the sample (Article 510 of PG-3) (7)

Table 5. Percentage of aggregate passing through sieves series UNE EN 933-2 (25) and characteristics of filtering material

Cleanliness was a parameter not performed, but the result of plasticity test showed that the samples were non-plastic. Furthermore, their sand equivalent index value of higher than fifty indicated that the aggregates were

not contaminated, and confirmed that their cleanliness level was sufficient for most applications (34), and sample 004 an index ranged from 64 to 79.

3.3. Characterization of materials for road structural layers

3.3.1. Artificial road granular structural layers

Graded aggregate can be defined as inert continuous granular material used in pavement layers (7). The PG-3 distinguishes the follow two types of aggregate (20): artificial graded aggregate ZA25, ZA20 and ZAD20, and natural graded aggregate ZN40, ZN25 and ZN20, in order to their particle size distribution.

Table 6 and Figure 1 show the technical requirements to be fulfilled by such material. Due these applications include limits pertaining to the intensity of vehicle traffic supported by the road, the vehicle traffic classification is shown in Table 7.

Properties		Limit
Sand equivalent value	Heavy traffic (T00-T1)	>40
	T2-T4 and hard shoulders T00-T2	>35
	Hard shoulders T3-T4	>30
Cleanliness coefficient		< 2
Maximum particle size	Base layers	20-25 mm
	Subbase layers	25-40 mm
Shape of particles. Flakiness index		< 35
Percentage of crushed particles (%)	T00-T0	100%
	T1-T2 and hard shoulders T00 and T0	≥ 75%
	Rest of cases	≥ 50%
Resistance to fragmentation (LA)	T00-T2	≤ 35
	T3-T4	≤ 30
Liquid limit (LL)	Hard shoulders T32-T4	< 30
	Rest of cases	Non-plastic
Plasticity index (IP)	Hard shoulders T32-T4	< 10
	Rest of cases	Non-plastic
Total sulfate content (SO ₃)	Materials in contact with cement-treated layers	< 0.5%
	Rest of cases	< 1%

Table 6. PG-3 technical requirements for material used as artificial graded aggregate (7)

Type	T00	T0	T1	T2	T31	T32	T41	T42
Medium Intensity – Daily (vehicles/day)	>4000	3999-2000	1999-800	799-200	199-100	99-50	49-25	<25

Table 7. Type of traffic (7)

The physical and mechanical properties requirements establish limit values for resistance to fragmentation, liquid limit, and the plasticity index. The samples were found to be non-plastic, and the Los Angeles test produced mean values of 29 ± 2 , lower than the limit, though one sample exceeded this value for use in roads with T3 and T4 vehicle traffic. This value was similar to the result obtained for other aggregates (35-38). All samples were found to have a Los Angeles coefficient higher than 20, the typical value of high-quality natural aggregate (37, 39). The presence of ceramic waste and cement mortar attached to the aggregate particles in our samples resulted in a lower resistance to fragmentation (39-41).

Finally, the PG-3 (7) includes a limit value for sulfate content when the aggregate is to be used in an artificial granular layer. The mean value for all samples (1.52 ± 0.46) exceeded the limit established in the regulations. Since previous studies obtained similar results, this seems to indicate that one of the critical properties of C&D waste for its use as granular material in structural unbound layers are sulfur compounds (6). The concentration of these compounds depends on the raw materials from which the materials are generated. This usually depends on whether the aggregate is composed of rubble segregated at the source. Recycled aggregates from concrete rubble and selected ceramic material show values which, in most cases, are below the limit established in the PG-3. However, aggregates from mixed rubble, generally associated with non-selective demolition (i.e. our samples), tend to have a total sulfur content exceeding the limits in the

specifications. These high percentages are due to the presence of gypsum, which is part of the original rubble (6).

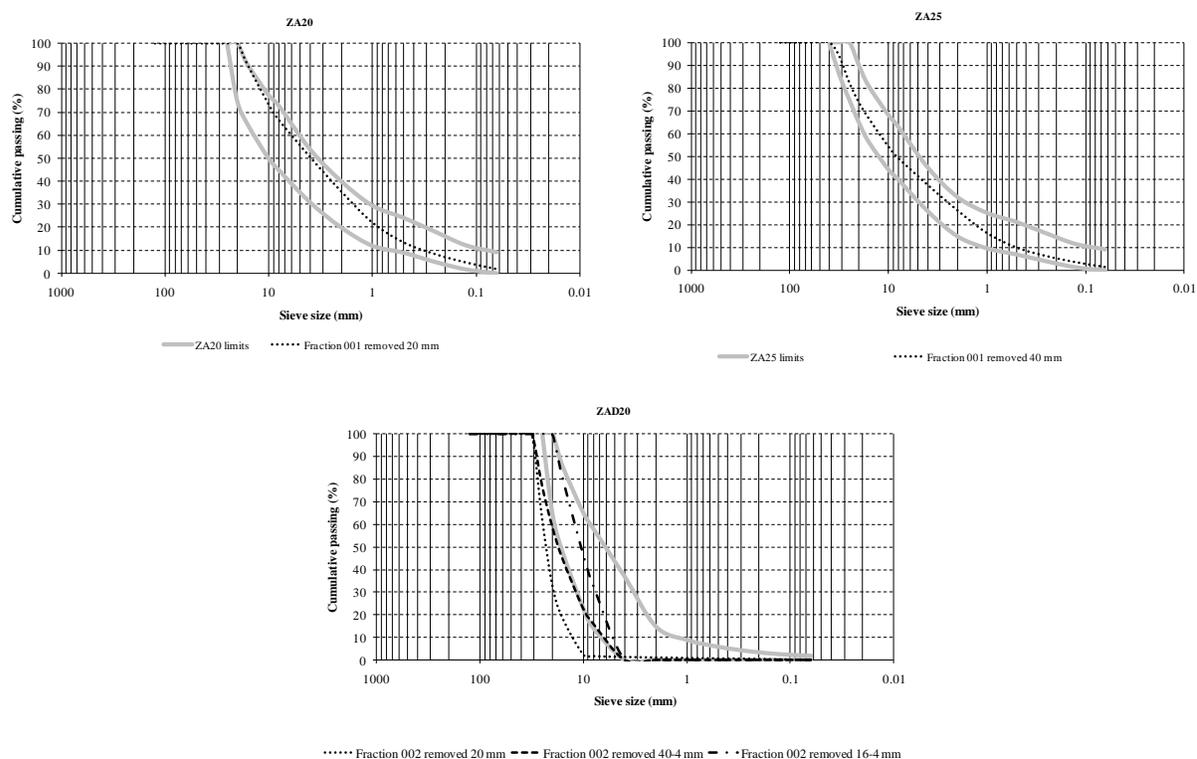


Figure 1. Particle size distribution adjustment of samples 001 and 002 for artificial graded aggregates

Regarding particle size, aggregates should have a maximum size of 20-25 mm for base layers and 25-40 mm for sub-base layers to avoid segregation during the execution of the road work. They should also show a continuous particle size distribution to obtain maximum compactness. Since the maximum sizes of the samples exceeded the limits established, none of the fractions studied fulfilled these requirements. The particle size distribution graphs of the four samples showed that fraction 001 was the sample that came closest to the limits established for ZA20 and ZA25. Nevertheless, a slight adjustment in coarse particle sizes would reduce the maximum particle size, and improve the characteristics of the fraction so as to better comply with particle size distribution requirements. In contrast, fraction 003 was the sample that best fit the limits established for ZAD20, though particle size adjustment would also be necessary to remove particles with larger sizes. Finally fractions 003 and 004 showed a poorer adjustment to particle size distribution requirements for all types of artificial road granular structural layers.

Figure 1 shows the adjustment that would be necessary to make the coarse aggregate fit the three requirements. In order to fulfill the requirements for the ZA20 application, it was found that all particles larger than 20mm should be removed from fraction 001. Similarly, for the ZA25 application, all particles larger than 40mm should be removed from fraction 001. Finally, for the ZAD20, particles larger than 16mm and smaller than 4mm should be removed from fraction 002.

PG-3 geometrical technical requirements for aggregates (i.e. sand equivalent, maximum size, cleanliness coefficient, particle shape, and percentage of crushed particles) ensure the stability of the granular layer as

well as the compactness and resistance to deformation of granular aggregates. On the one hand, the aggregates should be free of lumps of clay, loam, organic matter, or any other substance that could affect their durability. Consequently, limit values for sand equivalent and the cleanliness coefficient are stipulated in the PG-3. On the other hand, a high percentage of crushed particles and a low percentage of flakiness particles are also required. A high sand equivalent value (69.25 ± 9.75) and the absence of organic matter content ensure clean aggregates. Since the samples studied were produced in a recycling plant with an impact mill, the particles tended to break into small blocks without generating slabs. This meant that it was entirely composed of crushed particles. In consequence, all samples fulfilled the limits established for geometrical properties.

It was possible to conclude that the critical properties for using recycled aggregates as artificial granular structural layers were particle size distribution and sulfate content. It was found that particle size distribution adjustment in the production process of recycled aggregates at the plant could improve the particle size of samples, especially in the case of the larger fractions (001 and 002) (Figure 1). Furthermore, rubble segregation at the source or a manual selection process, before phase crushing at the treatment plant, could remove a high percentage of gypsum, associated with covering and decoration elements, from the original rubble.

3.3.2. On-site soil stabilization

Soil stabilization is defined as a process that improves a soil's resistance to deformation and durability, and decreases its susceptibility to water (7). This stabilization process can be mechanical (mixing soils of different types) or chemical (by adding substances such as lime and cement). Chemical stabilization is the most frequently used method (34). The technical requirements for stabilizing soils pertain to plasticity, organic matter content, and total soluble sulfates content are shown on Table 8.

Properties	Stabilization with lime			Stabilization with cement		
	S-EST1	S-EST2	S-EST3	S-EST1	S-EST2	S-EST3
Organic matter content (%)	< 2	< 1	< 1	< 2	< 1	< 1
Water-soluble sulfate content (%)	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Plasticity index	≥ 12	12-40	-	-	≥ 40	≥ 40
Liquid limit	-	-	-	≥ 15	≥ 15	≥ 15

Table 8. PG-3 technical requirements for aggregates used in soil stabilization (7)

The samples studied did not contain any organic matter. However, none of the fractions fulfilled the plasticity limits. All the samples were non-plastic, but the PG-3 establishes minimum values for the plasticity index and the liquid limit (see Table 8). The soluble sulfate content (1.52 ± 0.46) also exceeded the limit established (< 1%).

The particle grain-size limits established for soil stabilization with lime were not fulfilled in any cases. On the one hand, fractions 001 and 002 showed a percentage of particles passing # 80 mm below the 100% set. On the other hand, the percentage of particles passing # 0.063 mm was lower than the established limit (15%) for all the samples. However fractions 003 and 004 fulfilled the particle size distribution for the three types of soil (S-ST1, ST2 S-, S-EST3) in the case of cement-stabilized soil. Fractions 001 and 002 showed percentages of particles passing # 80 mm lower than the established limit (100%).

This indicated that the samples were not suitable to be used in stabilized soil since they showed unsatisfactory values for all properties except organic matter content.

3.3.3. Cement-soil and cement-bound gravel

Aggregate treated with cement is a homogeneous mixture in the right proportions of granular material, cement, water, and in some cases, additives in order to make the mineral skeleton of the soil more cohesive (7). The requirements define the following two types: soil-cement SC40 and SC20 and cement-bound gravel GC25 and GC20.

Article 513 of the PG-3 describes granular materials that can be used for such purposes specifying the applicability of recycled aggregates from construction waste and demolition. It also distinguishes two types of granular materials (7): fine aggregate and coarse-grained aggregate. Since the samples in this study were

classified as coarse-grained aggregate, only the limits for this type of fraction were analyzed. The technical requirements for soil-cement and cement-bound gravel pertain to particle size distribution, as well as to geometrical, physical-mechanical, and chemical properties (Table 9).

Properties		Cement-bound gravel	Soil-cement
Sand equivalent value	GC20	>40	-
	GC25	>35	-
Cleanliness. Percentage of clay lumps (%)	Coarse aggregate ¹	< 0.25	-
	Fine aggregate ²	< 1	-
Particle shape. Flakiness index	Roads	T00-T2 T3-T4	< 30 < 35
	Hard shoulders	In all cases	< 40
	Percentage of crushed particles (%)	Roads	T00-T1 T2
Hard shoulders		T00-T2	≥ 30
		T2-T4	≥ 50
Liquid limit		T00-T2	Non-plastic
	Rest of cases	< 25	
Plasticity limit	T00-T2	Non-plastic	< 15
	Rest of cases	< 6	
Resistance to fragmentation (LA)	Roads	T00-T2 T3-T4	≤ 30 ≤ 35
	Hard shoulders	In all cases	≤ 40
	Total sulfate content (%)		< 1
Organic matter content (%)		< 1	< 1

¹ Coarse-grained aggregate, defined as the portion of the total aggregate retained by the 4 mm sieve of UNE-EN 933-2 (25)

² Fine aggregate, defined as the portion of total aggregate passing by this sieve (7)

Table 9. PG-3 technical requirements for aggregates used in cement-bound gravel and soil-cement (7)

In relation to geometrical properties, coarse aggregates used in cement-bound gravel should fulfill the limit values for the sand equivalent index, cleanliness coefficient, particle shape, and percentage of crushed particles. In the case of soil-cement, the cleanliness coefficient limit value is included. A high sand equivalent value (69.25 ± 9.75) and the absence of organic matter ensure clean aggregates. Since the samples studied were produced in a recycling plant with an impact mill, particles tended to break into small blocks without generating slabs. This ensured that 100% of the particles were crushed particles. Consequently, all samples fulfilled the limits established for geometrical properties.

Values for the liquid limit and plasticity index were included for coarse aggregates or for cement-bound gravel and soil-cement. In the case of cement-bound gravel, a limit value for resistance to fragmentation was also included.

Finally total sulfate and organic matter content should be lower than 1% for cement-bound gravel and soil-cement. Although all the samples were characterized by an absence of organic matter, the high water-soluble sulfate content (1.52 ± 0.46) meant that the total sulfate content was higher than the limit in the original rubble. The particle-size distribution graphs of the four samples show that fraction 001 was the sample that best fit the limits established for SC40, GC25 and GC20, and that fraction 004 best fit the limits established for SC20. However a slight adjustment in coarse particle sizes would be necessary to improve the characteristics of fraction 001 in accordance with size distribution requirements. Fraction 001 would have been a good fit if SC40 sizes larger than 40 mm had been eliminated, although a defect in particle sizes between 4 and 16mm was detected. In the case of GC25, the removal of particles larger than 31.5 mm provided the best fit within

the established limits. Finally, in the case of GC20, the removal of particles larger than 16mm for fraction 001 would be necessary to fulfill technical requirements (see Figure 2).

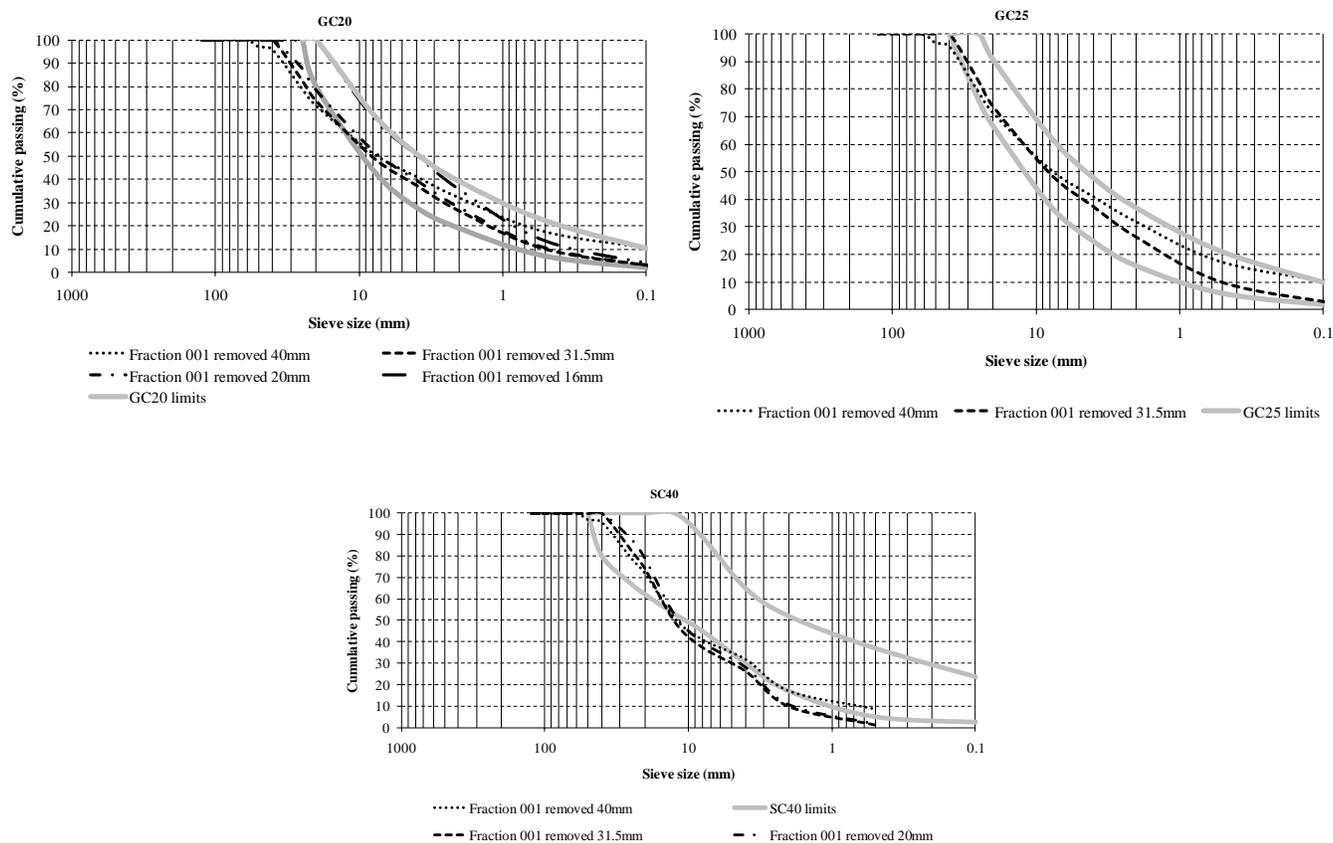


Figure 2. Particle size distribution adjustment of sample 001 cement soils and cement bound gravel

It was possible to conclude that the critical properties for using recycled aggregates as soil-cement and gravel-bound cement were particle size distribution and sulfate content. On the one hand, a particle size distribution adjustment in the production process of recycled aggregates in the plant could improve the particle size of samples, especially in the case of larger particles for fraction 001. On the other hand, the rubble segregation at the source or a manual selection process, before phase crushing in the plant, could remove a great percentage of gypsum associated with covering and decoration elements from the original rubble.

3.4. Characterization of materials for road surfaces

3.4.1. Prime coats and seal coats

A prime coat can be defined as the application of hydrocarbonate binder to a granular surface before an asphalt layer or surface course is spread over it (7). A seal coat is a thin asphaltic treatment on pavement layers treated with hydraulic conglomerate to make the surface impermeable.

The aggregate eventually used for prime coats and seal coats should be free of dust, dirt, clay lumps, vegetation, and other impurities. It should have a sand equivalent index higher than 40, and be non-plastic. In addition particles should be smaller than 4 mm, and the percentage of particles passing #0.063 mm should be lower than 15% (see Table 10).

Property	Prime coat	Seal coat
Percentage of particles passing #4 mm sieve	100	100
Percentage of particles passing #0.063 mm sieve	< 15	< 15
Plasticity	Non-plastic	Non-plastic
Sand equivalent value	>40	>40
Cleanliness	Absence of clay, marl, organic material and other foreign substances	

Table 10. PG-3 technical requirements for aggregates used in prime coats and seal coats (7)

Removing particles smaller than 4mm in fraction 004 would make it possible to obtain a fraction suitable for prime coats and seal coats, inasmuch as the maximum size would be smaller than 4mm and the percentage of particles smaller than 0.063mm would be 4.84%.

Since the materials studied were classified as coarse-grained aggregate, it would be necessary obtain a new fraction in the C&D waste plant with a more suitable particle size distribution. Regarding other features, the fine fraction of sample 004 had a sand equivalent index greater than 40 (69.25 ± 9.75) It was also non-plastic, and free of dust, dirt, clay lumps, and impurities. This indicated that reclassification of the fraction 004 in the plant would provide material suitable for prime coats and seal coats.

3.4.2. Concrete pavements

The PG-3 defines cement pavement as pavement composed of mass concrete slabs separated by transverse joints or by a continuous reinforced concrete slab, in both cases with longitudinal joints. It also defines vibrated lean concrete as the homogeneous mix of aggregates, cement, water, and additives used in base layers underlying concrete pavement. When it is applied at the road construction site, its consistency is such that internal vibrators are needed for its compaction (7). In this case, the regulations state that it is possible to use recycled aggregate.

Articles 550 and 551 of the PG-3 describe the granular materials that can be used for such purposes, and specify the applicability of recycled aggregates from construction waste and demolition. It also distinguishes two types of granular materials: fine aggregate and coarse aggregate. The technical requirements established for pavements made of concrete and vibrated lean concrete pertain to particle size distribution (including maximum particle size), geometrical properties (sand equivalent index and particle shape), and physical-mechanical properties (resistance to fragmentation) (Table 11).

Property	Concrete pavement		Vibrated lean concrete pavement	
	Coarse aggregate	Fine aggregate	Coarse aggregate	Fine aggregate
Sand equivalent value	-	>75 >80 frozen	>75	>75 >80 frozen
Maximum particle size	< 40 mm		< 40 mm	
Particles shape. Flakiness index	< 35		< 35	
Resistance to fragmentation (LA)	< 35		< 35	

Table 11. PG-3 technical requirements for aggregates used in concrete pavement PG-3 (7)

In relation to technical requirements for coarse aggregates, the maximum particle size of fractions 003 and 004 fulfilled the limit established for pavements made of concrete and vibrated lean concrete since they showed values of 16 and 8 mm, respectively. Fractions 001 and 002 showed values of 63 and 125 mm, which were higher than the limit (< 40 mm) in both cases. Since our samples, were produced in a recycling plant with an impact mill, this meant that particles tended to break into small blocks without generating slabs. This guaranteed that 100% of the particles were crushed particles. In consequence, all samples fulfilled the limits established for geometrical properties. Finally, the Los Angeles test showed mean values (29 ± 2) that were lower than the limit of 35 in both cases. This indicated that fractions 003 and 004 could be used in pavements

made of concrete and vibrated lean concrete. In the case of samples 001 and 002, maximum particle size of the recycled aggregates was not suitable although a particle sieve distribution adjustment in the production process of recycled aggregates in plant could improve this property.

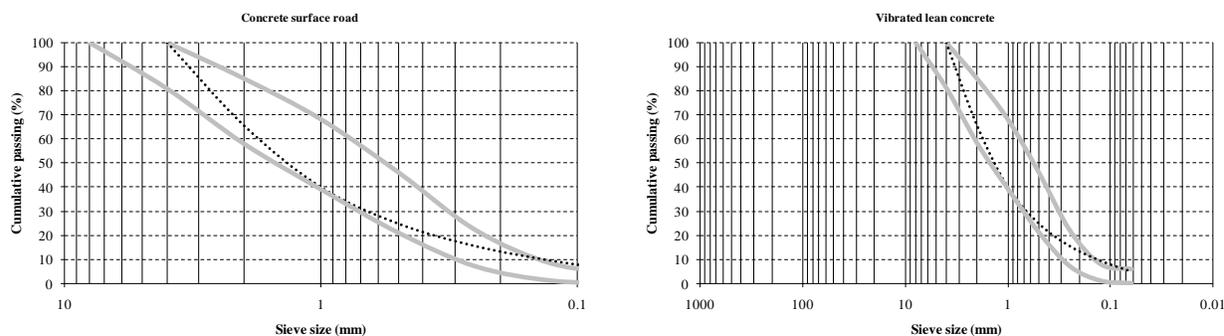


Figure 3. Particle size distribution adjustment of sample 004 for concrete pavements and vibrated lean concrete

In relation to the technical requirements for fine aggregates, only fraction 004 was considered since it corresponded to the definition of this type of aggregate. Its particle size distribution indicated that with a slight adjustment, a new fraction could be obtained at the C&D waste plant that would be more in consonance with the distribution established for this use (Figure 3). However, the most unsatisfactory property of this fraction was the sand equivalent index, whose value was lower (69.25 ± 9.75) than the limits established for fine aggregates in pavements made of concrete and vibrated lean concrete. It was thus possible to conclude that sample 004 could not be used for this purpose.

Conclusions

1. This research studies the use of recycled aggregates from a C&D waste treatment plant located in the province of Granada (Spain), in road construction. Although this is one specific case, the results obtained were similar to those from other studies. Thus, the conclusions drawn can be extrapolated to aggregates presenting similar characteristics.
2. Although there are various studies on the use of recycled aggregates in road construction, these are mainly limited to low-level applications, such as the construction of sub-base layers and unpaved rural roads. Therefore, the suitability of recycled aggregates in other applications as listed in the Spanish General Technical Specifications for Roads and Bridge Works (PG-3) has been analyzed.
3. The mixed recycled aggregate fractions, analyzed according to the PG-3, presented similar geometric, physical-mechanical, and chemical properties, to those aggregates studied in previous research studies. However, these materials characterized as Tolerable Soils, did not fulfill all the PG-3 requirements for road construction, especially in relation to their particle-size distribution and sulfate content.
4. The Spanish standard recommends the use of recycled aggregates in road layer, cement-bound gravel, and lean concrete pavement. However, recycled aggregates could be apt for further road construction applications, such as prime coats, seal coats, soil-cement, and roadbeds, by modifying the manufacturing process in order to adjust the particle-size distribution and by removing the gypsum waste before the crushing process at the plant. Furthermore, on-site sorting of gypsum waste

during construction or demolition processes will contribute to a higher quality of the recycled aggregates.

5. The use of recycled aggregates from C&D waste is of particular interest in order to provide a viable solution to the environmental problems derived from waste disposal. Using recycled aggregates also help to safeguard natural resources, reduces construction cost and increases the supply of sand and gravel.

Acknowledgements

This research would not have been possible without the assistance of staff working at the C&D waste treatment center in Vélez de Benaudalla (Granada, Spain), FCC S.L, and RESUR (*Consortio Provincial de Residuos Urbanos de Granada*). Funding for this study was also received from the research group, *Approximate Reasoning and Artificial Intelligence* (ARAI-TIC 111), the *Department of Building Construction* at the University of Granada and the Innovation and Science Division of the Andalusian Regional Government (research project TIC-02913)

References

- (1) Del Río Merino, M., Izquierdo García, P., Salto Weis Azevedo, I.: "Sustainable construction: construction and demolition waste reconsidered". *Waste management & research*, Vol. 28 (2010), pp. 118-129. doi:10.1177/0734242X09103841.
- (2) Morán del Pozo, J.M., Juan Valdés, A.J., Aguado, P.J., Guerra, M.I., Medina, C.: "State of the art on construction and demolition wastes management: Limitations" | [Estado actual de la gestión de residuos de construcción y demolición: Limitaciones]. *Informes de la Construcción*, Vol. 63 n°521 (2011), pp. 89-95. doi: 10.3989/ic.09.038.
- (3) Solís-Guzmán, J., Marreno, M., Montes-Delgado, M.V., Ramírez-de-Arellano, A.: "A Spanish model for quantification and management of construction waste". *Waste Management*, Vol. 29 (2009), pp. 2542-2548. doi:10.1016/j.wasman.2009.05.009.
- (4) Esin, T., Cosgun, N.: "A study conducted to reduce construction waste generation in Turkey". *Building and Environment*, Vol. 42 (2007), pp. 1667-1674. doi:10.1016/j.buildenv.2006.11.011.
- (8) Debieb, F., Courard, L., Kenai, S., Degeimbre, R.: "Roller compacted concrete with contaminated recycled aggregates". *Construction and Building Materials*, Vol. 23 (2009), pp. 3382-3387. doi:10.1016/j.conbuildmat.2009.06.031.
- (9) Olorunsogo, F.T., Padayachee, N.: "Performance of recycled aggregate concrete monitored by durability indexes". *Cement and Concrete Research*, Vol. 32 (2002), pp.179-185. doi:10.1016/S0008-8846(01)00653-6.
- (10) Corinaldesi, V., Moriconi, G.: "Behaviour of cementitious mortars containing different kinds of recycled aggregate". *Construction and Building Materials*, Vol. 23 n°1 (2009), pp. 289-294. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.12.006.
- (11) Corinaldesi, V.: "Mechanical behavior of masonry assemblages manufactured with recycled-aggregate mortars". *Cement and Concrete Composites*, Vol. 31 (2009), pp. 505-510. doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.05.003.
- (12) González-Fonteboá, B., Martínez-Abella, F.: "Concretes with aggregates from demolition waste and silica fume. Materials and mechanical properties". *Building and Environment*, Vol. 43 (2008), pp. 429-437. doi:10.1016/j.buildenv.2007.01.008.
- (13) Rahal, K.: "Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate". *Building and Environment*, Vol. 42 (2007), pp. 407-415. doi:10.1016/j.buildenv.2005.07.033.
- (14) Mas, B., Cladera, A., del Olmo, T., Pitarch, F.: "Influence of the amount of mixed recycled aggregates on the properties of concrete for non-structural use". *Construction and Building Materials*, Vol. 27 n°1 (2012), pp. 612-622. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.06.073.
- (15) Soutsos, M.N., Tang, K., Millard, S.G.: "Use of recycled demolition aggregate in precast products, phase II: Concrete paving blocks". *Construction and Building Materials*, Vol. 25 n°7 (2011), pp. 3131-3143. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.12.024.
- (16) Jiménez, J.R., Ayuso, J., Agrela, F., López, M., Pérez Galvín, A.: "Utilisation of unbound recycled aggregates from selected CDW in unpaved rural Roads". *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 58 (2012), pp. 88-97. doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.10.012.

- (17) Agrela, F., Barbudo, A., Ramírez, A., Ayuso, J., Carvajal, M.D., Jiménez, J.R.: “Construction of road sections using mixed recycled aggregates treated with cement in Malaga, Spain”. *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 58 (2012), pp. 98-106. doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.11.003.
- (18) Vegas, I., Ibañez, J.A., Lisbona, A., Sáez de Cortazar, A., Frías, M.: “Pre-normative research on the use of mixed recycled aggregates in unbound road sections”. *Construction and Building Materials*, Vol. 25 (2011), pp. 2674-2682. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.12.018.
- (19) Melbouci, B.: “Compaction and shearing behaviour study of recycled aggregates”. *Construction and Building Materials*, Vol. 23 (2009), pp. 2723-2730. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.03.004.
- (20) Pérez, I., Pasandín, A.R., Gallego, J.: “Stripping in hot mix asphalt produced by aggregates from construction and demolition waste”. *Waste Management & Research*, Vol. 30 n° 1 (2012), pp. 3-11. doi: 10.1177/0734242X10375747.
- (21) Chen, M.Z., Lin, J.T., Wua, S.P., Liu, C.H.: “Utilization of recycled brick powder as alternative filler in asphalt mixture”. *Construction and Building Materials*, Vol. 25 (2011), pp. 1532-1536. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.08.005.
- (5) Van Gerven, T., Geysen, D., Stoffels, L., Jaspers, M., Wauters, G., Vandecasteele, C.: “Management of incinerator residuos in Flanders (Belgium) and in neighbouring countries. A comparison”. *Waste Management*, Vol. 25 (2005), pp. 75-87. doi:10.1016/j.wasman.2004.09.002.
- (6) Vegas, I., Ibañez, J.A., San José, J.T., Urzelai, A.: “Construction demolition wastes, Waelz slag and MSWI bottom ash: a comparative technical analysis as material for road construction”. *Waste Management*, Vol. 28 (2008), pp. 565-574. doi:10.1016/j.wasman.2007.01.016.
- (7) Ministry of Public Works. Order/FOM/891. Amendments of specific articles of the General Technical Specifications in Road Construction (PG-3) [Enmiendas de los artículos específicos del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras (PG-3)]. Madrid, Spain, 2004.
- (22) Spanish standard UNE-EN 932-1. Test for general properties of aggregates. Part 1: Methods for sampling. [Ensayos para determinar las propiedades generales de los áridos. Parte 1: Métodos de muestreo]. AENOR, Madrid, Spain, 1997.
- (23) Spanish standard UNE-EN 932-2. Test for general properties of aggregates. Part 2. Methods for reducing laboratory samples. [Ensayos para determinar las propiedades generales de los áridos. Parte 2: Método para la reducción de muestras de laboratorio]. AENOR, Madrid, Spain, 1999.
- (24) Spanish standard UNE-EN 933-1/A1. Test of geometrical properties of aggregates. Part 1: Determination of particle size distribution. Sieving method. [Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 1: Determinación de la granulometría de las partículas. Métodos de tamizado]. AENOR, Madrid, Spain, 2006.
- (25) Spanish standard UNE-EN 933-2/1M. Test of geometrical properties of aggregates. Part 2: Determination of particle size distribution. Test sieves, nominal size of apertures. [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, Madrid, Spain, 1999.
- (26) Spanish standard UNE-EN 933-8. Test of geometrical properties of aggregates. Part 8: Assessment of fines. Sand equivalent test. [Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 8: Evaluación de los finos. Ensayo de equivalente de arena]. AENOR, Madrid, Spain, 1999.
- (27) Spanish standard UNE-EN 1097-2. Test for mechanical and physical properties of aggregates. Part 2: Methods for the determination of resistance to fragmentation. [Ensayos para determinar las propiedades físicas y mecánicas de los áridos. Parte 2: Método para la determinación de la resistencia a la fragmentación]. AENOR, Madrid, Spain, 1999.
- (28) Spanish standard UNE-EN 103103. Determination of the liquid limit of a soil by the Casagrande apparatus method. [Determinación del límite líquido de un suelo por el método del aparato de Casagrande]. AENOR, Madrid, Spain, 1994.
- (29) Spanish standard UNE-EN 103104. Test for plastic limit of a soil. [Determinación del límite plástico de un suelo]. AENOR, Madrid, Spain, 1993.
- (30) Spanish standard UNE-EN 103502. Test laboratory method for determining in a soil the CBR index. [Método de ensayo para la determinación en laboratorio del índice CBR de un suelo]. AENOR, Madrid, Spain, 1995.
- (31) Spanish standard UNE-EN 1744-1. Test for chemical properties of aggregates. Part 1: Chemical analysis. [Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos. Parte 1: análisis químico]. AENOR, Madrid, Spain, 2010.

- (32) Tam, V.W.Y., Wang, K., Tam, C.M.L.: "Assessing relationship: among properties of demolished concrete, recycled aggregate and recycled aggregate concrete using regression analysis". *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 152 (2008), pp. 703-714. doi:10.1016/j.jhazmat.2007.07.061.
- (33) Poon, C.S., Chan, D.: "Feasible use of recycled concrete aggregates and crushed clay brick as unbound road sub-base". *Construction and Building Materials*, Vol. 20 (2006), pp. 578-585. doi:10.1016/j.conbuildmat.2005.01.045.
- (34) Kraemer, C., Pardillo, J.M., Rocci, S., Romana, M.G., Sánchez Blanco, V., Del Val, M.A. *Road engineering*. Volume 2. [Ingeniería de carreteras, volumen 2]. McGraw Hill, Madrid, Spain, 2004.
- (35) Park, T.: "Application of construction and building debris as base and subbase materials in rigid pavement". *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 129 (2003), pp. 558-563.
- (36) Tu, T-Y., Chen, Y-Y., Hwang, C-L.: "Properties of HPC with recycled aggregates". *Cement and Concrete Research*, Vol. 36 (2006), pp. 943-950. doi:10.1016/j.cemconres.2005.11.022.
- (37) Nataatmadja, A., Tan, Y.L.: "Resilient response of recycled concrete road aggregates". *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 127 n°5 (2001), pp. 450-453.
- (38) Tabsh, S.W., Abdelfatah, A.S.: "Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete". *Construction and Building Materials*, Vol. 23 (2009), pp. 1163-1167. doi:10.1016/j.conbuildmat.2008.06.007.
- (39) Chini, A.R., Kuo, S-S., Armaghani, J.M., Duxbury, J.P.: "Test of recycled concrete aggregate in accelerated test track". *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 127 (2001), pp. 486-492.
- (40) Hansen, T.C., Narud, H.: "Strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate". *Concrete International: Design and Construction*, Vol. 5 (1983), pp. 79-83.
- (41) Sri Ravindrarajah, R., Loo, Y.H., Tam, C.T.: "Recycled concrete as fine and coarse aggregates in concrete". *Magazine of Concrete Resources*, Vol. 39 (1987), pp. 214-220.

8. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

8.1. Conclusiones

Los resultados de la investigación desarrollada y que ha quedado expresada en el presente documento de Tesis Doctoral han llevado a establecer las siguientes conclusiones finales.

En relación a las especificaciones de los áridos reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición, se puede asegurar que son materiales granulares que presentan una amplia dispersión en las características que los definen, y aunque la mayoría de ellas se presentan dentro de los rangos de cumplimiento que establece la normativa, los valores de absorción de agua, el mortero adherido, los compuestos de azufre y otras impurezas, son los parámetros que fundamentalmente determinan que su calidad sea significativamente inferior a la del árido natural. A pesar de ello, no existe ningún estudio que no recomiende su uso o incluso que lo impida.

Se ha constatado que la mayoría de las deficiencias que presentan los áridos reciclados se pueden corregir mediante intervenciones bien previas a la fabricación del árido reciclado: mejorando los procesos de selección y demolición; bien durante la fabricación del árido reciclado: mejorando los procesos de recepción, limpieza, trituración y cribado del residuo que entra en planta; e incluso antes de su utilización: con ajustes granulométricos mezclándolos con diferentes fracciones que conduzcan su comportamiento dentro de los parámetros admisibles.

En relación a la normativa técnica aplicable a los áridos reciclados, se ha podido constatar que existe una amplia documentación al respecto, sin embargo, en la mayoría de ella no se establecen las posibles aplicaciones según el nivel de exigencia requerido. Así mismo, se ha comprobado que no responde a criterios de uniformidad ni en cuanto al establecimiento de los requisitos que deben cumplir, ni en lo referente a las limitaciones impuestas a los áridos reciclados.

En este sentido, consideramos que la normativa técnica no fomenta el uso del árido reciclado, por lo que se hace necesario, y es de máxima prioridad que los organismos públicos y privados que participan en los procesos de normalización, elaboren las especificaciones técnicas armonizadas que justifiquen el control de calidad de los productos granulares reciclados, que presentan una amplia variabilidad en sus características, garantizando además el cumplimiento de las propiedades exigidas según el tipo de material granular y el grado de exigencia, ajustando los límites impuestos a las prescripciones en función de las diferentes aplicaciones indicadas.

En relación a los estudios consultados, se ha podido constatar que existe una gran cantidad de estudios sobre las características que presentan los áridos reciclados, así como a cerca de su aplicación, fundamentalmente en la elaboración de hormigón estructural y en obras de carreteras, en los que se indica la viabilidad de uso de estos materiales granulares a pesar de presentar una menor calidad, contrastada por la gran dispersión en los resultados y el contundente incumplimiento de algunas de las prescripciones establecidas en la normativa vigente. Mientras tanto, apenas se ha estudiado su utilización en aplicaciones de menor grado de exigencia, donde las deficiencias en cuanto a la calidad que presenta el árido reciclado y su influencia prestacional en los productos elaborados, no sean tan relevantes.

En este sentido se ha estudiado la posibilidad de utilización de los áridos reciclados en aplicaciones menos exigentes, donde la completa incorporación de la fracción arena, el mortero adherido, la presencia de yeso y de otras impurezas, no ha tenido una alta repercusión en el comportamiento final del producto elaborado.

En relación a los prefabricados de hormigón no estructural elaborados mediante la técnica de vibrocompactación, con sustitución parcial y total de la fracción 0/8mm del árido natural por árido reciclado, se ha podido constatar que se pueden conseguir piezas huecas que ofrezcan unos requisitos prestacionales garantes de la completa funcionalidad de las mismas según lo especificado en su propia regulación. En este sentido, durante el trabajo experimental desarrollado con las piezas prefabricadas, con motivo de establecer su idoneidad en base a lo establecido en la normativa, no se ha mostrado ningún parámetro físico, mecánico o de durabilidad que justifique la prohibición de utilizar estos materiales granulares en este tipo de elementos prefabricados.

Desde el punto de vista empresarial, encontramos que la prefabricación de piezas de hormigón no estructural con la incorporación de árido reciclado es una actividad que se puede incorporar en cualquier empresa manufacturera que se dedique a la elaboración de prefabricados sin la necesidad de modificar su sistema de producción. A pesar de que el momento coyuntural no es el más apropiado para las empresas y que existe poca concienciación medioambiental en la utilización de productos reciclados, la sustitución del árido natural por árido reciclado no sólo no incrementa el coste de las piezas prefabricadas en el mercado, sino que supone un valor añadido a un producto que, además de su menor peso, consigue aumentar el ciclo de vida de los materiales empleados en su fabricación, contribuyendo a la sostenibilidad del sector de la construcción.

Finalmente, concluimos que con el trabajo de investigación iniciado en esta Memoria de Tesis Doctoral, resulta prioritario proporcionar un nuevo enfoque en el uso de los materiales granulares reciclados que actualmente se producen en las plantas de tratamiento españolas, de manera que se derive su empleo hacia aplicaciones estandarizadas de una exigencia prestacional no estructural, permitiendo el uso de un producto que hasta ahora se ha considerado como material de rechazo en las

plantas de tratamiento, y cuyo destino final ha sido prácticamente su traslado a vertedero. En consecuencia, se obtendrían productos con la rentabilidad técnica y económica garantizada, además de respetuosos con el medioambiente, evitando la aplicación de tratamientos demasiado rigurosos, que encarecerían considerablemente el producto final reciclado.

8.2. Futuras líneas de investigación

A modo de líneas de investigación a desarrollar en el futuro, se presentan aquellos aspectos que no han podido ser abarcados en la presente Memoria de Tesis Doctoral y que serán abordados en futuras investigaciones.

En primer lugar, sería necesario estudiar el comportamiento de los bloques y bovedillas de hormigón reciclado con diferentes porcentajes de sustitución de los áridos empleado, para determinar con mayor determinación su influencia en las características de las piezas ejecutadas y conseguir un abanico de resultados mayor que puedan contribuir a establecer con mayor rigor los usos posibles de estos materiales reciclados y a delimitar los rangos de exigencia en función de la aplicación.

Así mismo, resultaría interesante la ejecución de tramos de prueba reales con la finalidad de evaluar el comportamiento a largo plazo de los elementos arquitectónicos construido con las piezas prefabricadas recicladas.

Finalmente, se podría considerar la aplicación de herramientas poco convencionales en el campo del estudio técnico de los productos de construcción en combinación con las tradicionales, al objeto de evaluar el comportamiento físico, mecánico y químico de los productos reciclados, desde otra perspectiva. En este sentido, resultaría de interés comprobar el comportamiento frente a fluidos.

Durante el transcurso de la investigación presentada en este documento han ido surgiendo otras líneas de trabajo, en cuyas propuestas entendemos que se puede considerar el empleo de la fracción arena reciclada, sin que por ello se vean comprometidas las capacidades físicas, mecánicas y la durabilidad de los productos que se elaboren con ella.

1. El estudio del comportamiento de los bordillos elaborados con sustituciones parciales y total de árido reciclado, según lo especificado en las correspondientes normas UNE-EN 1340, y su complemento español UNE 127340, que no se han podido abarcar en este estudio.
2. El estudio del comportamiento los adoquines para pavimentos, según lo especificado en la UNE- EN 1338, cuyo sistema de fabricación es diferente al

de las piezas anteriores y que no se han podido realizar por no disponer del equipo necesario.

3. El estudio del comportamiento de otro tipo de prefabricados, como los elaborados para su empleo en mobiliario urbano, según la norma UNE-EN 13198.
4. El estudio del comportamiento de morteros de albañilería otros productos de construcción de media o baja capacidad resistente

Como complemento a cualquiera de los estudios experimentales propuestos, resulta prioritario el estudio del análisis del ciclo de vida (ACV) de los productos prefabricados cuya aptitud ha sido desarrollada en el presente documento, fundamentalmente, al objeto de cuantificar el beneficio medioambiental que se presume con el empleo de materiales reciclados.

REFERENCIAS

- AASHTO M 145-91, 2000. AASHTO M 145-91. Classification of Soil-Aggregate Mixtures For Highway Construction Purposes.
- AASHTO M 57-80, 1964. AASHTO M 57-80. Standard Specification for Materials for Embankments and Subgrades.
- AGRELA, F., BARBUDO, A., RAMÍREZ, A., AYUSO, J., CARVAJAL, M.D. and 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.
- AGRELA, F., SÁNCHEZ DE JUAN, M., AYUSO, J., GERALDES, V.L. and 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.
- AGUILO ALONSO, M. and FERNÁNDEZ ORDÓÑEZ, J.A., 1974. Prefabricación: teoría y práctica. Barcelona: Editores Técnicos Asociados.
- AJDUKIEWICZ, A. and KLISZCZEWICZ, A., 2002. Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC. *Cement and Concrete Composites*, 24(2), pp. 269-279.
- AKBARNEZHAD, A., ONG, K.C.G., ZHANG, M.H., TAM, C.T. and FOO, T.W.J., 2011. Microwave-assisted beneficiation of recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, 25(8), pp. 3469-3479.
- ALAEJOS, P. and SÁNCHEZ DE JUAN, M., 2004. Utilization of recycled concrete aggregate for structural concrete. International RILEM Conference on the Use of Recycled Materials in Buildings and Structures. 8-11 november, Barcelona, Spain.
- ALDEA, C., YOUNG, F., WANG, K. and SHAH, S.P., 2000. Effects of curing conditions on properties of concrete using slag replacement. *Cement and Concrete Research*, 30(3), pp. 465-472.
- ALYAMAÇ, K.E. and INCE, R., 2009. A preliminary concrete mix design for SCC with marble powders. *Construction and Building Materials*, 23(3), pp. 1201-1210.
- AMNON, K., 2003. Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete. *Cement and Concrete Research*, 33(5), pp. 703-711.
- ANGULO, S., ULSEN, C., CARRIJO, P., SILVA, R., JOHN, V. and KAHN, H., 2004. Characterization of brazilian construction and demolition waste coarse recycled aggregate. Brazil: RILEM Publications SARL.
- ANGULO, S.C., CARRIJO, P.M., FIGUEIREDO, A.D., CHAVES, A.P. and 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.
- ANGULO, S.C. and MUELLER, A., 2009. Determination of construction and demolition recycled aggregates composition, in considering their heterogeneity. *Materials and Structures*, 42, pp. 739-748.
- ANN, K.Y., MOON, H.Y., KIM, Y.B. and RYOU, J., 2008. Durability of recycled aggregate concrete using pozzolanic materials. *Waste Management*, 28(6), pp. 993-999.
- ARABANI, M. and AZARHOOSH, A.R., 2012. The effect of recycled concrete aggregate and steel slag on the dynamic properties of asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 35, pp. 1-7.
- ASOCIACIÓN CIENTÍFICO TÉCNICA DEL HORMIGÓN ESTRUCTURAL, 2006. Asociación Científico Técnica del Hormigón Estructural. Comisión 2, Grupo de Trabajo 2/5. Utilización de árido reciclado para la fabricación de hormigón estructural. Madrid: Ache.
- ASTM C 33/C 33M-11, 2011. ASTM C 33/C 33-11. Standard Specification for Concrete Aggregates. ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA, 19428-2959 USA.
- ASTM C 1646-C 1646M-08a, 2008. ASTM C 1646-C 1646M-08a. Standard Practice for Making and Curing Test Specimens for Evaluating Resistance of Coarse Aggregate to Freezing and Thawing in Air-Entrained Concrete. ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA, 19428-2959 USA.
- ASTM D 5080-08, 2008. ASTM D 5080-08. Standard Test Method for Rapid Determination of Percent Compaction. ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA, 19428-2959 USA.
- ASTM D 2487-11, 2011. ASTM D 2487-11. Standard practice for classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System). ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA, 19428-2959 USA.
- ATIŞ, C.D., 2003. Accelerated carbonation and testing of concrete made with fly ash. *Construction and Building Materials*, 17(3), pp. 147-152.
- AY, N. and ÜNAL, M., 2000. The use of waste ceramic tile in cement production. *Cement and Concrete Research*, 30(3), pp. 497-499.
- BAIRAGI, N.K., RAVANDE, K. and PAREEK, V.K., 1993. Behaviour of concrete with different proportions of natural and recycled aggregates. *Resources, Conservation and Recycling*, 9(1-2), pp. 109-126.
- BARBUDO, A., 2012. Aplicaciones de los áridos reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición en la construcción de infraestructuras viarias. Tesis Doctoral. Departamento de Ingeniería Rural de la Universidad de Córdoba.

- BARBUDO, A., AGRELA, F., AYUSO, J., JIMÉNEZ, J.R. and 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.
- BARBUDO, A., GALVÍN, A.P., AGRELA, F., AYUSO, J. and 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.
- BARRA DE OLIVEIRA, M. and VAZQUEZ, 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.
- BELMONTE SÁNCHEZ, A.F., 2009. Análisis de la reutilización de residuos procedentes de la industria del SILESTONE en la fabricación de mezclas bituminosas, Departamento de Ingeniería Civil. Universidad de Granada.
- BENTUR, A., IGARASHI, S. and KOVLER, K., 2001. Prevention of autogenous shrinkage in high-strength concrete by internal curing using wet lightweight aggregates. *Cement and Concrete Research*, 31(11), pp. 1587-1591.
- BERGSDAL H., BOHNE, R.A. and BRATTEBO, H., 2007. Projection of construction and demolition waste in Norway. *Journal of Industrial Ecology*, 11 (3), pp. 27-39.
- BERNDT, M.L., 2009. Properties of sustainable concrete containing fly ash, slag and recycled concrete aggregate. *Construction and Building Materials*, 23(7), pp. 2606-2613.
- BIJEN, J., 1996. Benefits of slag and fly ash. *Construction and Building Materials*, 10(5), pp. 309-314.
- BILGIN, N., YEPREM, H.A., ARSLAN, S., BILGIN, A., GÜNAY, E. and MARŞOĞLU, M., 2012. Use of waste marble powder in brick industry. *Construction and Building Materials*, 29(0), pp. 449-457.
- BINICI, H., SHAH, T., AKSOGAN, O. and KAPLAN, H., 2008. Durability of concrete made with granite and marble as recycle aggregates. *Journal of Materials Processing Technology*, 208(1-3), pp. 299-308.
- BLENGINI, G.A. and GARBARINO, E., 2010. Resources and waste management in Turin (Italy): the role of recycled aggregates in the sustainable supply mix. *Journal of Cleaner Production*, 18(10-11), pp. 1021-1030.
- BLUMENTHAL, K., 2011. Informe Eurostat 31/2011. Generation and treatment of municipal waste.
- BOSSINK B. A. G. and BROUWERS, H.J.H., 1996. Construction Waste: Quantification and Source Evaluation. 122 (1), pp. 55-60.
- BRECCOLOTTI, M. and MATERAZZI, A.L., 2010. Structural reliability of eccentrically-loaded sections in RC columns made of recycled aggregate concrete. *Engineering Structures*, 32(11), pp. 3704-3712.

- BRECCOLOTTI, M. and MATERAZZI, A.L., 2010. Structural reliability of eccentrically-loaded sections in RC columns made of recycled aggregate concrete. *Engineering Structures*, 32(11), pp. 3704-3712.
- BS 8500-2:2006, 2006. Concrete. Complementary British Standard to BS EN 206-1. Specification for constituent materials and concrete.
- BUSTARVIEJO RODRÍGUEZ, F., 1994. El bloque prefabricado de alta calidad y sus aplicaciones. *CEMENTO-HORMIGÓN*(Nº 735), pp. 879-896.
- BUSTILLO REVUELTA, M., 2008. Hormigones y morteros. Madrid: Fuego.
- CABRAL, A.E.B., SCHALCH, V., MOLIN, D.C.C.D. and RIBEIRO, J.L.D., 2010. Mechanical properties modeling of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 24(4), pp. 421-430.
- CACHIM, P.B., 2009. Mechanical properties of brick aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 23(3), pp. 1292-1297.
- CALVO PÉREZ, B., PARRA Y ALFARO, J.L., ASTUDILLO, B., SANABRIA, C.M. and CARRETÓN, R., 2002. Áridos reciclados para hormigones y morteros. Caracterización mineralógica y química. Madrid: Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas de Madrid, LOEMCO, Laboratorio Oficial para el Ensayo de Materiales de Construcción.
- CASUCCIO, M., TORRIJOS, M.C., GIACCIOO, G., and ZERBINO, R., 2008. Failure mechanism of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 22(7), pp. 1500-1506.
- CHAKRADHARA RAO, M., BHATTACHARYYA, S.K. and BARAI, S.V., 2011. Behaviour of recycled aggregate concrete under drop weight impact load. *Construction and Building Materials*, 25(1), pp. 69-80.
- CHANDRAKANTHI M., HETTIARATCHI, P., PRADO, B. and RUWANPURA, J., 2002. Optimization of the waste management for construction projects using simulation. *Winter Simulation Conference Proceedings 2*, pp. 1771-1777.
- CHEN, H., YEN, T. and CHEN, K., 2003. Use of building rubbles as recycled aggregates. *Cement and Concrete Research*, 33(1), pp. 125-132.
- COCHRAN K., TOWNSEND, T., REINHART, D. and HECK, H., 2007. Estimation of regional buildingrelated C&D debris generation and composition: case study for Florida, US. 27, pp. 921-931.
- COLLINS, R.J., 1998. BRE Digest 433: Recycled Aggregates. Building Research Establishment, Taylor & Francis Group.
- COLLINS, R.J., 1997. Upgrading the use of recycled material—UK demonstration project. *Studies in Environmental Science*, Volume 71, pp. 185-191.
- COLLINS, R.J. and ATKINSON, C.J., 1994. Specifications and the use of wastes in construction in the United Kingdom. *Studies in Environmental Science*, Volume 60, pp. 687-698.

- COLLINS, R., 2003. Recycled concrete. In: JOHN NEWMAN, BAN SENG CHOO and BAN SENG CHOO, eds, *Advanced Concrete Technology Set*. Oxford: Butterworth-Heinemann, pp. 1-13.
- COMITÉ EURO INTERNACIONAL DEL HORMIGÓN, GARCÍA MESEGUER, A., AGUADO DE CEA, A., COLEGIO DE INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS DE MADRID, FEDERACIÓN INTERNACIONAL DEL PRETENSADO, ASOCIACIÓN TÉCNICA ESPAÑOLA DEL PRETENSADO and GRUPO ESPAÑOL DEL HORMIGÓN, 1995. Código modelo CEB-FIP 1990 para hormigón estructural. Madrid: Colegio de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos.
- CORINALDESI, V., GIUGGIOLINI, M. and MORICONI, G., 2002. Use of rubble from building demolition in mortars. *Waste Management*, 22(8), pp. 893-899.
- CORINALDESI, V. and MORICONI, G., 2011. The role of industrial by-products in self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 25(8), pp. 3181-3186.
- CORINALDESI, V., 2010. Mechanical and elastic behaviour of concretes made of recycled-concrete coarse aggregates. *Construction and Building Materials*, 24(9), pp. 1616-1620.
- CORINALDESI, V., 2009. Mechanical behavior of masonry assemblages manufactured with recycled-aggregate mortars. *Cement and Concrete Composites*, 31(7), pp. 505-510.
- CORINALDESI, V., LETELIER, V. and MORICONI, G., 2011. Behaviour of beam-column joints made of recycled-aggregate concrete under cyclic loading. *Construction and Building Materials*, 25(4), pp. 1877-1882.
- CORINALDESI, V. and MORICONI, G., 2010. Recycling of rubble from building demolition for low-shrinkage concretes. *Waste Management*, 30(4), pp. 655-659.
- CORINALDESI, V. and MORICONI, G., 2009. Behaviour of cementitious mortars containing different kinds of recycled aggregate. *Construction and Building Materials*, 23(1), pp. 289-294.
- CORINALDESI, V. and MORICONI, G., 2009. Influence of mineral additions on the performance of 100% recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 23(8), pp. 2869-2876.
- CORINALDESI, V., MORICONI, G. and NAIK, T.R., 2010. Characterization of marble powder for its use in mortar and concrete. *Construction and Building Materials*, 24(1), pp. 113-117.
- CORRES PEIRETTI, H., 1997. Manual para el proyecto y construcción de estructuras con bloques de hormigón. Madrid: Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones.
- CRIC, 2004. TRA 550 – Toepassingsreglement Beton, versie 2.1.
- CUR, 1994. Metselwerkpuingranulaat als Toeslagsmateriaal vor Beton. Masonry rubble granulates as aggregate material for concrete. Aanbeveling 5, CUR-VB, Holland (in Dutch).

- CUR, 1986. Betonpuingranulaaten Metselwerkpuins Granullat alls Toeslagmeterial van Beton. Concrete debris and masonry rubble granulates as aggregate material for concrete . Rapport 125, CUR, Holland (in Dutch).
- CUR, 1984. Betonpuingranulaaten als Toeslagsmateriaal vor Beton. Concrete debris granulates as aggregate material for concrete. Aanbeveling 4, CUR-VB, Holland (in Dutch).
- DAPENA, E., ALAEJOS, P., LOBET, A. and PÉREZ, D., 2011. Effect of recycled sand content on characteristics of mortars and concretes. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23, pp. 414-422.
- DE BRITO, J., PEREIRA, A.S. and CORREIA, J.R., 2005. Mechanical behaviour of non-structural concrete made with recycled ceramic aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 27(4), pp. 429-433.
- DEBIEB, F., COURARD, L., KENAI, S. and DEGEIMBRE, R., 2010. Mechanical and durability properties of concrete using contaminated recycled aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 32(6), pp. 421-426.
- DEBIEB, F., COURARD, L., KENAI, S. and DEGEIMBRE, R., 2009. Roller compacted concrete with contaminated recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, 23(11), pp. 3382-3387.
- DEBIEB, F. and KENAI, S., 2008. The use of coarse and fine crushed bricks as aggregate in concrete. *Construction and Building Materials*, 22(5), pp. 886-893.
- DECISIÓN DEL CONSEJO 2003/33/EC DE 19 DE DICIEMBRE DE 2002, 2003. Criterios y procedimientos de admisión de residuos en los vertederos con arreglo al artículo 16 y al anexo II de la Directiva 1999/31/CEE (2003/33/CE).
- DECRETO 397/2010, 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.
- DELIBES LINIERS, A., 1993. Tecnología y propiedades mecánicas del hormigón. 2ª ed. Madrid: Intemac ediciones.
- DESHPANDE, N., and KULKARNI, S.S., 2011. Critical Analysis of Recycled aggregate and Concrete with Recycled aggregate. *Applied Mechanics and Materials*, 99-100, pp. 1274-1280
- DIN 1045-1, 2008. DIN 1045-1. Concrete, reinforced concrete and prestressed concrete structures. Part 1: design and construction.
- DIN 4226-100, 2002. DIN 4226-100. Aggregates for concrete and mortar. Part 100: recycled aggregates.
- DIRECTIVA 2008/98/CE, 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*.

- DIRECTIVA DEL CONSEJO 75/442/CEE, 1975. Directiva del Consejo 75/442/CEE, de 15 de julio de 1975, relativa a los residuos.
- DJERBI TEGGUER, A., 2012. Determining the water absorption of recycled aggregates utilizing hydrostatic weighing approach. *Construction and Building Materials*, 27 (1), pp. 112-116.
- DOMÍNGUEZ, J., VILLANUEVA, V. and MARTÍNEZ, E., 2004. Elementos constructivos aplicables a viviendas de interés social fabricados con áridos reciclados. Constructive elements applicable to houses of social interest made with recycled aggregate. *Revista Ingeniería de Construcción* 19(1), www.ing.puc.cl/ric
- DOMINGO-CABO, A., LÁZARO, C., LÓPEZ-GAYARRE, F., SERRANO-LÓPEZ, M.A., SERNA, P. and CASTAÑO-TABARES, J.O., 2009. Creep and shrinkage of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 23(7), pp. 2545-2553.
- DREUX G., 1981. *Guía práctica del hormigón*. Barcelona: Editores Técnicos Asociados. S.A.
- EEA REPORT N° 8/2011, 2011. Earnings, jobs and innovation: the role of recycling in a green economy.
- EEA REPORT N°2/2008, 2008. Effectiveness of environmental taxes and charges for managing sand, gravel and rock extraction in selected EU countries.
- EGUCHI, K., TERANISHI, K., NAKAGOME, A., KISHIMOTO, H., SHINOZAKI, K. and NARIKAWA, M., 2007. Application of recycled coarse aggregate by mixture to concrete construction. *Construction and Building Materials*, 21(7), pp. 1542-1551.
- EHE, 1998. *EHE. Instrucción de hormigón estructural*. Madrid: Ministerio de Fomento.
- EHE-08, 2008. *Instrucción de hormigón estructural EHE-08*. Madrid: Ministerio de Fomento.
- ENGELSEN, C.J., WIBETOE, G., VAN DER SLOOT, H.A., LUND, W. and PETKOVIC, G., 2012. Field site leaching from recycled concrete aggregates applied as sub-base material in road construction. *Science of the Total Environment*, 427-428, pp. 86-97.
- ENGELSEN, C.J., VAN DER SLOOT, H.A., WIBETOE, G., JUSTNES, H., LUND, W. and STOLTENBERG-HANSSON, E., 2010. Leaching characterisation and geochemical modelling of minor and trace elements released from recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Research*, 40(12), pp. 1639-1649.
- ENGELSEN, C.J., VAN DER SLOOT, H.A., WIBETOE, G., PETKOVIC, G., STOLTENBERG-HANSSON, E. and LUND, W., 2009. Release of major elements from recycled concrete aggregates and geochemical modelling. *Cement and Concrete Research*, 39(5), pp. 446-459.
- ERGÜN, A., 2011. Effects of the usage of diatomite and waste marble powder as partial replacement of cement on the mechanical properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 25(2), pp. 806-812.

- ETXEBERRIA, M. and VÁZQUEZ, E., 2010. Alkali silica reaction in concrete induced by mortar adhered to recycled aggregate. *Materiales de Construcción*, (60), pp. 47-58.
- ETXEBERRIA, M., VÁZQUEZ, E., MARÍ, A. and BARRA, 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.
- EUROSTAT 2010, 2010. Environmental statistics and accounts in Europe. Publications Office of the European Union, 2011 edn. Luxembourg: Eurostat Pocketbooks.
- EUROSTAT 2011, 2011. Energy, transport and environment indicators. Publications Office of the European Union, 2011 edn. Luxembourg: Eurostat Pocketbooks.
- EVANGELISTA, L. and DE BRITO, J., 2010. Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 32(1), pp. 9-14.
- EVANGELISTA, L. and DE BRITO, J., 2007. Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 29(5), pp. 397-401.
- EVANGELISTA, L. and DE BRITO, J., 2007. Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 29(5), pp. 397-401.
- Fernández Cánovas M. Hormigón. 7ª ed. Madrid: Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos; 1989.
- FONSECA, N., DE BRITO, J. and 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.
- FUEYO CASADO, L., 2003. Manual de demoliciones, reciclaje y manipulación de materiales. Madrid: Fueyo.
- FUEYO CASADO, L., 2012. Mejoras técnicas en el reciclado de residuos de construcción y demolición (RCD). Tesis Doctoral. Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Minas de la Universidad de Madrid.
- GALVÍN, A.P., AYUSO, J., AGRELA, F., BARBUDO, A. and JIMÉNEZ, J.R., 2012. Analysis of leaching procedures for environmental risk assessment of recycled aggregate use in unpaved roads. *Construction and Building Materials*, (In press).
- GALVÍN, A.P., AYUSO, J., JIMÉNEZ, J.R. and AGRELA, F., 2012. Comparison of batch leaching tests and influence of pH on the release of metals from construction and demolition wastes. *Waste Management*, 32(1), pp. 88-95.
- GARCÍA MESEGUER, A., 2001. Hormigón armado I. Materiales. ejecución. Control. Patología. Madrid: UNED. Fundación Escuela de la Edificación.
- GEHO-CEB, 1997. Grupo Español del Hormigón. Demolición y reutilización de estructuras de hormigón. Madrid: Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

GENCEL, O., OZEL, C., KOKSAL, F., ERDOGMUS, E., MARTÍNEZ-BARRERA, G. and BROSTOW, W., 2012. Properties of concrete paving blocks made with waste marble. *Journal of Cleaner Production*, 21(1), pp. 62-70.

GOKCE, A., NAGATAKI, S., SAEKI, T. and HISADA, M., 2004. Freezing and thawing resistance of air-entrained concrete incorporating recycled coarse aggregate: The role of air content in demolished concrete. *Cement and Concrete Research*, 34(5), pp. 799-806.

GÓMEZ-SOBERÓN, J.M.V., VÁZQUEZ RAMONICH, E., and AGULLÓ FITÉ, L., 2001. Hormigón con áridos reciclados. Una guía de diseño para el material. Monografía M60-2001. Barcelona: Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE).

GÓMEZ-SOBERÓN J.M.V., ARREDONDO-REA S.P., and CORRAL-HIGUERA, R., 2011. Estudio de los tipos de residuos producidos en tipologías constructivas. Determinación y cotejo. VIII Convención Internacional sobre Medio Ambiente y Desarrollo, V Congreso de Gestión Ambiental, Habana, Cuba.

GÓMEZ-SOBERÓN, J.M.V., 2002. Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate: An experimental study. *Cement and Concrete Research*, 32(8), pp. 1301-1311.

GONZÁLEZ-FONTEBOA, B. and MARTÍNEZ-ABELLA, F., 2005. Hormigones con áridos reciclados: estudio de propiedades de los áridos y de las mezclas. *Recycled aggregates concrete: aggregate and mix properties*. 55, pp. 53-66.

GONZÁLEZ-FONTEBOA, B., MARTÍNEZ-ABELLA, F., CARRO LÓPEZ, D. and SEARA-PAZ, S., 2011. Stress-strain relationship in axial compression for concrete using recycled saturated coarse aggregate. *Construction and Building Materials*, 25(5), pp. 2335-2342.

GONZÁLEZ-FONTEBOA, B. and 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.

GONZÁLEZ-FONTEBOA, B. and MARTÍNEZ-ABELLA, F., 2007. Shear strength of recycled concrete beams. *Construction and Building Materials*, 21(4), pp. 887-893.

GONZÁLEZ-FONTEBOA, B., MARTÍNEZ-ABELLA, F., HERRADOR, M.F. and SEARA-PAZ, S., 2012. Structural recycled concrete: Behaviour under low loading rate. *Construction and Building Materials*, 28(1), pp. 111-116.

GONZÁLEZ-FONTEBOA, B., MARTÍNEZ-ABELLA, F., MARTÍNEZ-LAGE, I. and EIRAS-LÓPEZ, J., 2009. Structural shear behaviour of recycled concrete with silica fume. *Construction and Building Materials*, 23(11), pp. 3406-3410.

HANSEN, T.C., 1986. Recycled aggregates and recycled-aggregate concrete; state-of-the-art report developments 1945-1985, RILEM Technical Committee-37-DRC. *Materials and Structures*, 19 (111), pp. 201-46.

- HANSEN, T.C., 1992. Recycling of demolition concrete and masonry. 6.
- HEBHOUH, H., AOUN, H., BELACHIA, M., HOUARI, H. and GHORBEL, E., 2011. Use of waste marble aggregates in concrete. *Construction and Building Materials*, 25(3), pp. 1167-1171.
- HENDRIKS, C.F. and PIETERSEN, H.S., 2000. Sustainable Raw Materials: Construction and Demolition Waste. France: RILEM Publication, Cachan Cedex.
- HERRADOR, R., PÉREZ, P., GARACH, L. and ORDÓÑEZ, J., 2011. Use of Recycled Construction and Demolition Waste Aggregate for Road Course Surfacing. *Journal of Transportation Engineering*, 138(2), pp. 182-190.
- HSIAO T., H., Y. and YU, Y., WERNICK, I., 2002. Modeling materials flow of waste concrete from construction and demolition wastes in Taiwan. 28, pp. 39-47.
- [HTTP://WWW.CDRECYCLING.ORG/](http://www.cdrecycling.org/), 2005-last update, Construction Materials Recycling Association.
- [HTTP://WWW.INFO.GOV.HK/EPD](http://www.info.gov.hk/epd/), 2005-last update, Environmental Protection Department.
- IHOBE, 2004. Monografía sobre residuos de construcción y demolición. Bilbao: Ihobe, Sociedad Pública de Gestión Ambiental.
- IHOBE, 2011. Usos de áridos reciclados mixtos procedentes de residuos de construcción y demolición. Bilbao: Ihobe, Sociedad Pública de Gestión Ambiental.
- ITEC, 2000. Plan de gestión de residuos en las obras de construcción y demolición. Barcelona: Instituto de Tecnología de la Construcción de Cataluña.
- JEFATURA DEL ESTADO, 2011. Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados. BOE número 181 de 29 de julio de 2011.
- Jiménez Montoya P, García Meseguer A, Morán Cabré F. Hormigón armado. 14ª ed. Barcelona: Editorial Gustavo Gili, S.A.; 2000.
- JIMÉNEZ SALAS, J.A. and DE JUSTO ALPAÑÉS, J.L., 1975. Geotecnia y cimientos I. Propiedades de los suelos y de las rocas. 2ª edn. Madrid: Editorial Rueda.
- JIMÉNEZ, J.R., AGRELA, F., AYUSO, J. and LÓPEZ, M., 2011. A comparative study of recycled aggregates from concrete and mixed debris as material for unbound road sub-base. 61 (302), pp. 289-302.
- JIMÉNEZ, J.R., AGRELA, F., AYUSO, J. and LÓPEZ, M., 2011. 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.
- JIMÉNEZ, J.R., AYUSO, J., AGRELA, F., LÓPEZ, M. and GALVÍN, A.P., 2012. Utilisation of unbound recycled aggregates from selected CDW in unpaved rural roads. *Resources, Conservation and Recycling*, 58(0), pp. 88-97.
- JIS A 5021, 2005. JIS A 5021. Recycled aggregate for concrete-class H.
- JIS A 5022, 2006. JIS A 5022. Recycled aggregate for concrete-class M.

JIS A 5023, 2007. JIS A 5023. Recycled aggregate for concrete-class L.

JONES, N., SOUTSOS, M.N., MILLARD, S.G., BUNGEY, J.H., TICKELL, R.G. and GRADWELL, J., 2004. Developing precast concrete products made with recycled construction and demolition waste. In: M.C. LIMBACHIYA and J.J. ROBERTS, eds, Proceedings of the international conference on sustainable waste management and recycling: construction demolition waste. London, Kingston University: pp. 133-140.

KARAŞAHIN, M. and TERZI, S., 2007. Evaluation of marble waste dust in the mixture of asphaltic concrete. *Construction and Building Materials*, 21(3), pp. 616-620.

KATZ, A., 2003. Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete. *Cement and Concrete Research*, 33(5), pp. 703-711.

KATZ, A., 2003. Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete. *Cement and Concrete Research*, 33(5), pp. 703-711.

KATZ, A. and BAUM, H., 2011. A novel methodology to estimate the evolution of construction waste in construction sites. *Waste Management*, 31(2), pp. 353-358.

KHALDOUN, R., 2007. Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate. *Building and Environment*, 42(1), pp. 407-415.

KHALED, R.J. and KRIZEK, F., 1996. Fiber-reinforced recycled crushed concrete as a stabilized base course for highway pavements.

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

KHATIB, J.M. and WILD, S., 1998. Sulphate Resistance of Metakaolin Mortar. *Cement and Concrete Research*, 28(1), pp. 83-92.

KHATIB, J.M. and WILD, S., 1996. Pore size distribution of metakaolin paste. *Cement and Concrete Research*, 26(10), pp. 1545-1553.

KOFOWOROLA O.F. and GHEEWALA, S.H., 2009. Estimation of construction waste generation and management in Thailand (29), pp. 731-738.

KOU, S.C. and 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.

KOU, S., POON, C. and AGRELA, F., 2011. Comparisons of natural and recycled aggregate concretes prepared with the addition of different mineral admixtures. *Cement and Concrete Composites*, 33(8), pp. 788-795.

KOU, S., POON, C. and 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.

KRAEMER, C., 1997. Carreteras. Madrid: Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos.

- KRAEMER, C. and MORILLA ABAD, I., 1997. Explanaciones y drenaje. 5ª edn. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- KRAEMER, C., PARDILLO, J.M., ROCCI, S., ROMANA, M.G., SÁNCHEZ BLANCO, V. and DEL VAL, M.Á., 2009. Ingeniería de carreteras. 2ª edn. Madrid: McGraw Hill.
- KRAEMER, C. and VAL, M.A.D., 1998. Firmes y pavimentos. 3ª edn. Madrid: Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.
- KS F 2573, 2011. KS F 2573. Recycled aggregate for concrete.
- LEITE, F.D.C., MOTTA, R.D.S., VASCONCELOS, K.L. and BERNUCCI, L., 2011. Laboratory evaluation of recycled construction and demolition waste for pavements. *Construction and Building Materials*, 25(6), pp. 2972-2979.
- LEVY, S.M. and HELENE, P., 2004. Durability of recycled aggregates concrete: a safe way to sustainable development. *Cement and Concrete Research*, 34(11), pp. 1975-1980.
- LI, X., 2009. Recycling and reuse of waste concrete in China: Part II. Structural behaviour of recycled aggregate concrete and engineering applications. *Resources, Conservation and Recycling*, 53(3), pp. 107-112.
- LI, X., 2008. Recycling and reuse of waste concrete in China: Part I. Material behaviour of recycled aggregate concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, 53(1-2), pp. 36-44.
- LIDELOW, S., 2004. Environmental assessment of secondary construction material. Licentiate thesis, Dept. of Civil and Environmental Engineering. Division of Waste Science and Technology. Lulea Univ. of Technology.
- LIMBACHIYA, M.C., MARROCCHINO, E. and KOULOURIS, A., 2007. Chemical-mineralogical characterisation of coarse recycled concrete aggregate. *Waste Management*, 27(2), pp. 201-208.
- LIMBACHIYA, M., MEDDAH, M.S. and OUCHAGOUR, Y., 2012. Use of recycled concrete aggregate in fly-ash concrete. *Construction and Building Materials*, 27(1), pp. 439-449.
- LLATAS, C., 2011. A model for quantifying construction waste in projects according to the European waste list. *Waste Management*, 31(6), pp. 1261-1276.
- LNEC E 471, 2009.
ESPECIFICAÇÃO LNEC E 471. GUIDE POUR L'UTILISATION DES GRANULATS RECYCLÉS GROS DANS LES BÉTONS (GUIDE FOR THE USE OF RECYCLED COARSE AGGREGATES IN CONCRETE).
- LÓPEZ-GAYARRE, F., SERNA, P., DOMINGO-CABO, A., SERRANO-LÓPEZ, M.A. and LÓPEZ-COLINA, C., 2009. Influence of recycled aggregate quality and proportioning criteria on recycled concrete properties. *Waste Management*, 29(12), pp. 3022-3028.
- LÓPEZ GAYARRE, F., LÓPEZ-COLINA, C., SERRANO, M.A. and LÓPEZ-MARTÍNEZ, M., 2011. Manufacture of concrete kerbs and floor blocks with recycled aggregate from C&DW. *Construction and Building Materials*, in press.

- LURA, P. and BISSCHOP, J., 2004. On the origin of eigenstresses in lightweight aggregate concrete. *Cement and Concrete Composites*, 26(5), pp. 445-452.
- MARINKOVIĆ, S., RADONJANIN, V., MALEŠEV, M. and IGNJATOVIĆ, I., 2010. Comparative environmental assessment of natural and recycled aggregate concrete. *Waste Management*, 30(11), pp. 2255-2264.
- MARMASH, B. and ELLIOTT, K., 2000. The properties of recycled precast concrete hollow core slabs for use as replacement aggregate in concrete. In: J.J.J.M.G.A.P.J.W. G.R. WOOLLEY, ed, *Waste Management Series*. Elsevier, pp. 769-781.
- MARMASH, B. and ELLIOTT, K., 2000. The properties of recycled precast concrete hollow core slabs for use as replacement aggregate in concrete. In: J.J.J.M.G.A.P.J.W. G.R. WOOLLEY, ed, *Waste Management Series*. Elsevier, pp. 769-781.
- MARTÍNEZ BERTRAND, C. and TOMÉ TRUJILLO, M., 2008. Gestión de residuos de construcción y demolición (RCDS): importancia de la recogida para optimizar su posterior valorización.
- MARTÍN-MORALES, M., CUENCA MOYANO, G.M., ZAMORANO, M. and VALVERDE-PALACIOS, I., 2013. Recycled aggregate in road construction following the Spanish General Technical Specifications for Roads and Bridge Works (PG-3): a case study. In press.
- MARTÍN-MORALES, M., SÁNCHEZ-ROLDÁN, Z., ZAMORANO, M. and VALVERDE-PALACIOS, I., 2013. Size grading methods to characterize construction and demolition waste for its use in structural concrete. In press.
- MARTÍN-MORALES, M., ZAMORANO, M., RUIZ-MOYANO, A. and 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.
- MAS, B., CLADERA, A., DEL OLMO, T. and PITARCH, F., 2011. Influence of the amount of mixed recycled aggregates on the properties of concrete for non-structural use. 27, pp. 612-622.
- MATAR, P. and EL DALATI, R., 2011. Strength of masonry blocks made with recycled concrete aggregates. Seventh International Conference on Material Sciences (CSM7). *Physics Procedia* 21, pp. 180-186.
- MEDINA, C., SÁNCHEZ DE ROJAS, M.I. and FRÍAS, M., 2011. Reuse of sanitary ceramic wastes as coarse aggregate in eco-efficient concretes. *Cement and Concrete Composites*, 34(1), pp. 48-54.
- MELBOUCI, B., 2009. Compaction and shearing behaviour study of recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, 23(8), pp. 2723-2730.
- MESBAH, H.A. and 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.

- MILLS-BEALE, J. and YOU, Z., 2010. The mechanical properties of asphalt mixtures with Recycled Concrete Aggregates. *Construction and Building Materials*, **24**(3), pp. 230-235.
- 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.*
- MINISTERIO DE MEDIOAMBIENTE, 2001. *Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición 2001-06 (PNRCD).*
- MINISTERIO DE MEDIOAMBIENTE Y MEDIO RURAL Y MARINO, 2008. *II Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición 2007-15 (II PNRCD).*
- MINISTERO DELLE INFRASTRUTTURE, 2008. *NTC 2008: Norme Tecniche per le costruzioni. D.M. 14-01-2008.*
- MIRANDA, L.F.R. and SELMO, S.M.S., 2006. CDW recycled aggregate renderings: Part I – Analysis of the effect of materials finer than 75 μm on mortar properties. *Construction and Building Materials*, **20**(9), pp. 615-624.
- MIRANDA, L.F.R. and SELMO, S.M.S., 2006. CDW recycled aggregate renderings: Part II – Analysis of the effect of materials finer than 75 μm under accelerated aging performance. *Construction and Building Materials*, **20**(9), pp. 625-633.
- MOKK, L. and URCELAY, J.M., 1969. *Construcciones con materiales prefabricados de hormigón armado.* Bilbao: Urmo.
- MÜLLER D.B., 2006. Stock dynamics for forecasting material flows—case study for housing in the Netherlands. **59** (1), pp. 142-156.
- MÜLLER, A., 2004. Lightweight aggregates from masonry rubble.
- NAGATAKI, S., GOKCE, A., SAEKI, T. and HISADA, M., 2004. Assessment of recycling process induced damage sensitivity of recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Research*, **34**(6), pp. 965-971.
- NB 26, 2003. *NB 26. Recycling of concrete and masonry for production of concrete.*
- NBR 15116, 2005. *Norma Brasileira NBR 15116. Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural - Requisitos (Recycled aggregate of solid residue of building constructions - Requirements and methodologies).*
- NEN 5905, 2010. *Nederlandse norm NEN 5905. Nederlandse aanvulling op NEN-EN 12620 "Toeslagmaterialen voor beton".*
- NTE-EFB 1974. Estructuras fábrica de bloques. Orden del Ministerio de la Vivienda. 27/07/1974.
- OIKONOMOU, N.D., 2005. Recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Composites*, **27**(2), pp. 315-318.

- OLORUNSOGO, F.T. and PADAYACHEE, N., 2002. Performance of recycled aggregate concrete monitored by durability indexes. *Cement and Concrete Research*, **32**(2), pp. 179-185.
- ORDEN MAM/304/2002, 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.**
- OT 70085, 2000. *OT 70085. Instruction technique Utilisation de matériaux de construction minéraux secondaires dans la construction d'abris.*
- PACHECO-TORGAL, F., DING, Y., MIRALDO, S., ABDOLLAHNEJAD, Z. and LABRINCHA, J.A., 2012. Are geopolymers more suitable than Portland cement to produce high volume recycled aggregates HPC? **36**, pp. 1048-1052.
- PACHECO-TORGAL, F. and JALALI, S., 2010. Reusing ceramic wastes in concrete. *Construction and Building Materials*, **24**(5), pp. 832-838.
- PADMINI, A.K., RAMAMURTHY, K. and MATHEWS, M.S., 2009. Influence of parent concrete on the properties of recycled aggregate concrete. **23**, pp. 829-836.
- PADMINI, A.K., RAMAMURTHY, K. and MATHEWS, M.S., 2009. Influence of parent concrete on the properties of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, **23**(2), pp. 829-836.
- PARNAVITHANA, S. and MOHAJERANI, A., 2006. Effects of recycled concrete aggregates on properties of asphalt concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, **48**(1), pp. 1-12.
- PARK, W. and NOGUCHI, T., 2012. Influence of metal impurity on recycled aggregate concrete and inspection method for aluminum impurity. **in press**.
- PARK, C.K., NOH, M.H. and PARK, T.H., 2005. Rheological properties of cementitious materials containing mineral admixtures. *Cement and Concrete Research*, **35**(5), pp. 842-849.
- PAULO B., C., 2009. Mechanical properties of brick aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, **23**(3), pp. 1292-1297.
- PÉREZ, I., PASANDÍN, A.R. and MEDINA, L., 2012. Hot mix asphalt using C&D waste as coarse aggregates. *Materials and Design*, **36**, pp. 840-846.
- PG-3. PG-3. Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes. 1975.
- POON, C.S., 2000. Management and Recycling of Demolition Waste in Hong Kong. *Proceedings of the 2nd International Conference on Solid Waste Management, Taipei, Taiwan*, , pp. 433-442.
- POON, C.S., KOU, S.C. and LAM, L., 2007. Influence of recycled aggregate on slump and bleeding of fresh concrete. **40**, pp. 981-988.
- POON, C.S., KOU, S.C. and LAM, L., 2002. Use of recycled aggregates in molded concrete bricks and blocks. *Construction and Building Materials*, **16**(5), pp. 281-289.

- POON, C.S., KOU, S.C. and LAM, L., 2002. Use of recycled aggregates in molded concrete bricks and blocks. *Construction and Building Materials*, **16**(5), pp. 281-289.
- POON, C.S., SHUI, Z.H., LAM, L., FOK, H. and 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.
- POON, C.S. and CHAN, D., 2006. Feasible use of recycled concrete aggregates and crushed clay brick as unbound road sub-base. *Construction and Building Materials*, **20**(8), pp. 578-585.
- POON, C.S. and CHAN, D., 2006. Paving blocks made with recycled concrete aggregate and crushed clay brick. *Construction and Building Materials*, **20**(8), pp. 569-577.
- POON, C.S. and 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.
- POON, C. and 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.
- POON, C. and 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.
- POON, C. and CHAN, D., 2007. The use of recycled aggregate in concrete in Hong Kong. *Resources, Conservation and Recycling*, **50**(3), pp. 293-305.
- POON, C., KOU, S., WAN, H. and ETXEBERRIA, M., 2009. Properties of concrete blocks prepared with low grade recycled aggregates. *Waste Management*, **29**(8), pp. 2369-2377.
- POON, C., QIAO, X.C. and CHAN, D., 2006. The cause and influence of self-cementing properties of fine recycled concrete aggregates on the properties of unbound sub-base. *Waste Management*, **26**(10), pp. 1166-1172.
- PORTAS, S., 2004. Case study: Mechanical reliability of sub-grade layer built with demolition waste materials. 2nd Int. Congress on New Technologies and Modelling Tools for Roads, Societa Italiana Infrastruttura Viarie, Florence, Italy, .
- prEN 12620. Proyecto de norma EN 12620. Áridos para hormigón. 2013 AENOR. Madrid.
- PROYECTO GEAR, 2012. Guía española de áridos reciclados procedentes de RCD. Madrid: Asociación Española de Gestores de Residuos de Construcción y Demolición GERD.
- PTV 406, 2003. Prescriptions Techniques PTV 406. Granulats recycles. Granulats de débris de béton, de débris mixtes, de débris de maçonnerie et de débris asphaltiques. Pierres concassées et graves. Granulats pour béton. Granulats pour matériaux traités aux liants hydrauliques et matériaux non traités utilisés pour les travaux de génie civil et pour la construction des chaussées.

- RAHAL, K., 2007. Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate. *Building and Environment*, 42(1), pp. 407-415.
- RAHAL, K., 2007. Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate. *Building and Environment*, 42(1), pp. 407-415.
- RAO, A., JHA, K.N. and MISRA, S., 2007. Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, 50(1), pp. 71-81.
- RAO, A., JHA, K.N. and MISRA, S., 2007. Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, 50(1), pp. 71-81.
- REAL DECRETO 314/2006, 2006. Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación (CTE).
- REAL DECRETO 1481/2001, 2001.
REAL DECRETO 1481/2001, de 27 de diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero.
- REAL DECRETO 952/1997, 1997. Real Decreto 952/1997, de 20 de junio, por el que se modifica el Reglamento para la ejecución de la Ley 20/1986, de 14 de mayo, Básica de Residuos Tóxicos y Peligrosos, aprobado mediante Real Decreto 833/1988, de 20 de julio.
- REGLAMENTO (CE) N° 2150/2002, 2002.
REGLAMENTO (CE) N° 2150/2002 DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 25 de noviembre de 2002 relativo a las estadísticas sobre residuos.
- RESOLUCIÓN DE 20 DE ENERO DE 2009, 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.
- REVEL, M., JACOBSON, M. and DE NAVACERRADA, G., 1973. La prefabricación en la construcción. Bilbao: Urmo.
- RICHARDSON, A., ALLAIN, P. and VEUILLE, M., 2010. Concrete with crushed, graded and washed recycled construction demolition waste as a coarse aggregate replacement. *Structural Survey*, 28(2), pp. 142-148.
- RICHARDSON, A.E., COVENTRY, K. and GRAHAM, S., 2009. Concrete manufacture with un-graded recycled aggregates. *Structural Survey*, 27(1), pp. 62-70.
- RICHARDSON, A., COVENTRY, K. and BACON, J., 2011. Freeze/thaw durability of concrete with recycled demolition aggregate compared to virgin aggregate concrete. *Journal of Cleaner Production*, 19(2-3), pp. 272-277.
- RILEM, TECHNICAL COMMITTEE TC 121, 1994. 121-DRG Guidance for demolition and reuse of concrete and masonry. *Materials and Structures*, 27, pp. 557-559.

- ROBINSON, G.R., MENZIE, W.D. and HYUN, H., 2004. Recycling of construction debris as aggregate in the Mid-Atlantic Region, USA. *Resources, Conservation and Recycling*, 42(3), pp. 275-294.
- ROCA, P. and AGUADO, A., 1994. Las filosofías asociadas a la construcción mediante elementos prefabricados de hormigón. *CEMENTO-HORMIGÓN*, N° 735, pp. 831-849.
- RUBIO, M.C., MENÉNDEZ, A., MORENO, F., BELMONTE, A. and RAMÍREZ, A., 2011. Mechanical properties of hot bituminous mixes manufactured with recycled aggregate of Silestone® waste. *Materiales de Construcción*, 61(301), pp. 49-60.
- SAGOE-CRENTSIL, K. and BROWN, T., 1998. Guide for Specification of Recycled Concrete Aggregates (RCA) for Concrete Production. CSIRO, Building, Construction And Engineering. Ecorecycle, Victoria, Australia, .
- SAGOE-CRENTSIL, K.K., BROWN, T. and TAYLOR, A.H., 2001. Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate. *Cement and Concrete Research*, 31(5), pp. 707-712.
- SÁNCHEZ DE JUAN, M. and ALAEJOS GUTIÉRREZ, P., 2005. Aspectos químicos del árido reciclado relacionados con la durabilidad del hormigón, 2005.
- Sánchez de Juan M. Estudio sobre la utilización de árido reciclado para la fabricación de hormigón estructural [dissertation]. Madrid: ; 2004.
- SÁNCHEZ DE JUAN, M. and GUTIÉRREZ ALAEJOS, P., 2009. Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate. *Construction and Building Materials*, 23(2), pp. 872-877.
- SÁNCHEZ DE JUAN, M. and ALAEJOS GUTIÉRREZ, M.D.P., 2006. Estudio sobre las propiedades del árido reciclado. Utilización en hormigón estructural. Madrid: Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas.
- SANI, D., MORICONI, G., FAVA, G. and CORINALDESI, V., 2005. Leaching and mechanical behaviour of concrete manufactured with recycled aggregates. *Waste Management*, 25(2), pp. 177-182.
- SCHEY, J.A., 2002. Procesos de manufactura. 3ª edn. Méxicoetc.: McGraw-Hill Interamericana.
- SCHRÖR, H., 2011. Informe Eurostat 44/2011. Generation and treatment of waste in Europe 2008.
- SENTHAMARAI, R. and DEVADAS MANOHARAN, P., 2005. Concrete with ceramic waste aggregate. *Cement and Concrete Composites*, 27(9-10), pp. 910-913.
- SENTHAMARAI, R., MANOHARAN, P.D. and GOBINATH, D., 2011. Concrete made from ceramic industry waste: Durability properties. *Construction and Building Materials*, 25(5), pp. 2413-2419.
- SHANGHAI CONSTRUCTION STANDARD SOCIETY (SCSS), 2007. Technical Code for Application of Recycled Aggregate Concrete (DG/TJ07-008).

- SHEN, D. and DU, J., 2004. Evaluation of building materials recycling on HMA permanent deformation. *Construction and Building Materials*, 18(6), pp. 391-397.
- SIA 162, 1994. SIA 162. Ouvrages en béton.
- SIA 162/4, 1994. SIA 162/4. Béton de recyclage.
- SIA BULLETIN MB 2030, 2010. SIA bulletin MB 2030. Recycling concrete.
- SILVA, J., BRITO, J.D. and VEIGA, R., 2009. Incorporation of fine ceramics in mortars. *Construction and Building Materials*, 23(1), pp. 556-564.
- SIM, J. and 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.
- SOLÍS-GUZMÁN, J., MARRERO, M., MONTES-DELGADO, M.V. and RAMÍREZ-DE-ARELLANO, A., 2009. A Spanish model for quantification and management of construction waste. *Waste Management*, 29(9), pp. 2542-2548.
- SONG, H. and SARASWATHY, V., 2006. Studies on the corrosion resistance of reinforced steel in concrete with ground granulated blast-furnace slag—An overview. *Journal of hazardous materials*, 138(2), pp. 226-233.
- SOUTSOS, M.N., TANG, K. and MILLARD, S.G., 2011. Concrete building blocks made with recycled demolition aggregate. *Construction and Building Materials*, 25(2), pp. 726-735.
- SOUTSOS, M.N., TANG, K. and MILLARD, S.G., 2011. Concrete building blocks made with recycled demolition aggregate. *Construction and Building Materials*, 25(2), pp. 726-735.
- SOUTSOS, M.N., TANG, K. and MILLARD, S.G., 2011. Use of recycled demolition aggregate in precast products, phase II: Concrete paving blocks. *Construction and Building Materials*, 25(7), pp. 3131-3143.
- SRI RAVINDRARAJAH, R. and TAM, C.T., 1987. Recycling concrete as fine aggregate in concrete. *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, 9(4), pp. 235-241.
- SYMONDS GROUP, 1999. Symonds Group Ltd 46967 Final Report: construction and demolition waste management practices, and their economic impacts.
- TABSH, S.W. and ABDELFATAH, A.S., 2009. Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 23(2), pp. 1163-1167.
- TABSH, S.W. and ABDELFATAH, A.S., 2009. Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 23(2), pp. 1163-1167.
- TAM, V.W.Y., 2009. Comparing the implementation of concrete recycling in the Australian and Japanese construction industries. *Journal of Cleaner Production*, 17(7), pp. 688-702.

- TAM, V.W.Y., 2008. Economic comparison of concrete recycling: A case study approach. *Resources, Conservation and Recycling*, 52(5), pp. 821-828.
- TAM, V.W.Y., GAO, X.F. and TAM, C.M., 2005. Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach. *Cement and Concrete Research*, 35(6), pp. 1195-1203.
- TAM, V.W.Y., GAO, X.F., TAM, C.M. and CHAN, C.H., 2008. New approach in measuring water absorption of recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, 22(3), pp. 364-369.
- TAM, V.W.Y., GAO, X.F., TAM, C.M. and NG, K.M., 2009. Physio-chemical reactions in recycle aggregate concrete. *Journal of hazardous materials*, 163(2-3), pp. 823-828.
- TAM, V.W.Y. and LE, K.N., 2007. Aggregate testing using 2nd-, 7th- and 10th-order interpolation polynomials. *Resources, Conservation and Recycling*, 52(1), pp. 39-57.
- TAM, V.W.Y. and TAM, C.M., 2008. Diversifying two-stage mixing approach (TSMA) for recycled aggregate concrete: TSMA and TSMA^{sc}. *Construction and Building Materials*, 22(10), pp. 2068-2077.
- TAM, V.W.Y. and TAM, C.M., 2006. Evaluations of existing waste recycling methods: A Hong Kong study. *Building and Environment*, 41(12), pp. 1649-1660.
- TAM, V.W.Y., TAM, C.M. and LE, K.N., 2007. Removal of cement mortar remains from recycled aggregate using pre-soaking approaches. *Resources, Conservation and Recycling*, 50(1), pp. 82-101.
- TAM, V.W.Y., TAM, C.M. and WANG, Y., 2007. Optimization on proportion for recycled aggregate in concrete using two-stage mixing approach. *Construction and Building Materials*, 21(10), pp. 1928-1939.
- TAM, V.W.Y., TAM, L. and LE, K.N., 2010. Cross-cultural comparison of concrete recycling decision-making and implementation in construction industry. *Waste Management*, 30(2), pp. 291-297.
- TAM, V.W.Y., WANG, K. and 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.
- TASCÓN BAYÓN, C. and MARÍN ANDRÉS, F.P., 1994. Las tejas de hormigón. *CEMENTO-HORMIGÓN*(N° 735), pp. 897-913.
- TOPÇU, İB., BILIR, T. and UYGUNOĞLU, T., 2009. Effect of waste marble dust content as filler on properties of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 23(5), pp. 1947-1953.
- TOPÇU, İB. and ŞENGEL, S., 2004. Properties of concretes produced with waste concrete aggregate. *Cement and Concrete Research*, 34(8), pp. 1307-1312.
- TU, T., CHEN, Y. and HWANG, C., 2006. Properties of HPC with recycled aggregates. *Cement and Concrete Research*, 36(5), pp. 943-950.

TURANLI, L., BEKTAS, F. and MONTEIRO, P.J.M., 2003. Use of ground clay brick as a pozzolanic material to reduce the alkali-silica reaction. *Cement and Concrete Research*, 33(10), pp. 1539-1542.

UNE 103103. UNE 103103-94. Determinación del límite líquido de un suelo por el método del aparato de Casagrande. 1994 AENOR. Madrid.

UNE 103104. UNE 103104-93. Determinación del límite líquido de un suelo. 1993 AENOR. Madrid.

UNE 103108, 1996. UNE 103108:1996. Determinación de las características de retracción de un suelo.

UNE 103500. UNE 103500-94. Geotecnia. Método de compactación. Próctor normal. 1994 AENOR. Madrid.

UNE 103501. UNE 103500-94. Geotecnia. Ensayo de compactación. Próctor modificado. 1994 AENOR. Madrid.

UNE 7050-2. UNE 7050-2. Tamices y tamizado de ensayo. Parte 2: Telas metálicas, chapas perforadas y láminas electroformadas. Medidas nominales de las aberturas. 1997 AENOR. Madrid.

UNE EN 932-1. UNE EN 932-1. Ensayos para determinar las propiedades generales de los áridos. Métodos de muestreo. 1997 AENOR. Madrid.

UNE EN 932-2. UNE EN 932-2. Ensayos para determinar las propiedades generales de los áridos. Métodos para la reducción de muestras de laboratorio. 1999 AENOR. Madrid.

UNE EN 933-1. UNE EN 933-1. Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Determinación de la granulometría de las partículas. Método del tamizado. 1998 AENOR. Madrid.

UNE EN 933-11. UNE EN 933-11. Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Ensayo de clasificación de los componentes de los áridos gruesos reciclados. 2009 AENOR. Madrid.

UNE EN 933-3. UNE EN 933-3. Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Determinación de la forma de las partículas. Índice de lajas. 1997 AENOR. Madrid.

UNE-EN 1097-2. UNE-EN 1097-2: 1999. Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 2: métodos para la determinación de la resistencia a la fragmentación. 1999 AENOR. Madrid.

UNE-EN 1097-2/A1:2007. UNE-EN 1097-2/A1:2007. Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 2: Métodos para la determinación de la resistencia a la fragmentación. 2007 AENOR. Madrid.

UNE-EN 1097-6:2001, 2001. UNE-EN 1097-6:2001. 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, Madrid, .

- UNE-EN 1097-6:2001/A1:2006, 2006. UNE-EN 1097-6:2001. 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, Madrid, .
- UNE-EN 12620:2003+A1. UNE-EN 12620:2003+A1. Áridos para hormigón. 2009 AENOR. Madrid.
- UNE-EN 13198:2004, 2004. UNE-EN 13198:2004. Productos prefabricados de hormigón. Mobiliario urbano y productos de jardín.
- UNE-EN 13369:2006, 2006. UNE-EN 13369:2006. Reglas comunes para productos prefabricados de hormigón. AENOR, Madrid, .
- UNE-EN 13369:2006/A1:2006, 2006. UNE-EN 13369:2006/A1:2006. Reglas comunes para productos prefabricados de hormigón. AENOR, Madrid, .
- UNE-EN 13369:2006/AC:2008, 2008. UNE-EN 13369:2006/AC:2008. Reglas comunes para productos prefabricados de hormigón. AENOR, Madrid, .
- UNE-EN 14147:2004, 2004. UNE-EN 14147:2004. Métodos de ensayo para la piedra natural. Determinación de la resistencia al envejecimiento por niebla salina.
- UNE-EN 15037-2:2009+A1:2011, 2011. UNE-EN 15037-2:2009+A1:2011. Productos prefabricados de hormigón. Sistemas de forjado de vigueta y bovedilla. Parte 2: Bovedillas de hormigón.
- UNE-EN 15037-2:2009+A1:2011. ERRATUM:2011, 2011. UNE-EN 15037-2:2009+A1:2011. ERRATUM:2011. Productos prefabricados de hormigón. Sistemas de forjado de vigueta y bovedilla. Parte 2: Bovedillas de hormigón.
- UNE-EN 1744-1. UNE-EN 1744-1. Ensayo para determinar las propiedades químicas de los áridos. Parte 1: análisis químico. 1999 AENOR. Madrid.
- UNE-EN 1744-6: 2007. 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. 2007 AENOR. Madrid.
- UNE-EN 196-1: 2005. UNE-EN 196-1. Métodos de ensayo de cementos. Parte 1: Determinación de resistencias mecánicas. AENOR. Madrid.
- UNE-EN 1996-1-1:2011, 2011. UNE-EN 1996-1-1:2011. Eurocódigo 6: Proyecto de estructuras de fábrica. Parte 1-1: Reglas generales para estructuras de fábrica armada y sin armar.
- UNE-EN 206-1. UNE-EN 206-1. Hormigón. Parte 1: Especificaciones, prestaciones, producción y conformidad. 2008. AENOR. Madrid.
- UNE 41166-1:2000. UNE 41166-1. Bloques de hormigón de áridos densos. Definiciones, clasificación y características generales. 2000. AENOR. Madrid.
- UNE 41166-2:2000. UNE 41166-2. Bloques de hormigón de áridos densos. Clasificación y especificaciones según utilización. 2000. AENOR. Madrid.

UNE-EN 771-3:2011, 2011. UNE-EN 771-3:2011. Especificaciones de piezas para fábrica de albañilería. Parte 3: Bloques de hormigón (áridos densos y ligeros).

UNE-EN 772-1:2011, 2011. UNE-EN 772-1:2011. Métodos de ensayo de piezas para fábrica de albañilería. Parte 1: Determinación de la resistencia a compresión.

UNE-EN 772-11:2011, 2011. UNE-EN 772-11:2011. Métodos de ensayo de piezas para fábrica de albañilería. Parte 11: Determinación de la absorción de agua por capilaridad de piezas para fábrica de albañilería de hormigón, hormigón celular curado en autoclave, piedra artificial y piedra natural, y de la tasa de absorción de agua inicial de las piezas de arcilla cocida para fábrica de albañilería.

UNE-EN 772-13:2001, 2001. UNE-EN 772-13:2001. Métodos de ensayo de piezas para fábrica de albañilería. Determinación de la densidad absoluta seca y de la densidad aparente seca de piezas para fábrica de albañilería. (excepto piedra natural).

UNE-EN 772-14:2002, 2002. UNE-EN 772-14:2002. Métodos de ensayo de piezas para fábrica de albañilería. Parte 14: Determinación de la variación debida a la humedad de las piezas de albañilería de hormigón de áridos y de piedra artificial.

UNE-EN 772-16:2011, 2011. UNE-EN 772-16:2011. Métodos de ensayo de piezas para fábrica de albañilería. Parte 16: Determinación de las dimensiones.

UNE-EN 772-20:2001, 2001. UNE-EN 772-20:2001. Métodos de ensayo de piezas para fábrica de albañilería. Parte 20: Determinación de la planeidad de las caras de piezas para fábrica de albañilería.

UNE-EN 772-3:1999, 1999. UNE-EN 772-3:1999. Métodos de ensayo de piezas para fábrica de albañilería. Parte 3: Determinación del volumen neto y del porcentaje de huecos por pesada hidrostática de piezas de arcilla cocida para fábrica de albañilería.

UNE-EN 933-1. UNE-EN 933-1:1998. Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 1: Determinación de la granulometría de las partículas. Métodos del tamizado. 1998 AENOR. Madrid.

UNE-EN 933-1:1998/A1. UNE-EN 933-1:1998/A1:2006. Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 1: Determinación de la granulometría de las partículas. Métodos del tamizado. 2006 AENOR. Madrid.

UNE-EN 933-2. UNE-EN 933-2:1996. Ensayo 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. 1996 AENOR. Madrid.

UNE-EN 933-2/1M. UNE-EN 933-2/1M: 1999. 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. 1999 AENOR. Madrid.

UNE-EN 933-8. UNE-EN 933-8:2000. Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 8: Evaluación de los finos. Ensayo de equivalente de arena. 2000 AENOR. Madrid.

- UYGUNOĞLU, T., TOPCU, I.B., GENÇEL, O. and 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(0), pp. 180-187.
- VAQUERO, J., CASTRO, T., CONCEJO, F., GONZÁLEZ, J.C., LLEYDA, J.L. and VALLE, J., 1996. Edificación con prefabricados de hormigón :para usos industriales, comerciales, aparcamientos y servicios. Madrid: Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones.
- VEGAS, I., IBAÑEZ, J.A., LISBONA, A., SÁEZ DE CORTAZAR, A. and 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.
- VILAGUT, F., 1975. Prefabricados de hormigón. Barcelona: Gustavo Gili.
- VILLORIA SAEZ, P., RIO MERINO, M.D. and PORRAS AMORES, C., Cuantificación de residuos de construcción y demolición (RCD) para su gestión en obras de edificación.
- VYNCKE, J. and VRIJNDERS, J., 2010. Recycling of C&D Waste in Belgium: State-of-the-Art and Opportunities for Technology Transfer. Second International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies, Università Politecnica delle Marche. Ancona, Italy: pp. 11.
- WANG J. Y., TOURAN, A., CHRISTOFOROU, C. and FADLALLA, H., 2004. A systems analysis tool for construction and demolition wastes management. (24), pp. 989-997.
- WBTC 12/2002, 2002. Works Bureau Technical Circular 12/2002. Specifications Facilitating the Use of Recycled Aggregates.
- WILD, S. and KHATIB, J.M., 1997. Portlandite consumption in metakaolin cement pastes and mortars. *Cement and Concrete Research*, 27(1), pp. 137-146.
- WILD, S., KHATIB, J.M. and JONES, A., 1996. Relative strength, pozzolanic activity and cement hydration in superplasticised metakaolin concrete. *Cement and Concrete Research*, 26(10), pp. 1537-1544.
- WONG, Y.D., SUN, D.D. and LAI, D., 2007. Value-added utilisation of recycled concrete in hot-mix asphalt. *Waste Management*, 27(2), pp. 294-301.
- WRAP, 2007. Aggregate Research Programme. Performance Related Approach to use of Recycled Aggregates. Banbury, Oxon: Waste & Resources Action Programme. University of Dundee.
- XIAO, J., LI, J. and ZHANG, C., 2005. Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading. *Cement and Concrete Research*, 35(6), pp. 1187-1194.
- XIAO, Z., LING, T., KOU, S., WANG, Q. and POON, C., 2011. Use of wastes derived from earthquakes for the production of concrete masonry partition wall blocks. *Waste Management*, 31(8), pp. 1859-1866.

- XUAN, D.X., SHUI, Z.H. and WU, S.P., 2009. Influence of silica fume on the interfacial bond between aggregate and matrix in near-surface layer of concrete. *Construction and Building Materials*, 23(7), pp. 2631-2635.
- YANG, J., DU, Q. and BAO, Y., 2011. Concrete with recycled concrete aggregate and crushed clay bricks. 25, pp. 1935-1945.
- YONG, P.C. and TEO, D.C.L., 2009. Utilisation of recycled aggregate as coarse aggregate in concrete. 1 (1), pp. 1-6.
- YOON, S.J., SEO, S.Y. and LEE, W.J., 2007. Physical Characteristic of Ready Mixed Concrete with Different Replacement Ratio of Recycled Aggregate. 26-28, pp. 345-348.
- YOST, P.A. and HALSTEAD, J.M., 1996. A methodology for quantifying the volume of construction waste. 14, pp. 453-461.
- ZAHARIEVA, R., BUYLE-BODIN, F. and WIRQUIN, E., 2004. Frost resistance of recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Research*, 34(10), pp. 1927-1932.
- ZEGA, C.J. and DI MAIO, A.A., 2011. Use of recycled fine aggregate in concretes with durable requirements. 31, pp. 2336-2340.
- ZHU, J.Q., WU, S.P., ZHONG, J.J. and WANG, D.M., 2011. A review of the recycling of construction and demolition wastes in asphalt pavement.
- ZHUTOVSKY, S., KOVLER, K. and BENTUR, A., 2004. Influence of cement paste matrix properties on the autogenous curing of high-performance concrete. *Cement and Concrete Composites*, 26(5), pp. 499-507.

