

UNIVERSIDAD DE GRANADA

E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos

Departamento de Ingeniería de la Construcción y Proyectos de Ingeniería



PROGRAMA DE DOCTORADO:

**SEGURIDAD, CALIDAD Y OPTIMIZACIÓN DE RECURSOS EN INFRAESTRUCTURAS Y SU
RELACIÓN MEDIOAMBIENTAL (242/99/2)**

TESIS DOCTORAL

**ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO, EN CONDICIONES DE USO DE TRÁFICO REAL, DE
FIRMES CONSTRUIDOS CON CAPAS DE MATERIAL PROCEDENTE DE RESIDUOS DE
CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN.**

Para la obtención del

GRADO DE DOCTOR POR LA UNIVERSIDAD DE GRANADA

AUTORA:

ROSARIO HERRADOR MARTÍNEZ

Granada, 2014

UNIVERSIDAD DE GRANADA

E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos

Departamento de Ingeniería de la Construcción y Proyectos de Ingeniería



**ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO, EN CONDICIONES DE USO DE TRÁFICO REAL, DE
FIRMES CONSTRUIDOS CON CAPAS DE MATERIAL PROCEDENTE DE RESIDUOS DE
CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN.**

AUTORA:

ROSARIO HERRADOR MARTÍNEZ

DIRECTORES:

JAVIER ORDÓÑEZ GARCÍA

Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

Universidad de Granada

LAURA GARACH MORCILLO

Doctora Ingeniera de Caminos, Canales y Puertos

Universidad de Granada

TESIS DOCTORAL - 2014

Memoria presentada por D^a Rosario Herrador Martínez para aspirar al grado de Doctor por la Universidad de Granada.

La doctoranda y los directores de la tesis “Análisis del comportamiento, en condiciones de uso de tráfico real, de firmes contruidos con capas de material procedente de residuos de construcción y demolición” garantizamos, al firmar esta tesis doctoral, que el trabajo ha sido realizado por la doctoranda bajo la dirección del director 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, Noviembre 2014

Los Directores de la Tesis:

Fdo.: D. Javier Ordóñez García

Fdo.: D. Laura Garach Morcillo

La Doctoranda:

Fdo: Rosario Herrador Martínez

AGRADECIMIENTOS

Mediante estas líneas me gustaría agradecer a todas aquellas personas que con su apoyo y colaboración me han ayudado a la realización de esta tesis. Es difícil citarlos a todos, por lo que ruego me perdonen por no nombrarlos personalmente. A todos ellos muchas gracias.

Quiero agradecer a mis directores de tesis, D. Javier Ordóñez García y D^a Laura Garach Morcillo el tiempo invertido en esta investigación. Muchas gracias por guiarme y asesorarme.

Gracias a mis familiares y amigos que han estado a mi lado en todo momento.

Gracias a la Agencia de la Obra Pública, por financiar el proyecto. Y por último, gracias a M^a José Sierra, de la Agencia de Obra Pública de la Junta de Andalucía y a Manuel Salas, de Centro de Estudios de Materiales y Control de Obra, S.A. (CEMOSA), por el continuo apoyo prestado y por estar siempre atentos a la resolución de dudas y al aporte de cuantos datos le han sido solicitados.

RESUMEN

La importancia que tiene en relación con el medio ambiente la gestión de los residuos de la construcción y la demolición (RCD) ha fomentado las actuaciones encaminadas a promover la reutilización, el reciclado y otras formas de poner el valor el residuo. Todo ello con el objetivo de conseguir un desarrollo sostenible en las actividades que intervienen en el proceso constructivo. Esto supone una disminución de importantes volúmenes de material destinados a vertedero, y, una minimización de las aportaciones de material de préstamo. De este modo, el avance en la reutilización de estos materiales contribuirá a reducir notablemente el impacto ambiental de las obras.

La finalidad de este proyecto es verificar la idoneidad técnica de materiales procedentes de residuos de la construcción, como materiales constitutivos de las capas inferiores del firme de carreteras. Se han comparado en condiciones de tráfico real dos tramos, uno construido con zahorra reciclada, fabricada con áridos reciclados mixtos provenientes de RCD, y otro construido con zahorra de cantera, fabricada con materiales naturales.

Los tramos de estudio se encuentran situados en la obra de la “Conexión de la A-367 (desde la Venta del Cordobés) con la A-357”, en la provincia de Málaga, que se corresponden en la actualidad con los primeros cinco kilómetros de la carretera “A-367 Ardales-Ronda”. Los materiales de la investigación se ubicaron en los ramales de aceleración y deceleración que unen la A-357 (carretera Campillos-Málaga) con la A-367 y formaron parte del firme clasificado como flexible.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS	I
RESUMEN	III
ÍNDICE DE TABLAS	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
1. INTRODUCCIÓN	1
2. ESTADO DEL ARTE.....	5
2.1. DEFINICIÓN DE RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN	5
2.2. EL MARCO NORMATIVO	8
2.3. LA REUTILIZACIÓN DE LOS RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN.....	12
3. OBJETIVOS.....	23
3.1. OBJETIVO GENERAL	23
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	23
4. METODOLOGÍA.....	27
4.1. ESPECIFICACIONES DEL MATERIAL RECICLADO	28
4.2. ESPECIFICACIONES DE LA ZAHORRA ARTIFICIAL DE CANTERA	40
4.3. PROCESO DE FABRICACIÓN DEL MATERIAL RECICLADO	41
4.3.1. DEMOLICIÓN.....	42
4.3.2. DESCARGA DEL MATERIAL.....	42
4.3.3. CARGA Y TRANSPORTE A PLANTA DE TRATAMIENTO	43
4.3.4. PROCESO DE TRATAMIENTO DEL ÁRIDO	43
4.3.5. ALMACENAMIENTO	44
4.4. TRAMOS DE INVESTIGACIÓN	46
4.4.1. DESCRIPCIÓN DE LOS TRAMOS DE INVESTIGACIÓN	46
4.4.2. SECCIONES TIPO.....	47
4.5. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES	49
4.6. PUESTA EN OBRA	50
4.6.1. PREPARACIÓN DE LA SUPERFICIE QUE VA A RECIBIR LA ZAHORRA.....	51
4.6.2. PREPARACIÓN DEL MATERIAL	51
4.6.3. PUESTA EN OBRA.....	51
4.7. PLAN DE ENSAYOS DURANTE LA EJECUCIÓN	53
4.8. PLAN DE ENSAYOS DE EVOLUCIÓN	57
4.8.1. INSPECCIÓN VISUAL.....	57
4.8.2. DEFLEXIONES	57
4.8.2.1. CÁLCULO DIRECTO.....	58
4.8.2.2. CÁLCULO INVERSO	60
4.8.3. ELABORACIÓN DEL PLAN DE CONTROL DE EVOLUCIÓN.....	63
5. RESULTADOS	67
5.1. ESPECIFICACIONES DE LOS MATERIALES.....	67
5.2. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES	67
5.2.1. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO:	68
5.2.2. FORMA DEL ÁRIDO GRUESO.....	70
5.2.3. PORCENTAJE DE PARTÍCULAS TRITURADAS O FRACTURADAS (% EN MASA)	70
5.2.4. RESISTENCIA A LA FRAGMENTACIÓN	71
5.2.5. REQUISITOS QUÍMICOS.....	71
5.2.6. LIMPIEZA.....	72
5.2.7. PLASTICIDAD	72
5.2.8. PRÓCTOR MODIFICADO. DENSIDAD MÁXIMA Y HUMEDAD ÓPTIMA	72
5.3. RESULTADOS DE LA PUESTA EN OBRA	74

5.3.1.	ENSAYO DE COMPACTACIÓN. DENSIDAD Y HUMEDAD IN SITU.	74
5.3.2.	ENSAYO DE CARGA CON PLACA.....	77
5.3.3.	DEFLEXIONES. AUSCULTACIÓN DE ALTO RENDIMIENTO (ADAR)	78
5.4.	RESULTADOS DEL PLAN DE ENSAYOS DE EVOLUCIÓN.....	88
5.4.1.	INSPECCIÓN VISUAL.....	88
5.4.2.	EVOLUCIÓN DE LAS DEFLEXIONES.....	90
5.4.3.	EVOLUCIÓN MEDIANTE EL CÁLCULO INVERSO.....	93
5.4.4.	ESTUDIO DE LA AUTOCEMENTACIÓN EN LA ZAHORRA DE ÁRIDOS RECICLADOS.....	95
6.	CONCLUSIONES.....	101
7.	FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	105
8.	BIBLIOGRAFÍA.....	109

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Codificación de RCD según la Lista Europea de Residuos	6
Tabla 2. Generación de RCD en España, 2004-2012 (tn)	7
Tabla 3. Objetivos cuantitativos del II Plan Nacional de residuos de construcción y demolición	9
Tabla 4: Categoría de los contenidos de los componentes en los áridos gruesos reciclados. UNE 13242:2003+A1	30
Tabla 5. Plan de Ensayos en origen para la zahorra reciclada y de cantera.....	34
Tabla 6. Husos granulométricos para las zahorras artificiales fijados por el PG-3	35
Tabla 7. Tamices de barras a utilizar según la fracción granulométrica en el ensayo del índice de lajas	37
Tabla 8. Tabla resumen de especificaciones para zahorra reciclada y de cantera.	41
Tabla 9. Tolerancias admisibles respecto de la fórmula de trabajo en zahorra artificial.	49
Tabla 10. Ensayos de caracterización del material reciclado y de cantera.	50
Tabla 11. Ensayos para la puesta en obra del material natural y reciclado.....	54
Tabla 12. Ensayos de análisis granulométrico en zahorra artificial de cantera.	68
Tabla 13. Ensayos de análisis granulométrico en zahorra de áridos reciclados.	69
Tabla 14. Resultados del ensayo de desgaste de los Ángeles para ambos tipos de zahorra.....	71
Tabla 15. Resultados del ensayo del equivalente de arena para ambos tipos de zahorra.....	72
Tabla 16. Resultados del ensayo Próctor Modificado en zahorra artificial.....	73
Tabla 17. Resultados del ensayo Próctor Modificado en zahorra de áridos reciclados.....	74
Tabla 18. Resultados del ensayo de compactación en zahorra artificial de cantera.	75
Tabla 19. Resultados del ensayo de compactación en zahorra de áridos reciclados.	76
Tabla 20. Resultados del ensayo de placa de carga de ambas zahorras.....	77
Tabla 21. Deflexiones sobre zahorra procedente de RCD en ramal 1	80
Tabla 22. Deflexiones sobre capa intermedia de aglomerado en Ramal 1.....	81
Tabla 23. Deflexiones sobre capa de rodadura en Ramal 1	82
Tabla 24. Deflexiones sobre zahorra de cantera en ramal 2.....	84

Tabla 25. Deflexiones sobre capa intermedia de aglomerado en Ramal 2.....	85
Tabla 26. Deflexiones sobre capa de rodadura en Ramal 2	86
Tabla 27. Valores de deflexiones teóricas y medias en Ramal 1.....	87
Tabla 28. Valores de deflexiones teóricas y medias en Ramal 2.....	87
Tabla 29. Evolución de deflexiones sobre capa de rodadura en Ramal 1.....	90
Tabla 30. Evolución de deflexiones sobre capa de rodadura en Ramal 2.....	91
Tabla 31. Módulos teóricos de elasticidad.....	93
Tabla 32. Módulos obtenidos según el cálculo inverso en el ramal 1	94
Tabla 33. Módulos obtenidos según el cálculo inverso en el ramal 2	94

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Generación de RCD en los principales países de la UE (Kg /hab x año)	7
Figura 2. Fases de la metodología	27
Figura 3. Residuos cerámicos (a), de hormigón (b) y asfálticos (c)	31
Figura 4. Determinación del volumen de las partículas flotantes.....	32
Figura 5.Fases del proceso de reciclaje de RCD	41
Figura 6. Proceso de demolición de la obra de construcción	42
Figura 7. Planta de Aristerra en Málaga.....	42
Figura 8. Retroexcavadora de cadenas con pinza hidráulica.	44
Figura 9. Cintas transportadoras y acopios de distintas granulometrías.....	45
Figura 10. Esquema proceso productivo.....	45
Figura 11. Vista aérea del tramo de prueba ejecutado.....	47
Figura 12. Sección tipo terraplén para Zahorra artificial de RCD.....	48
Figura 13. Sección tipo terraplén para Zahorra artificial de cantera.	49
Figura 14. Equipos utilizados en la puesta en obra.....	50
Figura 15. Fases de puesta en obra de la zahorra reciclada y natural	52
Figura 16. Ejemplo de curva para el Ensayo Próctor.....	54
Figura 17. Aparato densímetro nuclear	56
Figura 18. Vehículo deflectómetro de impacto	59
Figura 19. Esquema de funcionamiento del deflectómetro.	59
Figura 20. Variables para el cálculo directo e inverso.....	60
Figura 21. Esquema de cálculo inverso.	62
Figura 22. Cronograma de ensayos de control ADAR	63
Figura 23. Comparativa del análisis granulométrico para ambos tipos de zahorra.....	70
Figura 24. Croquis control ADAR.....	78
Figura 25. Deflexiones teóricas para la capa del firme del Ramal 1	79

Figura 26. Deflexiones teóricas para la capa del firme del Ramal 2	79
Figura 27. Deflexiones sobre zahorra procedente de RCD en ramal 1	81
Figura 28. Deflexiones sobre capa intermedia de aglomerado en Ramal 1	82
Figura 29. Deflexiones sobre capa de rodadura en Ramal 1.....	83
Figura 30. Deflexiones sobre zahorra de cantera en ramal 2	84
Figura 31. Deflexiones sobre capa intermedia de aglomerado en Ramal 2	85
Figura 32. Deflexiones sobre capa de rodadura en Ramal 2.....	86
Figura 33. Evolución visual del Ramal 1	88
Figura 34. Evolución visual del Ramal 2	89
Figura 35. Evolución de deflexiones medias en Ramal 1	91
Figura 36. Evolución de deflexiones medias en Ramal 2	92
Figura 37. Probeta-testigo del ramal 1.....	97
Figura 38. Probeta-testigo del ramal 1 ensayada a compresión.....	97

1 INTRODUCCIÓN

1. INTRODUCCIÓN

Las obras de construcción de infraestructuras, edificaciones de nueva planta y obras de demolición son las responsables de la generación de los Residuos de Construcción y Demolición (RCD) y suponen una corriente de residuos de gran volumen.

El impacto ambiental negativo que generan estos residuos se debe al impacto visual que produce su acopio, muchas veces en vertederos incontrolados, junto con el despilfarro de materias primas que se produce si no se prevé su reciclaje.

Cada vez es mayor la presión social impulsada por la concienciación ciudadana para potenciar el reciclaje de residuos, tanto los derivados de esta actividad como los procedentes de otros sectores.

En este marco, la construcción de infraestructuras como carreteras supone una vía para llevar a cabo la reutilización de residuos como sustitución de áridos naturales. Así, no solo se produce un ahorro en el consumo de recursos naturales y una disminución del impacto ambiental asociado a su extracción y transporte, sino también la reducción de los volúmenes de residuos que se acumulan en los vertederos. Una de las actividades para la consecución de este objetivo es la sustitución total o parcial de capas de áridos naturales del firme, como zahorras, por áridos reciclados.

En el año 2007 el uso de áridos reciclados en Andalucía se orientaba, principalmente, a unidades de obra sin requisitos estructurales, como podría ser su empleo en caminos, y con tasas de reciclados (similares al resto de España) en el entorno del 5% (Plan Nacional Integrado de Residuos (PNIR) 2008-2015) muy inferior a las exigidas por las Directivas Europeas y Planes Nacionales.

Las causas de estos bajos porcentajes de reciclados de RCD eran muy diversas, pero operativamente se podían indicar tres motivos: desconocimiento técnico de las características de los áridos RCD y de las prestaciones que aportaban a las obras con ellos ejecutadas, la normativa vigente no fomentaba el empleo de estos materiales y las plantas de tratamiento de RCD no garantizaban la homogeneidad y calidad de los áridos que producían.

En los últimos años se ha hecho un esfuerzo por desarrollar normativas, directrices e investigaciones que tienen como objetivo la gestión de los residuos de la construcción y la demolición (Directiva 2008/98/CE). El propósito es fomentar la reutilización, el reciclado y otras formas de valorización para contribuir al desarrollo sostenible en la actividad desarrollada en el sector de la construcción.

En esta tesis se va a analizar el comportamiento, en condiciones de uso de tráfico real, de firmes contruidos con capas de material procedente de residuos de construcción y demolición.

2 ESTADO DEL ARTE

2. ESTADO DEL ARTE

2.1. DEFINICIÓN DE RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN

Son muchas las definiciones que podemos encontrar de residuos de construcción y demolición. La normativa vigente es la que define legalmente el término.

La Directiva Marco de Residuos 2008/98/CE define el término «residuo» como aquella sustancia u objeto de la que el poseedor tenga la intención o la obligación de desprenderse.

Según 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, un residuo de construcción y demolición (RCD) legalmente es 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 (ya derogada, sustituida por la Ley 22/2011 del 28 de julio pero coincidente en el mismo artículo), se genera en una obra de construcción, rehabilitación, reparación, reforma o demolición de un edificio, así como en cualquier obra de ingeniería civil.

Los residuos de construcción y demolición aparecen codificados en la Lista Europea de Residuos (capítulo 17) de la Directiva Marco de Residuos, aprobada por Orden MAN/304/2002. En la tabla 1 se enumeran dichos residuos.

CÓDIGO DENOMINACIÓN

17	RESIDUOS DE LA CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN (INCLUIDA LA TIERRA EXCAVADA DE ZONAS CONTAMINADAS)
17 01	Hormigón, ladrillos, tejas y materiales cerámicos.
17 01 01	Hormigón.
17 01 02	Ladrillos.
17 01 03	Tejas y materiales cerámicos.
17 01 06*	Mezclas, o fracciones separadas, de hormigón, ladrillos, tejas y materiales cerámicos, que contienen sustancias peligrosas.
17 01 07	Mezclas de hormigón, ladrillos, tejas y materiales cerámicos distintas de las especificadas en el código 17 01 06.
17 02	Madera, vidrio y plástico.
17 02 01	Madera.
17 02 02	Vidrio.
17 02 03	Plástico.
17 02 04*	Vidrio, plástico y madera que contienen sustancias peligrosas o están contaminados por ellas.
17 03	Mezclas bituminosas, alquitrán de hulla y otros productos alquitranados.
17 03 01*	Mezclas bituminosas que contienen alquitrán de hulla.
17 03 02	Mezclas bituminosas distintas de las especificadas en el código 17 03 01.
17 03 03*	Alquitrán de hulla y productos alquitranados.

CÓDIGO	DENOMINACIÓN
17	RESIDUOS DE LA CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN (INCLUIDA LA TIERRA EXCAVADA DE ZONAS CONTAMINADAS)
17 04	Metales (incluidas sus aleaciones).
17 04 01	Cobre, bronce, latón.
17 04 02	Aluminio.
17 04 03	Plomo.
17 04 04	Zinc.
17 04 05	Hierro y acero.
17 04 06	Estaño.
17 04 07	Metales mezclados.
17 04 09*	Residuos metálicos contaminados con sustancias peligrosas.
17 04 10*	Cables que contienen hidrocarburos, alquitrán de hulla y otras sustancias peligrosas.
17 04 11	Cables distintos de los especificados en el código 17 04 10.
17 05	Tierra (incluida la excavada de zonas contaminadas), piedras y lodos de drenaje.
17 05 03*	Tierra y piedras que contienen sustancias peligrosas.
17 05 04	Tierra y piedras distintas de las especificadas en el código 17 05 03.
17 05 05*	Lodos de drenaje que contienen sustancias peligrosas.
17 05 06	Lodos de drenaje distintos de los especificados en el código 17 05 05.
17 05 07*	Balasto de vías férreas que contienen sustancias peligrosas.
17 05 08	Balasto de vías férreas distinto del especificado en el código 17 05 07.
17 06	Materiales de aislamiento y materiales de construcción que contienen amianto.
17 06 01*	Materiales de aislamiento que contienen amianto.
17 06 03*	Otros materiales de aislamiento que consisten en, o contienen, sustancias peligrosas.
17 06 05*	Materiales de construcción que contienen amianto.
17 08	Materiales de construcción a partir de yeso.
17 08 01*	Materiales de construcción a partir de yeso contaminados con sustancias peligrosas.
17 08 02	Materiales de construcción a partir de yeso distintos de los especificados en el código 17 08 01.
17 09	Otros residuos de construcción y demolición.
17 09 01*	Residuos de construcción y demolición que contienen mercurio.
17 09 02*	Residuos de construcción y demolición que contienen PCB (por ejemplo, sellantes que contienen PCB, revestimientos de suelo a partir de resinas que contienen PCB, acristalamientos dobles que contienen PCB, condensadores que contienen PCB).
17 09 03*	Otros residuos de construcción y demolición (incluidos los residuos mezclados) que contienen sustancias peligrosas.
17 09 04	Residuos mezclados de construcción y demolición distintos de los especificados en los códigos 17 09 01, 17 09 02 y 17 09 03.

* Residuo peligroso

Tabla 1: Codificación de RCD según la Lista Europea de Residuos
Fuente: Orden MAN/304/2002

En la Unión Europea (UE), según los últimos datos del año 2012, se generan alrededor de 820 millones de toneladas de RCD que representan el 31% de los residuos totales generados en la UE. Los datos per cápita varían desde los 4 kg de Letonia a los 13.334 kg de Luxemburgo¹. La evolución de estos datos sigue la gráfica de la figura 1.

¹European Commission, http://ec.europa.eu/environment/waste/construction_demolition.htm

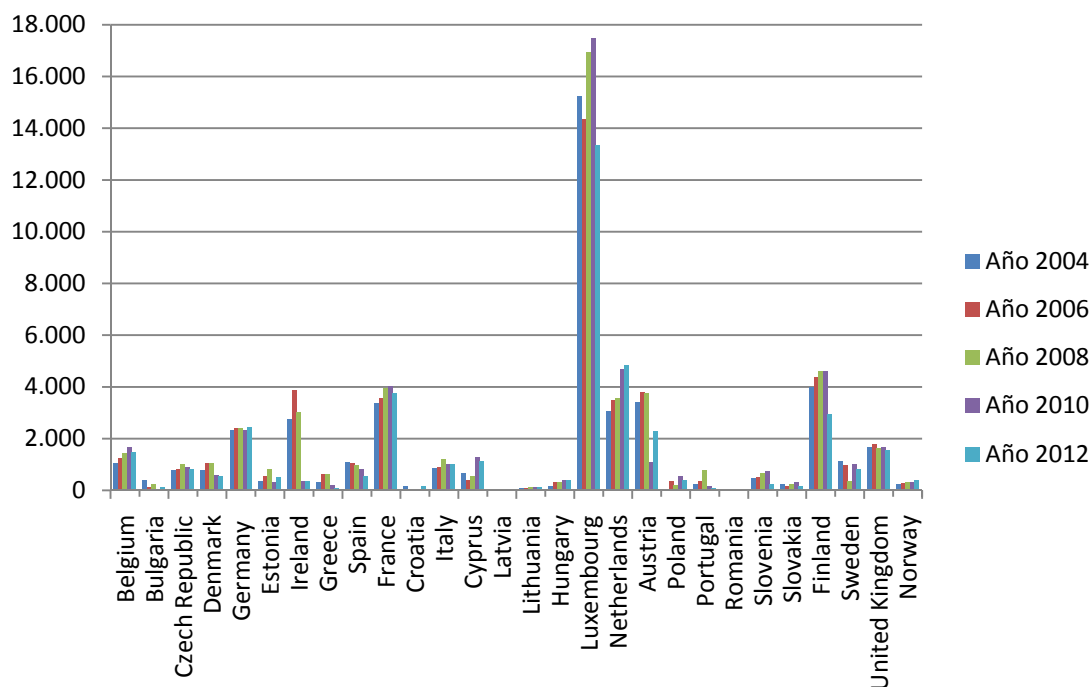


Figura 1. Generación de RCD en los principales países de la UE (Kg /hab x año)
Fuente: http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/waste/data/main_tables

En la figura 1 se observan los signos de crisis económica sufrida en todo el continente. La evolución anual en la generación de RCD ha sido, en general, decreciente, lo cual constituye un signo de la disminución en la actividad constructiva.

La tabla 2 muestra las toneladas de RCD generados en el período 2004-2012 para el caso de España.

PERÍODO	2004	2006	2008	2010	2012
TOTAL RCD GENERADOS	46.319.660	47.323.392	44.926.463	37.946.523	26.129.151

Tabla 2. Generación de RCD en España, 2004-2012 (tn)
Fuente: <http://epp.eurostat.ec.europa.eu>

Como se aprecia en la tabla 2, desde el año 2004 al 2006 la generación de RCD es creciente, aumentando en un millón de toneladas. Del año 2006 al 2008 disminuye en algo más de 3 millones de toneladas, pero partir del año 2008 queda patente la fuerte bajada en la actividad constructiva a consecuencia de la crisis económica, pasando de producirse casi 45 millones de tn de residuos de construcción en 2008 a 26 millones de toneladas en 2012.

Si se analizan los datos por comunidades autónomas, La Rioja y Murcia son las que generan más residuos, 1.391 kg/hab.año y 1.097 kg/hab.año respectivamente (Plan Nacional Integrado de Residuos (PNIR) 2008-2015). Andalucía con 723 kg por habitante y año presenta valores cercanos a la media (755 kg por habitante y año).

2.2. EL MARCO NORMATIVO

Tanto en el ámbito europeo como en el nacional y en las Comunidades Autónomas se ha hecho un gran esfuerzo para desarrollar un marco normativo que fomente el uso del árido reciclado. El marco normativo al que deben ajustarse las ordenanzas municipales obliga a la prevención y gestión de residuos, entre ellos los de construcción y demolición, estableciendo a tal fin objetivos cuantitativos de reciclado. En este punto se hace un breve repaso al mismo.

En el ámbito europeo, la gestión de los RCD es un objetivo prioritario debido al volumen que se genera y al potencial derivado de su valorización. La Directiva marco de residuos 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de noviembre de 2008, es la normativa básica.

Esta Directiva marco integra una serie de Directivas anteriores e incorpora el principio de jerarquía en la producción y gestión de los residuos que ha de centrarse en:

- La prevención
- La preparación para la reutilización
- El reciclaje u otras formas de valorización.

En cuanto a los objetivos de reciclado de RCD, en su artículo 11.2. b indica que antes de 2020 deberá aumentarse hasta un mínimo del 70% de su peso la preparación para la reutilización, reciclado y otra valorización de materiales.

El pasado 2 de julio de 2014, la Comisión Europea adoptó una propuesta legislativa² en respuesta al mandato de la Directiva Marco de Residuos (2008/98/CE), que en su artículo Art 11.4, pide a la Comisión que examine la situación de los residuos de construcción y demolición en la Unión Europea antes del 31 de diciembre de 2014, para reforzar, en caso necesario, los objetivos contemplados en el artículo 11.2.

Esta propuesta modifica la Directiva 2008/98/CE sobre los residuos, y entre otros, eleva el objetivo de preparación para la reutilización y el reciclado de residuos municipales al 80 % para antes del año 2030.

En el ámbito nacional, el Real Decreto 105/2008, de 1 de febrero, regula la producción y gestión de los RCD y tiene como objeto fomentar, por este orden, la prevención, reutilización, reciclado y otras formas de revalorización de los RCD, entre los que se sitúa, obviamente, la valorización del RCD a través de la producción del árido reciclado.

De su articulado, en lo que respecta al empleo de los áridos de reciclado en las obras, destacamos en el artículo 8 que los áridos reciclados procedentes de RCD deberán

² <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52014PC0397>

cumplir los requisitos técnicos legales según el uso al que se destinen. Por otro lado, el artículo 15 expresa la obligación que tienen las administraciones públicas (en la contratación pública) de fomentar el empleo de áridos y otros productos reciclados en las obras para contribuir al ahorro de recursos naturales.

La Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados lleva a cabo la transposición de la Directiva 2008/98/CE al ordenamiento jurídico español, sustituyendo a la anteriormente vigente Ley 10/1998, de 21 de abril, de residuos. En el artículo 22.2.b, se especifican los mismos objetivos de reciclado que los mencionados en la Directiva.

Actualmente está vigente el II Plan Nacional de residuos de construcción y demolición (II PNRCDD) en el marco del Plan Nacional Integrado de Residuos (PNIR) 2008-2015. Para el logro de los objetivos del II PNRCDD, y para el caso de los de demolición y construcción existe un apartado que indica las medidas a tomar, de las que se destaca que la administración pública deberá incluir en los Pliegos de Prescripciones Técnicas de las obras que promueva condiciones que faciliten el empleo de materiales procedentes de RCD en sustitución de materiales naturales. Así mismo, la Administración General del Estado debe proponer modificaciones del Pliego de Prescripciones Técnicas de Obras de Carreteras (PG-3) y la Instrucción sobre Hormigón Estructural (EHE) para incorporar requisitos técnicos sobre el empleo de áridos reciclados en las obras.

Los objetivos ecológicos previsibles recogidos en el II PNRCDD son:

- La prevención en origen de la generación de RCD.
- La aplicación del principio de jerarquía: Maximización de la valorización.
- La mejora de la red de infraestructuras de tratamiento de RCD. Clausura de vertederos inadaptables a la legislación vigente, adaptando los restantes.

En la tabla 3 se resumen los objetivos cuantitativos, en porcentaje, recogidos en el II PNRCDD.

	2008	2012	2015
<i>Recuperación+correcta gestión ambiental Residuos Peligrosos contenidos en los RCD.</i>	80%	95%	100%
<i>Prevención+reutilización.</i>		10%	20%
<i>Reciclaje</i>		25%	40%
<i>Valorización de los Residuos de envases de materiales de construcción</i>		40%	70%

Tabla 3. Objetivos cuantitativos del II Plan Nacional de residuos de construcción y demolición
Fuente: II PNRCDD

Como se observa en la tabla 3, los objetivos exigidos en porcentajes de reutilización, reciclaje y valorización van en aumento progresivo desde el año 2008 al 2015.

Como complemento a la normativa se están llevando a cabo una serie de trabajos de investigación que tienen como objetivo facilitar la gestión de los RCD. Por ejemplo, en el año 2012 se redactó la “Guía Española de Áridos Reciclados procedentes de RCD” en el marco del proyecto GEAR³.

La Norma UNE-EN 13242, de noviembre de 2003, sobre áridos para capas granulares y capas tratadas con conglomerantes hidráulicos para uso en capas estructurales de firmes, posee un “erratum” europeo EN 13242:2002/AC, de fecha octubre de 2004, que especifica que todos los áridos usados en construcción, ya sean reciclados o naturales, deberían cumplir esta norma europea.

En el marco de las Comunidades Autónomas se han desarrollado estrategias y normativas específicas.

La Estrategia Ambiental Vasca de Desarrollo Sostenible (2002-2020), que complementa la Ley 3/98 General de Protección del medio ambiente del País Vasco, establece cinco metas ambientales. En su Meta 2, hace referencia a la “gestión responsable de los recursos naturales y de los residuos” y establece una serie de compromisos orientados a fomentar la reutilización, reciclaje y otras formas de valorización que contribuyan a la rotación de ciclos de materiales. Para la consecución de estos compromisos y para fomentar el uso de áridos reciclados en las obras públicas de la Comunidad Autónoma del País Vasco, el Gobierno Vasco, a través de la sociedad pública Ihobe, redactó en el año 2009 el “Manual de Directrices para el uso de Áridos Reciclados en Obras Públicas de la Comunidad Autónoma del País Vasco”.

Para el caso de Andalucía, el Decreto 73/2012, de 20 de marzo, aprueba el Reglamento de Residuos de la Comunidad Autónoma Andaluza. Esto supone un paso decisivo para conseguir los objetivos establecidos en la legislación de ámbito estatal y autonómico, y en particular, en la Ley 22/2011, de residuos y suelos contaminados, en el Plan Nacional Integrado de Residuos para el período 2008-2015, y en el Decreto 397/2010 por el que se aprueba el Plan Director Territorial de Gestión de Residuos no Peligrosos de Andalucía, 2010-2019.

³La “Guía Española de Áridos Reciclados procedentes de RCD”, (Proyecto GEAR) es una iniciativa de la Asociación Española de Gestores de RCD, (GERD), con el objetivo de caracterizar técnicamente y estandarizar los áridos reciclados obtenidos a partir del reciclaje de los residuos de construcción y demolición.

El proyecto de desarrollo tecnológico va a determinar, en base a la experiencia acumulada por la industria del reciclaje española y al rigor del análisis y la investigación científica de los Centros Tecnológicos y Universidades participantes, las mejores aplicaciones y usos en la obra pública y privada, garantizando la durabilidad y su adecuado comportamiento mecánico y medioambiental. Esta guía comprenderá un conjunto de propuestas de prescripciones técnicas referidas a las principales aplicaciones de los áridos reciclados. Su función es la de presentar los requisitos detallados que deben cumplir los áridos reciclados que van a ser utilizados en estas aplicaciones. El objetivo es garantizar la calidad y seguridad medioambiental de su uso, al establecer prescripciones particulares para los usos recomendados. GUÍA ESPAÑOLA DE ÁRIDOS (RECICLADOS PROCEDENTES DE RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN. Puede consultarse en: <http://www.proyectogear.com/proyecto.cfm#p4>)

El “Plan Director Territorial de Gestión de Residuos no Peligrosos de Andalucía, 2010-2019”, sienta las bases que deberá regir la política de Residuos no Peligrosos en Andalucía. Para cumplir los objetivos se proponen una serie de medidas, entre ellas, una (Medida 95) sobre la potenciación del uso del árido reciclado. Esta medida trata de definir estándares de calidad para los áridos reciclados en función de sus posibles aplicaciones, en complemento a las normativas ya existentes. Y otra (Medida 96) sobre la promoción en el ámbito de la actividad privada del uso de áridos reciclados en sustitución de los naturales.

La Agencia de Obra Pública de la Junta de Andalucía (AOPJA) ha llevado a cabo una serie de proyectos de investigación en diversas carreteras de la Comunidad Autónoma, realizando tramos de prueba de áridos, suelos, zahorras y gravacemento procedentes de RCD en capas del firme. Las conclusiones de parte de estas experiencias sirvieron para la redacción en el año 2010 de unas “Recomendaciones para redacción de Pliegos de especificaciones técnicas para el uso de materiales reciclados de residuos de construcción y demolición (RCD)”⁴. Estas recomendaciones tienen como objeto normalizar su uso en las carreteras de la Junta de Andalucía.

En la actualidad, la AOPJA está trabajando en un proyecto de I+D+i adjudicado a la Universidad de Córdoba en el que colaboran la Asociación de Empresas Gestoras de Residuos de la Construcción y Demolición (AGRECA) y el Centro de Estudios de Materiales y Control de Obra, S.A. (CEMOSA). Este proyecto se denomina “Aplicaciones de los áridos reciclados de residuos de construcción y demolición (RCD), para la construcción sostenible de infraestructuras viarias” y entre sus objetivos está redactar una Guía de áridos reciclados de Andalucía, centrada en su primera fase en la zona de Andalucía Central, y desarrollar e implementar una plataforma Web que sirva de difusión y transferencia de los resultados del proyecto.

A nivel comarcal, se ha elaborado una Ordenanza-marco de residuos de construcción y demolición de la Mancomunidad de la Bahía de Cádiz⁵, así como para la mancomunidad de los Alcores, en Sevilla⁶ y la provincia de Málaga, por parte de la diputación⁷.

A nivel local, las Ordenanzas Municipales deberán adaptarse a la nueva Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados.

Aunque los Pliegos Generales como el PG-3 o la EHE permiten el uso de áridos RCD, en la práctica, las especificaciones técnicas que les exigen lo hacen muy difícil.

Por ejemplo:

⁴ http://www.aopandalucia.es/inetfiles/area_tecnica/Calidad/Recomendaciones_y_pliegos_varios/recomendaciones_residuos_construcion_y_demolicion/recomendaciones_residuos_construcion_y_demolicion_%20edi1_%20abril10.pdf

⁵ http://www.elpuertodesantamaria.es/index.php?art_id=5019

⁶ http://www.coaat-se.es/varios/ficheros_normativa/ordenanza%2015-9-03.pdf

⁷ http://www.consorciorsumalaga.com/subidas/archivos/arc_644.pdf

- El manual de Directrices para el uso de áridos reciclados en obras públicas de la comunidad Autónoma del País Vasco, antes mencionado, expone que los áridos reciclados generados en su comunidad no cumplen, para determinadas aplicaciones, todos los requisitos exigidos por la normativa, por lo que deberían ser rechazados, aunque, según ellos y por las experiencias realizadas estiman que el material resultará válido pese a los incumplimientos.
- El Plan Nacional Integrado de Residuos (PNIR) 2008-2015 reconoce que no se han cumplido los objetivos del Plan anterior (PNIR de 2000-2006). Esto se debe, en parte, a la dificultad de cumplimiento de los requisitos especificados en la normativa para áridos reciclados.
- El PNIR y el Plan Director Territorial de Gestión de Residuos no Peligrosos de Andalucía reconocen que una de las causas por las cuales no se emplean, de una manera habitual, los áridos reciclados en las obras es porque la normativa técnica no fomenta su uso, instando a las diferentes administraciones a modificar dicha normativa, como el PG-3, Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para obras de carreteras y puentes (Ministerio de Fomento, 2008).

En el siguiente apartado se realiza una revisión bibliográfica que permite conocer la evolución en el uso de los áridos reciclados.

2.3. LA REUTILIZACIÓN DE LOS RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN.

La aplicación a gran escala de residuos procedentes de construcción y demolición se inició en Europa y Japón tras la Segunda Guerra Mundial (Nataatmadja y Tan, 2001). Durante el período de reconstrucción tras la guerra, fue necesario, por un lado, satisfacer la enorme demanda de materiales de construcción y, por otro, eliminar los escombros de las ciudades destruidas. Alemania, a finales de 1955, lideraba la reutilización de estos residuos creando plantas de reciclaje que llegaron a suministrar material para construir 175.000 viviendas con áridos procedentes de ladrillos triturados (Schulz y Hendricks, 1992).

Durante este período, la reconstrucción del sistema viario se consideró una prioridad en Europa, haciendo que países como Alemania y Francia fuesen pioneros en el desarrollo de técnicas de reciclaje de RCD como materiales para pavimentos y construcción civil (Von Stein, 2000).

Durante los años 70 y 80 en Europa y en Estados Unidos el interés hacia el reciclaje creció y, en relación con los RCD, la atención se centró en los escombros de

construcción y demolición que habían sido recogidos por separado. Pero, no sería hasta finales de los años 80, en Estados Unidos, a causa de la subida en muchos municipios del coste de los vertederos, cuando el sector público comienza a considerar la recuperación de los RCD como una alternativa desde el punto de vista económico (Rodríguez et al., 2007).

En los últimos años se ha incrementado el uso de los RCD debido al esfuerzo que se está haciendo por parte de los gobiernos y administraciones para fomentar la reutilización, el reciclado y otras formas de valorización para contribuir al desarrollo sostenible en la actividad desarrollada en el sector de la construcción (Solís-Guzmán et al., 2009).

A pesar de ello, España muestra una baja tasa de reciclado. Las tasas de reciclado y reutilización en la Unión Europea para los RCD varían entre los estados miembros. En España es del 14% frente a países con gran porcentaje de reciclado como Holanda (98%) y Alemania (94%). La media del porcentaje de reciclaje es del 46% para toda la Unión Europea (European Commission DG ENV, 2011).

España deber realizar un gran esfuerzo para cumplir el objetivo de la Directiva marco de residuos 2008/98/CE en la que recoge que antes del año 2020, se reutilice y recicle un mínimo del 70 % del peso de los Residuos de Construcción y Demolición que se generen, y aún más, tras la propuesta de la modificación de la Directiva, por parte de la Comisión Europea, en Julio de 2014, en la que se amplía el objetivo al 80% antes del año 2030.

La reutilización y reciclado de productos de construcción y demolición está despertando cada vez más el interés de la sociedad y de las administraciones, gracias a una mayor conciencia en relación con los impactos ambientales provocados por el vertido de residuos en vertederos. Chong y Muhammed (2009) realizaron una investigación en EE.UU. en diversas empresas con profesionales de la construcción. Ello les permitió obtener algunas conclusiones como:

- la falta de incentivos a constructores para reutilizar RCD
- los costes adicionales del reciclado no deben recaer en los constructores sino en las administraciones y en los promotores
- se debe reducir el coste del reciclaje, ya que el coste es una variable fundamental en el éxito de las políticas que fomentan el uso de los RCD.

Para conseguir este último objetivo, los proyectistas y los promotores deberían estudiar las zonas de acopio utilizadas para reutilizar y reciclar, lo que permitiría determinar el coste del transporte, con lo que se podría reducir el coste del reciclaje. De esta manera, el constructor podrá incluirlo en su oferta de licitación ya que, si no se

considera en el proyecto inicial, la modificación del mismo para considerar el reciclado puede hacer que se dispare en presupuesto y el promotor deberá pagar más.

Solís-Guzmán et al. (2009) estudiaron fórmulas y métodos que permiten controlar la generación de residuos desde el proyecto de construcción. Elaboraron un método para determinar el volumen de residuos que se generarían tanto en obras de nueva construcción como en proyectos de demolición de viviendas. Los resultados obtenidos permiten calcular el aval que el contratista (o el titular de la licencia de obras) debe pagar al Ayuntamiento, y que recuperará cuando presente los certificados emitidos por las plantas de tratamiento autorizadas. De este modo se reduce casi al mínimo el control en el seguimiento, para verificar la eliminación de estos residuos, por parte de la Administración. Este modelo se desarrolló con éxito en Los Alcores (Sevilla).

Se han realizado otros estudios similares (Rodríguez et al., 2007 y Morán del Pozo et al., 2011) concluyendo de forma similar a investigaciones realizadas en EE.UU (Chong y Muhammed, 2009). En dichos estudios se promueve en las obras el establecimiento de modelos de demolición y recogida selectiva en origen. Para ello los promotores deben aceptar partidas específicas para la gestión de los RCD en los presupuestos de las obras, e incluir en los pliegos de condiciones técnicas los planes de gestión de residuos, así como el uso de materiales reciclados. Así mismo, deben establecerse los mecanismos de coordinación necesarios para posibilitar la reutilización de excedentes de tierras y materiales pétreos en otras obras, que se estén ejecutando o que estén previstas en la zona.

Con el objetivo de concienciar a las administraciones, la Asociación Española de Gestores de Residuos de Construcción y Demolición creó, en Noviembre de 2010 un documento informativo⁸ en colaboración con los Ayuntamientos, debido a que la mayoría desconocían o no aplicaban correctamente la legislación relativa a los RCD. En el mismo se les emplaza a que hagan uso de sus competencias, en relación con los RCD, para que el control de flujos de residuos esté regulado y se termine con la práctica habitual de gestión ilegal o de vertidos incontrolados en los entornos de las ciudades y para lograr que se fomente el reciclaje, incorporando los áridos y materiales reciclados en los pliegos municipales de obras a concurso.

Así mismo, se recuerda a los responsables de la gestión municipal que el artículo 6 del RD/105/2008 establece que las comunidades autónomas podrán exigir, al productor de los RCD, una fianza u otra garantía financiera equivalente, condicionada a la obtención de la licencia municipal de obras, con objeto de garantizar el cumplimiento de las obligaciones que impone este real decreto.

⁸Control de los Residuos de Construcción y Demolición, RCD, en los Ayuntamientos, Noviembre 2010, <http://www.gerd.es/wp-content/uploads/2010/12/Cuadernillo-de-Ayuntamientos.pdf>

Otros autores centran sus investigaciones en la percepción de los agentes que intervienen en el proceso constructivo en relación con la gestión de los RCD. Chong y Muhammed (2009) concluyeron que se debe cambiar la mentalidad de los constructores para que interioricen que reciclar y reutilizar no es difícil. Los recursos adicionales que se necesitan no deben ser percibidos negativamente y ser conscientes de los beneficios del reciclado.

La reutilización de estos residuos supone un importante beneficio medioambiental, debido a que se reutilizan y se reduce la explotación de canteras y graveras en el medio natural. Hay casos en los que “la necesidad obliga”, zonas cuya superficie es muy limitada (p.ej., el caso de las islas), en las que los recursos son limitados y su importación supone un coste muy elevado, causado por el encarecimiento del transporte. El reciclaje supone una alternativa más económica y sostenible, ya que supone la no demanda de producción de áridos de cantera y reduce considerablemente el material que va a vertedero (Mas et al., 2012). En Kuwait se prohibió la producción de áridos gruesos en canteras locales por su impacto ambiental, lo que incrementaba enormemente los costes para importarlos de países vecinos como Emiratos Árabes Unidos (Rahal, 2007).

En el País Vasco, en estos últimos años, los áridos reciclados mixtos han sido usados en aplicaciones de bajo valor añadido como relleno de puertos, pistas forestales y sistemas de cobertura de vertederos (Vegas et al., 2011).

Incluso hay estudios de laboratorio (Taha et al., 2004; Vegas et al., 2008; Ebrahimi et al., 2012) que indican la potencial reutilización de estos materiales y otros de procedencia industrial, como polvo de horno de cemento, escorias de cobre, suelos contaminados de petróleo, cenizas de incineración y otros... en pavimentos asfálticos, suelos estabilizados y como materiales cementados.

También se ha investigado sobre el uso de áridos reciclados en hormigón, tanto estructural como no estructural (Agrela et al., 2011).

En relación al hormigón no estructural, varios autores (Poon, 2004; Rahal, 2007; Mas et al., 2012) concluyeron que la característica más importante para este uso es la elevada absorción de agua de los áridos reciclados, con lo que para mantener la relación agua/cemento constante se hace necesario añadir aditivos plastificantes que compensen la pérdida de trabajabilidad producida por estos áridos. Todos los estudios anteriores concluyeron que es viable la sustitución de áridos reciclados mixtos hasta en un 40%, cumpliendo la normativa. Porcentajes mayores provocan que se pierda resistencia a compresión. La limitación más restrictiva para estos áridos es el contenido en sulfatos.

En relación al empleo de áridos reciclados para su aplicación en la fabricación de hormigones estructurales, los estudios se han limitado a bajos porcentajes de

sustitución de árido natural por reciclado (Etxeberría, 2007). Por ejemplo, en Holanda se ejecutó, en 1988, un viaducto y una exclusiva marina reemplazando el 20% de los áridos de hormigón por reciclados y en 1999, se ejecutó en Gran Bretaña un edificio de oficinas con hormigón estructural que contenía áridos reciclados (Poon et al., 2002).

Estos últimos autores indican que el uso limitado de árido reciclado en hormigón estructural se debe a la inherente deficiencia de este tipo de material, por ser más poroso y con mayores valores de absorción de agua. Los resultados de sus investigaciones mostraron que reemplazar hasta un 20% en peso de árido natural por reciclado ejerce poco efecto en las propiedades del hormigón. Un mayor porcentaje traduce la mayor capacidad de absorción de agua del árido reciclado, en una demanda total más elevada de agua. Esto dificulta la trabajabilidad del hormigón y afecta sus propiedades generales. Beltrán et. Al. (2014) estudiaron compensar esta disminución en la calidad del hormigón mediante la adición de cemento.

Sin embargo, las desventajas de usar áridos reciclados en hormigón estructural se difuminan en su uso para la fabricación de adoquines y bloques de hormigón, al estar mecanizada su fabricación con moldes en los que los materiales se mezclan bajo una acción combinada de vibración y compactación. Esto hace que los requerimientos para mantener la trabajabilidad no sean tan importantes (Poon et al., 2002). Los resultados de laboratorio mostraron que si se sustituyen áridos naturales por reciclados (gruesos y finos) en un porcentaje entre un 25 y 50% se produce un bajo efecto en la resistencia de compresión de adoquines y bloques y sin embargo, porcentajes mayores al 50% la reducen.

También se ha estudiado la utilización de la fracción fina de áridos reciclados en la producción de morteros de albañilería (Jiménez et al., 2012a; Ledesma et al., 2014).

Otra aplicación de los áridos reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición es como base y subbase de carreteras y pavimentos rurales. Las investigaciones realizadas en laboratorio sobre este campo son numerosas.

Así, Poon and Chan (2006) y Barbudo et al. (2011) investigaron sobre la composición del material final a reciclar en la subbase de las carreteras, demostrando la mayor absorción de humedad de los áridos reciclados frente a los naturales y que la sustitución de áridos reciclados procedentes de hormigón, por áridos procedentes de ladrillos cerámicos incrementa además el contenido de humedad óptimo y disminuye la densidad seca máxima. Esto se debe a que la capacidad de absorción de la arcilla del ladrillo es mayor que la de los áridos procedentes de hormigón.

El valor de la capacidad de soporte del material que conforma la capa, medido por el valor del California Bearing Ratio (CBR) según el ensayo UNE 103502 (AENOR, 1995), es menor para materiales reciclados (Jiménez et al., 2011a) y en cuanto a composición, el

valor de CBR disminuye conforme se aumenta la proporción de áridos procedentes de materiales cerámicos y disminuye la de áridos procedentes de hormigón.

La composición y el esfuerzo de compactación son factores importantes en el comportamiento físico y mecánico de los áridos de RCD, por lo que el control del material reciclado se debe realizar rigurosamente, antes y después de su aplicación (Molenaar y Van Nierkerk, 2002; Leite et al., 2011). Martín Morales et al. (2013) refuerzan la idea de mejorar la calidad del árido reciclado, eliminando manualmente el yeso antes de la trituración en planta o seleccionando el material con un mayor cuidado al inicio del proceso. Modificando el procedimiento de fabricación en las plantas de residuos de construcción y demolición se puede obtener una distribución granulométrica adecuada, de acuerdo con los requisitos del PG-3 y el uso previsto del árido.

En general, las propiedades críticas de los RCD para su utilización como material granular en la construcción de carreteras en capas estructurales del firme de carretera, son el contenido en compuestos de azufre y el desgaste de los Ángeles (Vegas et al., 2008; Jiménez et al., 2011a).

Estas conclusiones, obtenidas de ensayos de laboratorio, han sido corroboradas al realizar aplicaciones reales en tramos de carreteras. Es interesante conocer el comportamiento de estos materiales en condiciones de tráfico real. La construcción de tramos experimentales es un paso importante para poder desarrollar nuevas normativas y especificaciones técnicas, así como para incrementar el conocimiento de la puesta en obra de materiales reciclados.

En este campo el número de investigaciones es menor. En la mayoría de aplicaciones estudiadas se comparan resultados tras la ejecución en obra, de un tramo compuesto por áridos naturales con otro en el que se ha empleado áridos reciclados.

A continuación, se relaciona una serie de investigaciones que tienen como base el análisis del comportamiento de los firmes en condiciones de tráfico real.

En Corea, Park (2003) estudió el comportamiento de los áridos reciclados procedentes de hormigón, utilizados como base y subbase de un pavimento de hormigón en 10 km de carretera, frente a otros 80 km de las mismas características pero con áridos naturales. El estudio resultante muestra la viabilidad de los áridos reciclados bajo pavimentos de hormigón.

Jiménez et al. (2011b) estudiaron el comportamiento e impacto ambiental de áridos reciclados procedentes de RCD y lo compararon con áridos naturales en la construcción del firme de un camino rural. Se construyeron dos tramos de 100 m cada uno en Córdoba, utilizando para ambos una capa base de 20 cm con una zahorra mezcla de áridos reciclados (de hormigón en un 35% y cerámicos en un 27%) y la rodadura con

una capa de zahorra de 15 cm de espesor, en un tramo de áridos naturales y en el otro de áridos reciclados procedentes de hormigón. Concluyeron que ambas zahorras cumplían con las especificaciones técnicas españolas (ensayos de compactación, densidad, placa de carga e IRI). El punto crítico, según esta investigación, es el incumplimiento por parte de la zahorra reciclada del contenido de sulfatos, pero que se puede llegar a un contenido del 1,3% sin que afecte a la calidad del camino rural. También concluyeron que el uso de áridos reciclados no presenta riesgo de contaminación ambiental al suelo, al firme o a los acuíferos.

Jiménez et al. (2012b) evaluaron la ejecución y el impacto ambiental de áridos reciclados de baja calidad procedentes de RCD, no tratados inicialmente en planta y los compararon con áridos naturales en condiciones de campo, colocándolos en un camino rural no pavimentado, obteniendo resultados satisfactorios.

Agrela et al. (2012) realizaron una investigación controlando el material desde el origen, donde se recogen los RCD utilizados, su procesamiento en planta para la obtención de los áridos reciclados, la fabricación del material tratado con cemento y su aplicación real en una obra como sub-base de un ramal de acceso de la autovía Nueva Ronda Oeste en Málaga. Se fabricó gravacemento con áridos procedentes de residuos de hormigón y mampostería. En ese estudio se sustituía el 100% de la fracción granulométrica, de manera que se comparaban dos secciones de carretera en las que se aplicaban dos tipos de áridos reciclados mixtos tratados con cemento, y una sección con áridos naturales. Se concluía que, dos años después de ser ejecutado, los áridos reciclados presentaban un adecuado comportamiento mecánico y pocas deformaciones del firme. Pérez et al. (2013) realizaron una experiencia en la que se emplearon RCA (áridos reciclados de hormigón) para la fabricación de un material granular tratado con cemento de altas prestaciones, el cual se aplicó en la sub-base de una carretera. Los resultados mostraron que el comportamiento de los reciclados era similar al de los tramos ejecutados con áridos naturales, tanto a corto como a largo plazo, por lo que la aplicación de RCA tratados con cemento para la aplicación en sub-bases de carreteras, se plantea como una alternativa real.

En la actualidad, se está incrementado el uso de los áridos reciclados en aplicaciones que cada vez requieren más calidad. Buena prueba de ello son los Proyectos de Vías ciclistas que están en redacción y otros que han sido finalizados entre 2013 y 2014, por parte de la AOPJA, en los que los áridos reciclados forman parte de la base del firme del carril ciclista. El reciclado debe incentivarse desde las administraciones, dando los instrumentos adecuados que ayuden a controlar su calidad. En este sentido, la AOPJA está inmersa en la actualidad en un convenio de investigación con la Universidad de Córdoba ("Aplicaciones de los áridos reciclados de residuos de construcción y demolición (RCD) para la construcción sostenible de infraestructuras viarias en Andalucía central") cuyo objetivo es ampliar y mejorar las especificaciones técnicas de

éstos áridos, aportar nuevas experiencias y tramos tecnológicos de ensayo, y reducir la imagen de producto de dudosa fiabilidad que limita su uso en la construcción de carreteras.

En resumen, la limitación de los recursos naturales, el impacto ambiental que la extracción de áridos naturales provoca, el aumento de precios de la materia prima y el alto volumen de residuos a tratar en vertederos, con su consecuente impacto ambiental, son motivos suficientes para que la reutilización de los residuos de construcción y demolición sea cada vez mayor. Es fundamental que desde las administraciones se fomente e incentive su uso estableciendo la normativa que asegure la calidad final del producto.

Aunque los estudios llevados a cabo en laboratorio son muy numerosos, las aplicaciones en condiciones de tráfico real, como el que se propone en esta tesis, por la dificultad que entrañan, son mucho menos frecuentes.

3 OBJETIVOS

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GENERAL

El objetivo general que da título a esta tesis es analizar el comportamiento de firmes, contruidos con material procedente de residuos de construcción y demolición (RCD), en condiciones de uso de tráfico real.

Se estudiará la idoneidad técnica de estos materiales reciclados, definiendo unas características mínimas en cuanto a requisitos geométricos, físicos, químicos, de limpieza y plasticidad. Incluye el proyecto un tramo de investigación en condiciones de tráfico real, con el fin de contrastar las prestaciones y el comportamiento de los materiales reciclados frente a los tradicionales.

La consecución de dicho objetivo general se concreta en el logro de unos objetivos específicos que marcarán el desarrollo de la investigación.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

La hipótesis que da base a esta investigación es que los firmes de zahorra, de áridos procedentes de RCD, tienen el mismo comportamiento que los firmes de zahorras de áridos naturales.

Los objetivos específicos de esta tesis son los siguientes:

1. Determinar las características de los materiales procedentes de RCD y la idoneidad de su uso como capa del firme.
2. Analizar la singularidad de la puesta en obra de RCD.
3. Verificar la evolución del comportamiento del firme, comparándolo con otra sección de referencia, que se ejecutará en las mismas condiciones pero con empleo de materiales tradicionales.

4 METODOLOGÍA

4. METODOLOGÍA

En este capítulo se expone la metodología seguida durante el desarrollo de la investigación. En la figura 2 se describen, gráficamente, los pasos que se han llevado a cabo para poder cumplir con los diferentes objetivos propuestos. La metodología se ha estructurado en diferentes fases ordenadas cronológicamente, coincidiendo con los objetivos específicos marcados en el capítulo anterior.

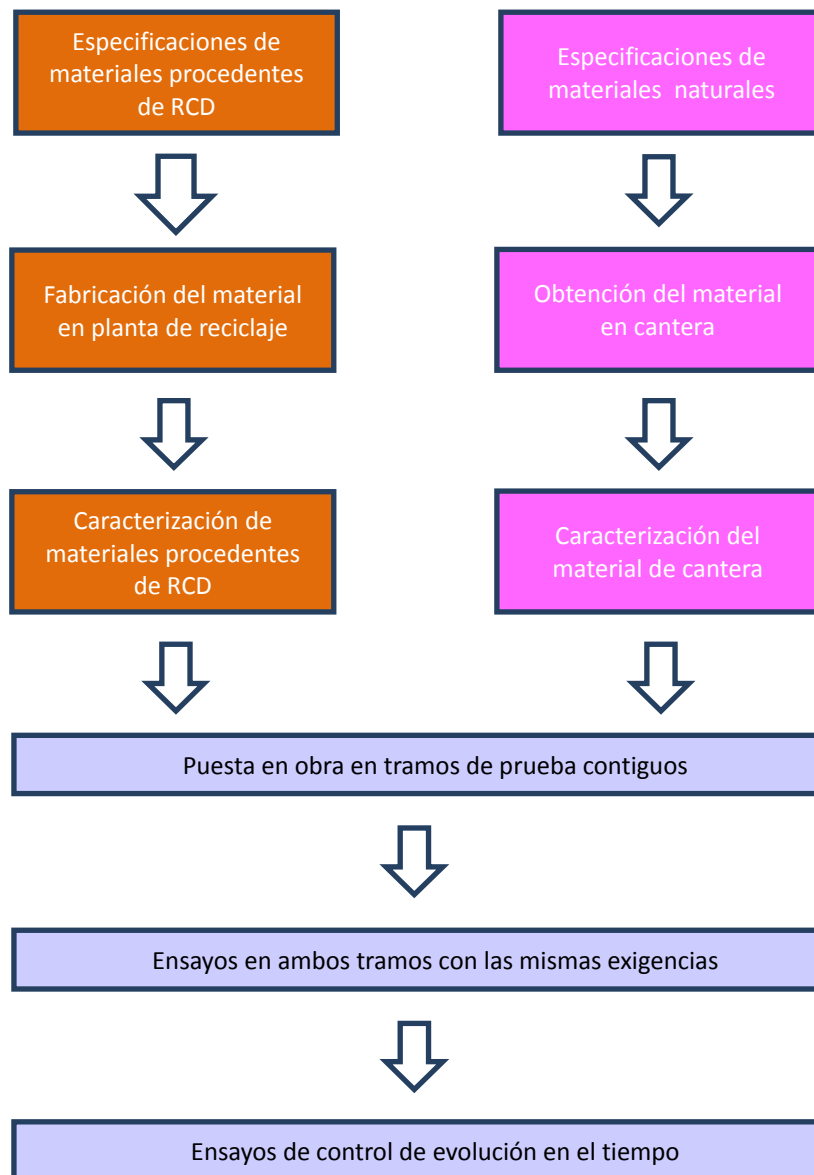


Figura 2. Fases de la metodología

En primer lugar se definen, según la normativa vigente, tanto europea como española, las características que deben cumplir los materiales procedentes de cantera y de los

RCD, así como el porcentaje en volumen de los diversos materiales que componen la mezcla de estos últimos.

Una vez definidas las especificaciones, se procede a la fabricación del material reciclado en la planta de reciclaje. Se describe el proceso partiendo de la demolición de una obra, que ha suministrado parte de los materiales que han sido reciclados, y que sirven de base a esta investigación.

Se describen los ensayos realizados al material reciclado obtenido, considerado como material previo y antes de su puesta en obra, caracterizándolo y comparándolo con los tradicionales para potenciar su uso en las capas de firmes de carreteras.

Para estudiar el comportamiento real de los materiales reciclados se selecciona una carretera en construcción. Se han ejecutado dos tramos. En el primero se ha sustituido la tradicional zahorra artificial, prevista en el proyecto en la capa de firme, por el material obtenido de los RCD. En el segundo tramo se ha mantenido el material tradicional previsto en el proyecto de construcción para la capa de firme. Se han realizado los ensayos de caracterización oportunos, tanto para el material obtenido de los RCD como para el material obtenido en la cantera.

Las exigencias para ambos tramos serán las mismas una vez puestos en obra. Su análisis permitirá realizar estudios comparativos del comportamiento de los materiales reciclados respecto a los comportamientos patrones de sus homólogos de cantera.

Una vez finalizados los trabajos y con objeto de verificar la evolución del comportamiento del firme, tanto en el tramo en el que se han empleado materiales tradicionales como en el de reciclados, se realizará un seguimiento posterior de los tramos ejecutados cada 6 meses, durante un periodo de 4 años, para determinar la evolución de la capacidad portante del firme en el tiempo. Para ello se llevará a cabo un control de las deflexiones cada 5 metros y al tresbolillo.

4.1. ESPECIFICACIONES DEL MATERIAL RECICLADO

La zahorra reciclada de RCD fue suministrada por la Planta de reciclaje ARISTERRA, S.L., en Málaga.

Para conocer si las instalaciones de la planta de áridos se encontraban en buen estado y era aptas para el suministro de material a obra se llevó a cabo, por parte del laboratorio de calidad de la obra una inspección de las mismas. La visita de la planta tuvo lugar el día 29 de julio de 2008, inspeccionándose los procedimientos de fabricación de las zahorras recicladas. La verificación de planta se realizó según el modelo de informe de inspección de AOPJA (disponible en www.aopandalucia.es),

resultando satisfactorio. En el apartado 4.3. se describirá el proceso de fabricación del material en dicha planta.

Las especificaciones que se le han exigido a este material se detallan a continuación.

En primer lugar se debe definir el material que queremos obtener, tanto en porcentaje de volumen como en características. Para ello nos basaremos en la normativa española y europea.

Los requisitos están recogidos en la legislación y normativa técnica vigente relativa al control de producción de áridos (Marcado CE) y a la calidad de los materiales en obras de construcción (EHE y PG-3).

El Marcado CE (R.D.1328/1995) fue introducido por la Comisión Europea, quien establece las condiciones de su uso. El Marcado CE sobre un producto indica que éste cumple con todos los requisitos esenciales de aplicación, en virtud de sus respectivas directivas comunitarias. No es una marca de calidad, sino un certificado que declara la conformidad de un determinado producto con las normas armonizadas que establecen su utilización. Por esta razón utilizaremos esas normas armonizadas que tienen en España habitualmente la codificación UNE-EN.

Una norma EN armonizada es una especificación técnica, de carácter no obligatorio (salvo que en alguna disposición legal se prescriba su obligado cumplimiento), que ha sido aprobada por un Organismo Europeo de Normalización y elaborada bajo un mandato de la Comisión Europea y publicado en el D.O.C.E. (Diario Oficial de la Comunidad Europea) de acuerdo con lo establecido en la Directiva 83/189/CEE.

Según la norma UNE-EN 13242:2003 + A1:2008 (AENOR, 2008) (*Áridos para capas granulares y capas tratadas con conglomerados hidráulicos para uso en capas estructurales de firmes*), la categoría de un material reciclado, definida como nivel característico de una propiedad del árido expresada en forma de un intervalo de valores o como un valor límite, se determina en base a los tipos de residuos que componen su fracción gruesa. Esta normativa recoge la clasificación de los componentes de los áridos gruesos reciclados. Según esta norma tenemos que seleccionar, en base a la tabla 4, las categorías que presenta nuestro material en función al porcentaje en masa que tiene de cada uno de los componentes.

	Porcentaje en masa	
Rc	≥ 90 ≥ 80 ≥ 70 ≥ 50 <50 sin requisito	Rc ₉₀ Rc ₈₀ Rc ₇₀ Rc ₅₀ Rc Declarado Rc _{NR}
Rc + Ru + Rg	≥ 90 ≥ 70 ≥ 50 <50 sin requisito	Rcug ₉₀ Rcug ₇₀ Rcug ₅₀ Rcug Declarado Rcug _{NR}
Rb	≤ 10 ≤ 30 ≤ 50 <50 sin requisito	Rb ₁₀₋ Rb ₃₀₋ Rb ₅₀₋ Rb Declarado Rb _{NR}
Ra	≥ 95 ≥ 80 ≥ 50 ≥ 40 >30 ≤ 30 ≤ 20 ≤ 10 ≤ 5 ≤ 1 sin requisito	Ra ₉₅ Ra ₈₀ Ra ₅₀ Ra ₄₀ Ra ₃₀ Ra ₃₀₋ Ra ₂₀₋ Ra ₁₀₋ Ra ₅₋ Ra ₁₋ Ra _{NR}
Rg	≤ 2 ≤ 5 ≤ 25 sin requisito	Ra ₂₋ Ra ₅₋ Ra ₂₅₋ Ra _{NR}
X	≤ 1	X ₁₋
	cm ³ /kg	
FL	≤ 5 ≤ 10	FL ₅₋ FL ₁₀₋

Nota:

- Rc = Hormigón, productor de hormigón, morteros. Piezas para fábrica de albañilería de hormigón
- Ru = Áridos no tratados, piedra natural. Áridos tratados con conglomerantes hidráulicos
- Rb = Piezas para fábrica de albañilería de arcilla (ladrillos y tejas). Piezas para fábrica de albañilería de silicato de calcio. Hormigón celular no flotante
- Ra = Materiales bituminosos
- Rg = Vidrio
- FL = Material flotante en volumen
- X = Otros

Tabla 4: Categoría de los contenidos de los componentes en los áridos gruesos reciclados.
UNE 13242:2003+A1

Fuente: Proyecto de norma europea EN 933-11

Para nuestra investigación se seleccionó, cumpliendo con la tabla 4, la siguiente composición para el material:

- Rc $\geq 70\%$ en masa
- Rb $\leq 10\%$ en masa

- $Ra \leq 20\%$ en masa
- $X \leq 1\%$ en masa
- $FL \leq 10 \text{ cm}^3/\text{kg}$

Siendo Rc la composición de hormigón, Rb de material cerámico, Ra de materiales bituminosos, FL la composición de material flotante en volumen y X la composición en otros materiales.

Como consecuencia de la composición seleccionada, la categoría específica del material reciclado que se utilizará vendrá especificada como: Rc70, Rb10-, Ra20-, X1-, FL10-.

Se tomaron como materia prima tres tipos de residuos:

- residuos de material cerámico (fig. 3a).
- residuos de hormigón (fig. 3b).
- residuos de aglomerado asfáltico (fig. 3c).

Los residuos de hormigón se obtuvieron de demoliciones de estructuras, probetas de laboratorio, excedentes de plantas de fabricación de hormigón y losas, entre otros. Los residuos de aglomerado asfáltico procedían de demoliciones de pavimentos asfálticos y los residuos de material cerámico procedían de demoliciones de tabiquerías, entreplantas,...



(a)



(b)



(c)

Figura 3. Residuos cerámicos (a), de hormigón (b) y asfálticos (c)

Los motivos que llevaron a la decisión de la composición mencionada anteriormente fueron los que se explican a continuación:

- Dado que no se tenía constancia de uso de materiales de áridos reciclados para el tráfico previsto en el tramo de investigación y para cumplir los límites exigidos en el artículo 510 del PG-3 en cuanto a propiedades como plasticidad, se limitó el porcentaje de material cerámico (Rb) al 10%.
- El contenido en hormigón (Rc) de RCD se consideró que fuera del 70% ,ya que era el material que más garantía daba por su resistencia y capacidad de

cementación. Además los residuos iban a provenir fundamentalmente de obras de edificación, en las que este material está presente en un alto porcentaje.

- Un 20% para los residuos procedentes de asfalto (Ra). Los residuos asfálticos suelen utilizarse en firmes para caminos de servicio o accesos a fincas adyacentes a las propias obras, por lo que la cantidad que llega a la planta de tratamiento de este tipo de residuos suele ser pequeña (Proyecto Gear, 2008-2011).

Posteriormente, se procede en laboratorio a la identificación y estimación de las proporciones relativas de los componentes de los áridos gruesos reciclados de acuerdo con el *“ensayo de clasificación de los componentes de los áridos gruesos reciclados”* incorporado en la norma UNE-EN 933-11 (AENOR, 1998).

Esta norma europea describe el ensayo como un método simple para el examen de áridos gruesos reciclados con fines de identificación y estimación de las proporciones de sus componentes. La proporción de cada componente se determina y expresa como un porcentaje en masa del total, excepto para la proporción de partículas flotantes que se expresa como un volumen en masa (fig.4).

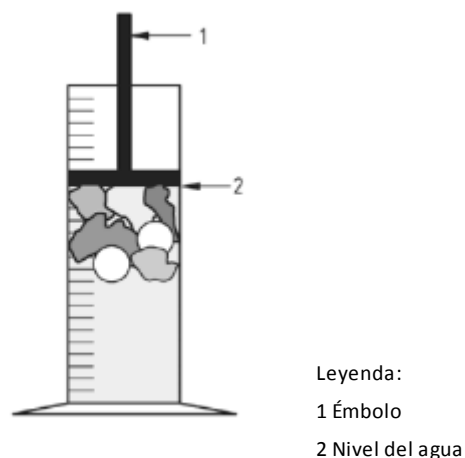


Figura 4. Determinación del volumen de las partículas flotantes
Fuente: norma UNE-EN 933-11

Una vez definida la composición del material reciclado, se procedió a determinar los ensayos que se deben realizar y las características que debe cumplir según la normativa vigente.

En el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares (P.P.T.P.) del Proyecto de Construcción de la Obra en la que se realizó el tramo de investigación se contemplaban las especificaciones de la zavorra artificial. Dichas especificaciones se ajustan a lo solicitado por el PG-3, (Art. 510). Sin embargo, en ellas no se recoge la posibilidad de

empleo de zahorras recicladas. Por tanto, se consideró razonable que las especificaciones exigidas para las zahorras recicladas se ajustaran a las especificaciones exigidas en el PG-3 para las zahorras artificiales.

El tramo de ensayo seleccionado y que será detallado en siguientes apartados, presenta una categoría de tráfico pesado T4. Esta clasificación se basa en la intensidad media diaria de vehículos pesados (IMDp) que hay prevista en el carril de proyecto en el año de puesta en servicio y se recoge en la tabla de Categorías de Tráfico de la norma 6.1. IC “Secciones de Firme” de la Instrucción de Carreteras (Ministerio de Fomento, 2003a)

El artículo 510 del PG-3 define como zahorra el material granular de granulometría continua utilizado como capa de firme. Denomina zahorra artificial al constituido por partículas, total o parcialmente trituradas, en la proporción mínima que se especifique en cada caso. Además, indica que para las categorías de tráfico pesado T2 o T4 se pueden utilizar materiales granulares reciclados, siempre que cumplan con las prescripciones técnicas que se le exigen en este artículo. Teniendo en cuenta que el tramo de ensayo tiene categoría de tráfico pesado T4, podemos concluir que es posible su utilización con las condiciones prescritas en el artículo del PG-3 antes indicado.

La metodología, que se ha establecido en esta investigación, contempla que en una primera fase se lleve a cabo la caracterización de los residuos. Para ello, se realizan una serie de ensayos que determinarán las características intrínsecas del material (composición, resistencia a la fragmentación, plasticidad...). Los resultados de estos ensayos determinarán su capacidad para sustituir a la zahorra artificial de la cantera.

Para comprobar la procedencia de los materiales, además de contar con los controles de producción en la fábrica y los controles de los fabricantes, se realizaron ensayos de identificación a muestras tomadas de los acopios de la cantera y de la planta de reciclado. La tabla 5 recoge el Plan de ensayos en origen para la zahorra reciclada y de cantera.

	Norma	Denominación del ensayo
MUESTREO	UNE EN 933-2	Método de muestreo.
	UNE 103100	Preparación de muestras para ensayos de suelos.
REQUISITOS GEOMÉTRICOS	UNE EN 933-1	Determinación de la granulometría de las partículas. Métodos del tamizado.
	UNE EN 933-3	Determinación de la forma de las partículas. Índice de lajas.
	UNE EN 933-5	Determinación del porcentaje de caras de fractura de las partículas de árido grueso.
REQUISITOS FÍSICOS	UNE EN 1097-2	Métodos para la determinación de la resistencia a la fragmentación. Desgaste los Ángeles
REQUISITOS QUÍMICOS	UNE EN 1744-1	Determinación del contenido en sustancias orgánicas. Húmicos.
	UNE EN 1744-1	Determinación del contenido en azufre total.
LIMPIEZA	UNE 146130 Anexo C	Determinación del coeficiente de limpieza.
	UNE EN 933-8	Equivalente de arena
PLASTICIDAD	UNE 103103-103104	Límites de Atterberg

Tabla 5. Plan de Ensayos en origen para la zahorra reciclada y de cantera

Como se observa en la tabla 5, se detallan los ensayos a realizar a las muestras en base a los requisitos que tenían que cumplir. También indica la norma bajo la que se debían hacer. A continuación se describen con detalle estos ensayos.

- MUESTREO

El muestreo y el transporte adecuado y cuidadoso son requisitos previos para que un análisis ofrezca resultados fiables y garantizar la representatividad de la muestra. La norma que se siguió para ello fue la UNE EN 933-2 en su parte 2 (AENOR,1997).

Las muestras se han preparado en base a la norma UNE 103100 (AENOR, 1995): *"Preparación de muestras para ensayos de suelos"*. El objeto de esta norma es describir la manera de efectuar la recepción y el almacenamiento de las muestras de suelo destinadas para su ensayo en el laboratorio, así como la preparación de la cantidad de muestra necesaria para realizar los distintos ensayos.

Para evaluar si la muestra cumple los requisitos geométricos se realizan los siguientes ensayos: granulometría, forma del árido grueso, porcentaje de partículas trituradas o fracturadas (% en masa).

Para evaluar el cumplimiento de los requisitos físicos se realiza el ensayo de resistencia a la fragmentación.

Para evaluar el cumplimiento de los requisitos químicos se realizan los siguientes ensayos: determinación del contenido en sustancias orgánicas, en sulfatos solubles y en azufre total.

Finalmente, se realizarán los ensayos de limpieza (determinados por el ensayo del equivalente de arena y el coeficiente de limpieza) y el ensayo para determinar la plasticidad del suelo.

- GRANULOMETRÍA

El ensayo a emplear es el UNE EN 933-1 (AENOR, 1998): *“Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 1: Determinación de la granulometría de las partículas. Métodos del tamizado”*.

El ensayo consiste en dividir y separar un material, mediante una serie de tamices, en varias fracciones granulométricas de tamaño decreciente. Los tamaños de abertura y el número de tamices se seleccionan según la naturaleza de la muestra y según la exactitud requerida.

El método adoptado consiste en el lavado del árido y su posterior tamizado en vía seca. Cuando el lavado pueda alterar algunas propiedades físicas de los áridos ligeros, se debe utilizar el tamizado por vía seca.

La masa de las partículas retenidas en los diferentes tamices se expresa respecto a la masa inicial del material. Los porcentajes acumulados que pasan por cada tamiz se registran en forma numérica y/o gráfica.

De acuerdo con el artículo 510.3 del PG-3, la granulometría del material (determinada por el ensayo realizado según la norma UNE-EN 933-1) deberá estar comprendida dentro de alguno de los husos fijados para las zahorras artificiales (Tabla 6).

TIPO DE ZAHORRA ARTIFICIAL (ZA)	ABERTURA DE LOS TAMICES UNE-EN 933-2 (mm)								
	40	25	20	8	4	2	0,5	0,25	0,063
ZA25	100	75-100	65-90	40-63	26-45	15-32	7-21	4-16	0-9
ZA20	-	100	75-100	45-73	31-54	20-40	9-24	5-18	0-9
ZAD20	-	100	65-100	30-58	14-37	0-15	0-6	0-4	0-2

Tabla 6. Husos granulométricos para las zahorras artificiales fijados por el PG-3
Fuente: Artículo 510.3 del PG-3

La designación del tipo de zahorra se hace en función del tamaño máximo nominal, que se define como la abertura del primer tamiz que retiene más de un diez por ciento en masa.

En todos los casos, el cernido por el tamiz 0,063 mm de la norma UNE-EN 933-2 (AENOR, 1998) será menor que los dos tercios ($2/3$) del cernido por el tamiz 0,250 mm de la UNE-EN 933-2.

Destacar que la nominación de las zahorras en el año 2008 (fecha de ejecución del tramo de investigación) variaba según el PG-3 y según la norma europea:

- PG-3: Las zahorras se designan en función del tamaño máximo nominal del árido. Así, una zahorra de tamaño máximo nominal 25 mm se nominaría ZA 25.
- Norma europea: Se designan por su tamaño, expresado en función de los tamaños de los tamices inferior (d) y superior (D), empleando la denominación d/D. Así, una zahorra reciclada con tamaño de tamiz inferior 0 y superior 32 mm se denominaría ZR RCD 0/32.

En base a esta consideración, aunque se designe la zahorra en base a la norma europea, la abertura de tamices sigue las directrices del PG-3 vigente en aquel entonces.

Según el Proyecto de Construcción, la zahorra a poner en obra era la ZA 0/32. Tanto para el caso de la zahorra de cantera como para la zahorra reciclada se utilizó dicho huso granulométrico y se denominaron ZA 0/32 y ZR RCD 0/32.

- **FORMA DEL ÁRIDO GRUESO**

De acuerdo con el artículo 510.2.6 del PG-3 y según el ensayo realizado en base a la norma europea UNE-EN 933-3 (AENOR, 2004), el índice de lajas de las distintas fracciones del árido grueso deberá ser inferior a treinta y cinco.

Se define índice de lajas como el porcentaje en peso respecto una muestra de árido grueso de las partículas que son lajas. Se define como laja una partícula que tiene una dimensión mucho menor que las otras dos.

Las lajas son partículas con mala forma, por lo que su contenido debe estar limitado. Estas pueden romperse, dando lugar a modificaciones de la granulometría deseada y a una disminución de la capacidad resistente esperada.

El ensayo consiste en dos operaciones de tamizado. En primer lugar, mediante el uso de tamices se divide la muestra en distintas fracciones granulométricas d_i/D_i (Fracción de un árido que pasa por el mayor de dos tamices, D_i y es retenida por el menor (d_i)), según la tabla 7.

Fracción d/D (mm)	Anchura de la ranura del tamiz de barras (mm)
63/80	40±0,3
50/63	31.5±0,3
40/50	25±0,2
31,5/40	20±0,2
25/31,5	16±0,2
20/25	12,5±0,2
16/20	10±0,1
12,5/16	8±0,1
10/12,5	6,3±0,1
8/10	5±0,1
6,3/8	4±0,1
5/6.3	3,15±0,1
4/5	2,5±0,1

Tabla 7. Tamices de barras a utilizar según la fracción granulométrica en el ensayo del índice de lajas
Fuente: UNE-EN 933-3

En segundo lugar se criba cada una de las fracciones granulométricas d_i/D_i , empleando para ello tamices de barras paralelas y separadas $D_i/2$.

El índice de lajas global se calcula a partir de la masa total de las partículas que pasan por los tamices de barra, expresado como porcentaje del total de la masa seca de las partículas sometidas a ensayo.

- PORCENTAJE DE PARTÍCULAS TRITURADAS O FRACTURADAS (% EN MASA)

De acuerdo con el artículo 510.2.7 del PG-3 (Angulosidad), el porcentaje de partículas trituradas o fracturadas y el porcentaje de partículas totalmente redondeadas de los áridos gruesos es calculado según el ensayo basado en la norma europea UNE-EN 933-5 (AENOR, 2005).

El porcentaje mínimo de partículas trituradas para las zavorras artificiales será del cien por ciento (100%) para firmes de calzada de carreteras con categoría de tráfico pesado T00 y T0, del setenta y cinco por ciento (75%) para firmes de calzada de carreteras con categoría de tráfico pesado T1 y T2 y arcenes de T00 y T0, y del cincuenta por ciento (50%) para los demás casos.

Como nuestro tráfico es T4, el porcentaje mínimo de partículas trituradas será, como mínimo, del 50%.

Para evaluar si la muestra cumple los requisitos físicos se realiza el ensayo de resistencia a la fragmentación.

- RESISTENCIA A LA FRAGMENTACIÓN

La resistencia a la fragmentación se debe determinar por medio del Coeficiente de desgaste de los Ángeles, de acuerdo con la norma UNE-EN 1097-2 (AENOR, 2007).

El ensayo de desgaste de Los Ángeles determina la abrasión o desgaste de los áridos gruesos utilizando la máquina de Los Ángeles. Consta de un tambor cilíndrico hueco de acero con su eje horizontal fijado a un motor que transmite un movimiento rotacional alrededor del eje, mediante el cual, a través de un desgaste forzado por una carga abrasiva, permite establecer el desgaste de la muestra expresada como un porcentaje de su masa inicial. El valor obtenido es la diferencia entre la masa inicial de la muestra seca y la masa del material desgastado en %.

De acuerdo con el artículo 510.2.5. del PG-3, el valor máximo del Coeficiente de los Ángeles para tráfico T4, teniendo en cuenta que es material reciclado, será de 45.

- REQUISITOS QUÍMICOS

Para evaluar si la muestra cumple los requisitos químicos se sigue la norma europea UNE-EN 1744-1(AENOR, 1999). Esta norma tiene por objeto fijar los procedimientos operatorios para realizar el análisis químico de los áridos.

De acuerdo con el artículo 510.2.2 del PG-3 el contenido ponderal de compuestos de azufre totales (expresados en SO_3), determinado según la anterior norma, será inferior al uno por ciento (1%).

Hay que indicar que en la fecha de esta investigación la norma en vigor era la que se indica anteriormente (UNE-EN 1744-1:1999), pero esa norma, en la actualidad, está anulada; la vigente hoy es la UNE-EN 1744-1: 2010+A1:2013. En la norma actual hay un apartado específico (10.2) para la determinación de sulfatos solubles en agua en áridos reciclados, mientras que en la 1999 el procedimiento era el mismo ya se trataba de un árido natural o reciclado.

La norma ha sido modificada porque los sulfatos que se encuentran en los áridos reciclados no son naturales, es decir, no proceden de los propios áridos, sino que proceden en su mayor parte, de restos de yesos y escayolas de los procesos de demolición.

Respecto al contenido de materia orgánica (húmicos), el PG-3 en su artículo 510.2.3. determina que la zahorra deberá estar exenta.

- LIMPIEZA

De acuerdo con el artículo 510.2.3 del PG-3, los materiales estarán exentos de terrones de arcilla, marga, materia orgánica, o cualquier otra que pueda afectar a la durabilidad de la capa.

En el caso de las zahorras artificiales, el coeficiente de limpieza, según el anexo C de la norma europea UNE 146130 (AENOR,2000) deberá ser inferior a 2.

Este anexo describe el procedimiento que se debe seguir para la determinación de la limpieza superficial de los áridos, con tamaños superiores a 2 mm, utilizados en construcción de carreteras. El ensayo consiste en separar por lavado, mediante un tamiz de referencia, las partículas inferiores a 0.5 mm mezcladas o adheridas a la superficie de los áridos. Posteriormente se calcula el porcentaje en masa referido a la muestra seca total de estas partículas consideradas como impurezas. El coeficiente de limpieza superficial se expresa mediante la proporción de impurezas obtenidas según lo expresado anteriormente.

El ensayo del equivalente de arena, realizado según la UNE-EN 933-8 (AENOR, 2000), da un índice representativo de la proporción y características de los finos que contiene un suelo granular o un árido fino.

El equivalente de arena del material de la zahorra artificial, según el artículo 510.2.3 del PG-3, deberá ser mayor de treinta y cinco para el tráfico T4. De no cumplirse esta condición, su valor de azul de metileno, según la UNE-EN 933-9 (AENOR, 1999), deberá ser inferior a diez (10), y simultáneamente, el equivalente de arena no deberá ser inferior en más de cinco unidades a treinta y cinco (35).

Este ensayo muestra un método para determinar el equivalente de arena de la fracción granulométrica 0/2mm de los áridos finos y de la mezcla total de los áridos.

Se fundamenta en liberar de la muestra de ensayo los posibles recubrimientos de arcilla adheridos a las partículas de arena, mediante la adición de una solución coagulante que favorece la suspensión de las partículas finas sobre la arena, determinando su contenido respecto de las partículas de mayor tamaño.

- PLASTICIDAD

De acuerdo con el artículo 510.2.4 del PG-3, el material será “no plástico” para las zahorras artificiales, según el ensayo de la norma UNE 103103 (AENOR, 1994) y UNE 103104(AENOR, 1993).

El ensayo tiene como finalidad la determinación del límite plástico de un suelo. Se denomina límite plástico a la humedad más baja con la que pueden formarse cilindros de unos 3 mm de diámetro, rodando la muestra de suelo entre la palma de la mano y una superficie lisa sin que los cilindros se rompan a pedazos. La realización del ensayo

permite la clasificación del suelo desde el punto de vista de su plasticidad, es decir, su comportamiento funcional determinado por la cantidad de arcilla que contiene.

4.2. ESPECIFICACIONES DE LA ZAHORRA ARTIFICIAL DE CANTERA

La zahorra artificial fue suministrada por la cantera de Cañete la Real, Málaga. Las instalaciones fueron inspeccionadas. La visita de verificación obtuvo resultados satisfactorios en base al informe realizado el día 24 de octubre de 2010.

Las especificaciones que se le han exigido a este material se describen a continuación.

Las especificaciones de la zahorra artificial del P.P.T.P. del Proyecto de Construcción de la Obra, en el que se realizó el tramo de investigación, se ajustan a lo solicitado por el PG-3 (Art. 510).

El marcado CE, explicado en el capítulo de Material Reciclado (4.2.), también es de obligado cumplimiento.

Las especificaciones y el Plan de ensayos para el material de cantera serán los mismos a los de la zahorra reciclada en base al artículo 510 del PG-3, con las siguiente salvedad que indica dicho pliego:

La resistencia a la fragmentación es más exigente para la Zahorra artificial de cantera, limitándola a un valor máximo del Coeficiente de los Ángeles de 35 (art. 510.2.5. del PG-3).

En la tabla 8 se resumen las especificaciones exigidas para el material reciclado y de cantera:

	Ensayo	Norma	Requisitos mínimos								
REQUISITOS GEOMÉTRICOS	Granulometría	UNE EN 933-1	ZA 0/32, ZR RCD 0/32: ABERTURA DE LOS TAMICES UNE-EN 933-2 (mm)								
			40	25	20	8	4	2	0,5	0,25	0,063
			100	75-100	65-90	40-63	26-45	15-32	7-21	4-16	0-9
	Índice de lajas	UNE EN 933-3	<35								
	Porcentaje partículas trituradas	UNE EN 933-5	>50%								
REQUISITOS FÍSICOS	Desgaste de los Ángeles	UNE EN 1097-2	ZAHORRA ARTIFICIAL CANTERA				ZAHORRA RECICLADA				
			<35				<45				
REQUISITOS QUÍMICOS	Contenido de materia orgánica	UNE EN 1744-1	Exento								
	Contenido de azufre total	UNE EN 1744-1	<1%								
LIMPIEZA	Coeficiente de limpieza	UNE 146130 Anexo C	<2								
	Equivalente de arena	UNE EN 933-8	>35								
PLASTICIDAD	Plasticidad	UNE 103104	No plástico								

Tabla 8. Tabla resumen de especificaciones para zahorra reciclada y de cantera.

Las especificaciones definidas anteriormente fueron las exigidas al material utilizado en la investigación, tanto a la zahorra artificial como a la zahorra reciclada.

4.3. PROCESO DE FABRICACIÓN DEL MATERIAL REICLADO

El proceso de reciclaje de los materiales obtenidos de la demolición de las obras, para su reutilización en obras de construcción, está dividido en varias fases (fig. 5).

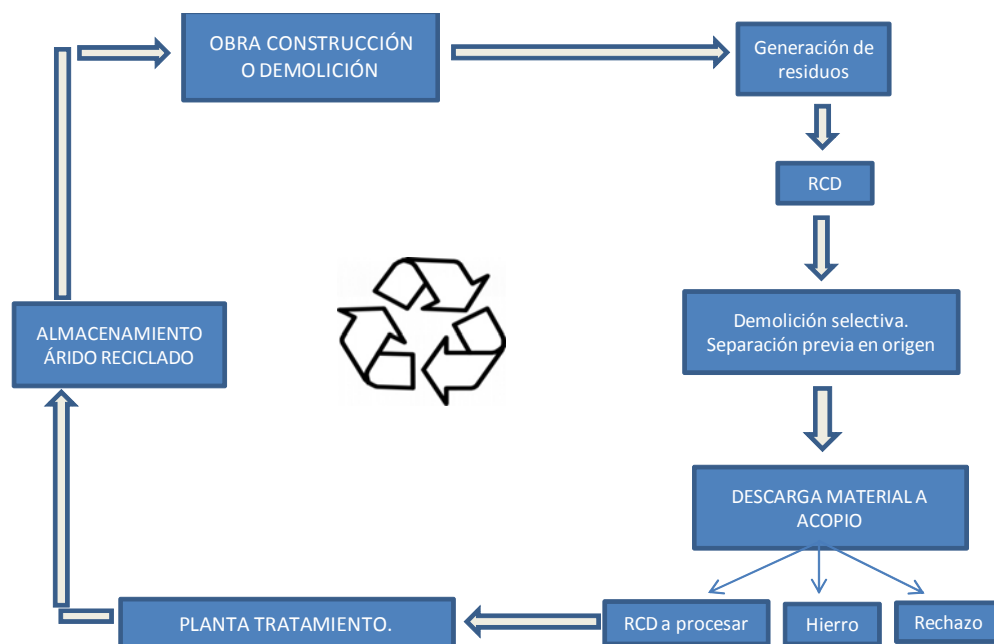


Figura 5. Fases del proceso de reciclaje de RCD

A continuación se detallan cada una de las fases del proceso de fabricación del material reciclado.

4.3.1. DEMOLICIÓN

En la fase de demolición se realiza la separación, para su posterior aprovechamiento, de aquellos materiales distintos de los propios escombros que puedan ser reutilizables tales como el cobre, el hierro, el plástico o la madera, (fig. 6a).

En la fig. 6b se aprecia el proceso de demolición de una edificación tras haber realizado la demolición manual selectiva.

Siempre que sea posible, los escombros generados podrán ser reutilizados en obras de construcción próximas, evitando su depósito en vertederos controlados.

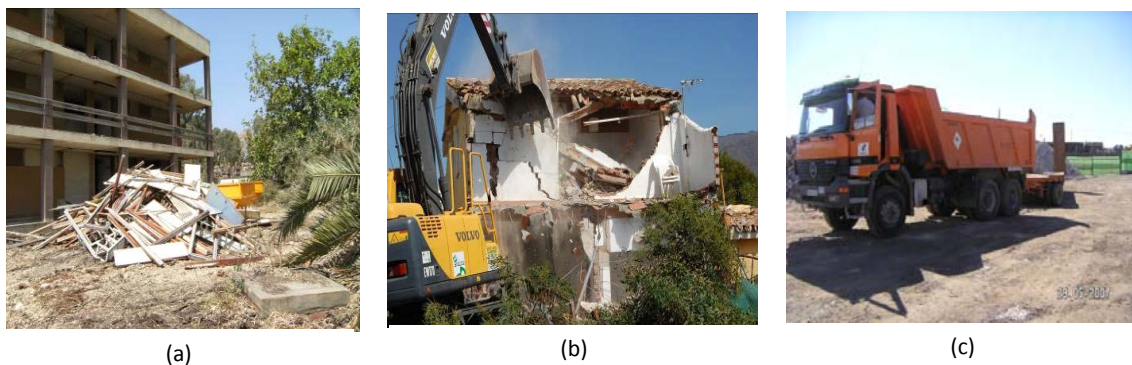


Figura 6. Proceso de demolición de la obra de construcción

El material “en bruto” es transportado hasta la planta mediante vehículos de carga. En la fig. 6c se observa uno de los vehículos utilizados para recogida y suministro del material desde la planta de tratamiento.

4.3.2. DESCARGA DEL MATERIAL

Los áridos reciclados procedentes de RCD fueron procesados por la planta de reciclaje que la empresa ARISTERRA, S.L. tiene en Málaga (fig.7).



Figura 7. Planta de Aristerra en Málaga

El proceso productivo de ARISTERRA, S.L. comienza con la descarga de las materias primas desde los camiones a las zonas de acopiado. Una vez se ha producido la descarga, los operarios de la planta se encargan de proporcionar el grado de humedad preciso al material mediante riego con manguera. Además, existe un sistema continuo de aspersores nebulizadores que precipitan el polvo en suspensión.

En dichos acopios se produce, en una primera etapa, el triaje manual por parte de los operarios de planta, separándose el hierro y demás elementos de rechazo mediante retroexcavadora con mandíbulas (fig. 8).

El Encargado de Planta es la persona responsable de supervisar dichas operaciones de control de la materia prima.

Si cualquier empleado de la planta detectase que las materias primas recibidas son inadecuadas, tiene orden de informar al Encargado de Planta y se procedería al rechazo del material en contenedores para su retirada al vertedero.

4.3.3. CARGA Y TRANSPORTE A PLANTA DE TRATAMIENTO

El material acumulado es cargado mediante palas cargadoras hacia un acopio que se encuentra cerca de las tolvas de recepción, por una pista acondicionada para la circulación. Una vez posicionada la pala cerca de la tolva, basculará la carga que comenzará a caer por gravedad por las rampas, produciéndose un proceso primario de selección.

En dicho acopio de entrada a la planta de tratamiento se produce el triaje secundario o selección mediante la retroexcavadora.

4.3.4. PROCESO DE TRATAMIENTO DEL ÁRIDO

El proceso de clasificado del árido producido en la planta se describe a continuación. Las etapas básicas de este proceso son:

- **Clasificación:** Consiste en la separación de los áridos en bandas granulométricas, definidas según los husos granulométricos normalizados. Se utilizan cribas vibrantes que llevan incorporadas paños de distinta luz de malla.
- **Transporte:** La conducción del material, entre las etapas de su tratamiento, es realizada mediante cintas transportadoras.

Las palas cargadoras se sitúan en la tolva de recepción, procediendo a la descarga del material. La tolva de recepción tiene un ancho de 1.000 mm, por lo que en caso de ser el material mayor de esta dimensión debe ser reducido mediante martillo.

Posteriormente, una retroexcavadora de cadenas con pinza hidráulica extrae el acero del residuo, disminuyendo el tamaño original (fig. 8). El material, ya limpio, es introducido por una retroexcavadora de cadenas en un molino de impactos.



Figura 8. Retroexcavadora de cadenas con pinza hidráulica.

El grupo móvil de molienda posee un precribador que separa en un acopio el material de diámetro menor de 40 mm, siendo el resto sometido al proceso de reducción. Este proceso extrae la tierra o las posibles mezclas ajenas al hormigón, al aglomerado asfáltico y al material cerámico, de modo que la zahorra artificial reciclada final proceda exclusivamente de estos últimos materiales citados.

Tras la molienda un electroimán retiene el acero que hubiese entrado al molino. El resto es transportado mediante cinta transportadora hasta la entrada del grupo móvil de cribado, donde se lleva a cabo la clasificación del producto, obteniéndose el producto final deseado: árido reciclado de residuos de construcción y demolición (ZR RCD 0/32).

En el caso de producirse áridos que contengan materiales cerámicos, se le realiza un triaje terciario en los acopios que se encuentran a la salida de las cintas.

En la planta de tratamiento se encuentran aspersores nebulizadores en los siguientes puntos:

- Salida del molino de trituración
- En las cintas de salida de los materiales para controlar el levantamiento del polvo.

4.3.5. ALMACENAMIENTO

Una vez completado el proceso de clasificado, el producto resultante se distribuye en cintas transportadoras generando acopios o conos de diferentes granulometrías (fig.9).



Figura 9. Cintas transportadoras y acopios de distintas granulometrías.

El árido queda almacenado a pie de cinta o bajo las parrillas de clasificado hasta que mediante pala cargadora es trasladado a otras zonas de la instalación, formando acopios que estarán perfectamente identificados. La carga del material almacenado al vehículo de transporte se realizará mediante una pala cargadora desde el acopio correspondiente.

El proceso productivo para obtener el árido reciclado queda reflejado en la figura 10.

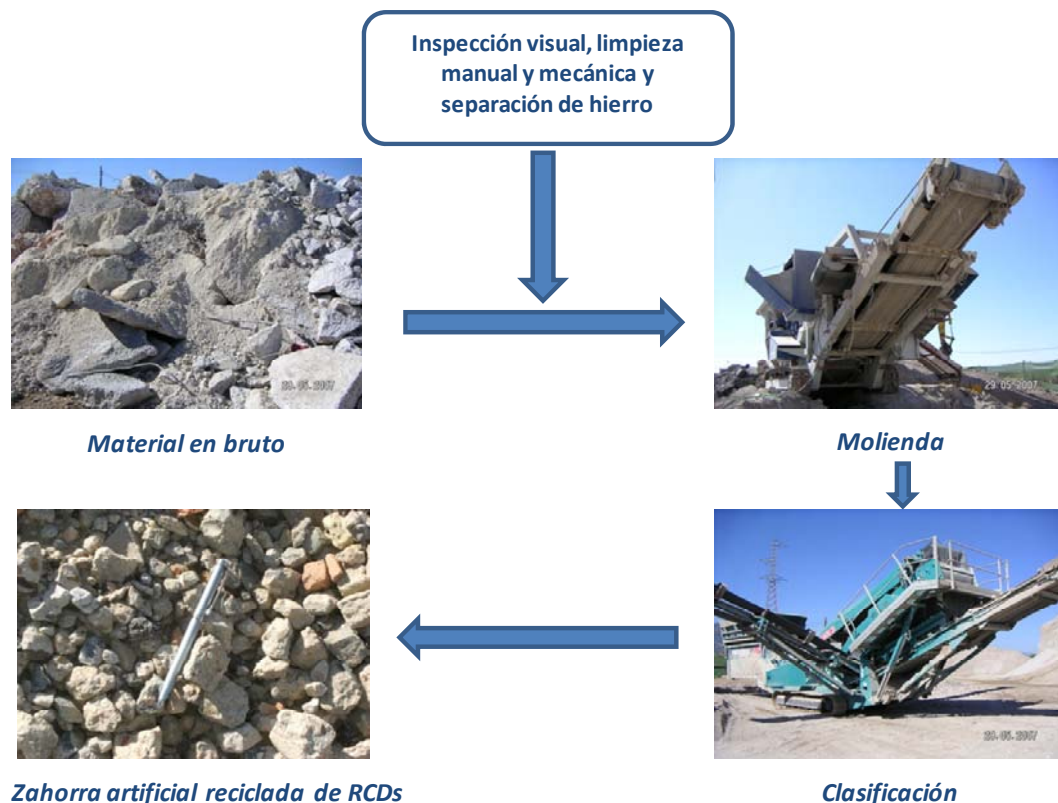


Figura 10. Esquema proceso productivo

Una vez fabricada la zahorra reciclada, en el acopio de la planta de reciclaje se llevará a cabo una humectación del material previo a su transporte a obra.

En el siguiente apartado se procede a describir las características de los tramos de investigación donde se han colocado el material de cantera y el reciclado.

4.4. TRAMOS DE INVESTIGACIÓN

4.4.1. DESCRIPCIÓN DE LOS TRAMOS DE INVESTIGACIÓN

Para estudiar el comportamiento real de los materiales reciclados se selecciona un tramo de 165 m de una carretera en construcción, que se ha dividido en dos tramos. En el primero, de 75 m, se ha sustituido la tradicional zahorra artificial, prevista en el proyecto en la capa de firme, por el material obtenido de los RCD. En el segundo tramo, de 90 m, se ha mantenido el material tradicional previsto en el proyecto de construcción para la capa de firme.

Los tramos de estudio se encuentran situados en la obra de la “Conexión de la A-367 (desde la Venta del Cordobés) con la A-357”, que se corresponden en la actualidad con los primeros cinco kilómetros de la carretera “A-367” (Ardales-Ronda). Los materiales de la investigación se ubicaron en los ramales de aceleración y deceleración que unen la A-357 (carretera Campillos-Málaga) con la A-367 y formaron parte del firme clasificado como flexible. En el siguiente apartado se procederá a describir la sección tipo de ambos tramos.

El tramo de zahorra reciclada de RCD se colocó en el ramal de deceleración (designado a partir de ahora como ramal 1), en el tramo que va desde Málaga en dirección a Ronda. El de zahorra artificial de cantera se colocó en el ramal de aceleración desde Ronda y dirección Campillos (designado a partir de ahora como ramal 2). En la figura 11 se muestra una vista aérea de la intersección donde pueden observarse los ramales objeto de esta investigación.

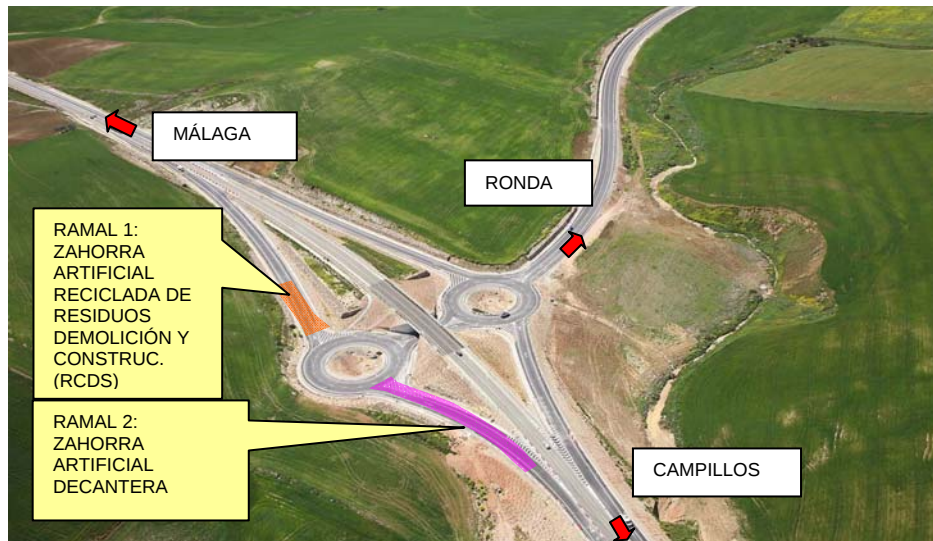


Figura 11. Vista aérea del tramo de prueba ejecutado

Se aprovechó la construcción de esta vía para poner en obra el material a investigar. Este tramo se integró en un Proyecto de Investigación, Desarrollo Tecnológico e Innovación I+D+i promovido por la AOPJA en el año 2008, denominado: *“Utilización de materiales procedentes de residuos de construcción en firmes de carreteras en la provincia de Málaga”*, en el que participaron un grupo de instituciones y empresas⁹.

Los materiales empleados y la terminología utilizada fue la siguiente:

- ZR RCD: Zahorra Artificial de RCD, de granulometría continua, utilizada como capa de firme y procedente de la trituración controlada de residuos de RCD. El tramo construido con ZR RCD se representa en color naranja en la figura 12.
- ZA: Zahorra artificial utilizada como capa de firme y procedente de la trituración de materiales de cantera. El tramo construido con ZA se representa en color rosa en la figura 13.

4.4.2. SECCIONES TIPO

El Proyecto de Construcción de la obra incluía la sección de firme para la zahorra artificial de cantera. Para poder comparar el comportamiento de la zahorra reciclada con la de cantera, se decidió respetar en su totalidad la sección de Proyecto, sustituyendo en el tramo de reciclado la zahorra de cantera por la reciclada.

⁹ CEMOSA: Laboratorio de control de calidad
ARISTERRA: Planta de reciclaje
SANDO: Empresa constructora

Las secciones de firme de Proyecto se diseñaron siguiendo la Instrucción para el Diseño de firmes de la Red de carreteras de Andalucía del año 2007. Para ello se utilizó el software ICAFIR en su versión 2006.

Los parámetros de cálculo utilizados en el Proyecto fueron: intensidad media diaria de vehículos, según lo recogido en el pliego de prescripciones técnicas (PG-3) de vehículos pesados, comprendida entre 100 y 199 vehículos/día; categoría del cimiento media de 100 MPa e índice CBR del terreno natural subyacente (al 95% del Próctor Normal).

La categoría de tráfico de proyecto para el tronco principal de la carretera era T3A, para la cual se diseñaron los paquetes de firmes. La categoría del tráfico en los tramos de investigación es T4 porque no forman parte del tronco principal sino de los ramales de enlace, pero se adoptó la misma sección que para el tronco principal.

Los materiales procedentes de cantera fueron empleados en el ramal 2 (fig.11) con objeto de poder comparar los resultados y analizar las diferencias en el comportamiento del firme con el ramal 1, compuesto por árido reciclado.

Las secciones quedaron constituidas del modo que se ha ilustrado en las figuras 12 y 13.

RAMAL 1 - ZAHORRA ARTIFICIAL DE RCD (ZR RCD)

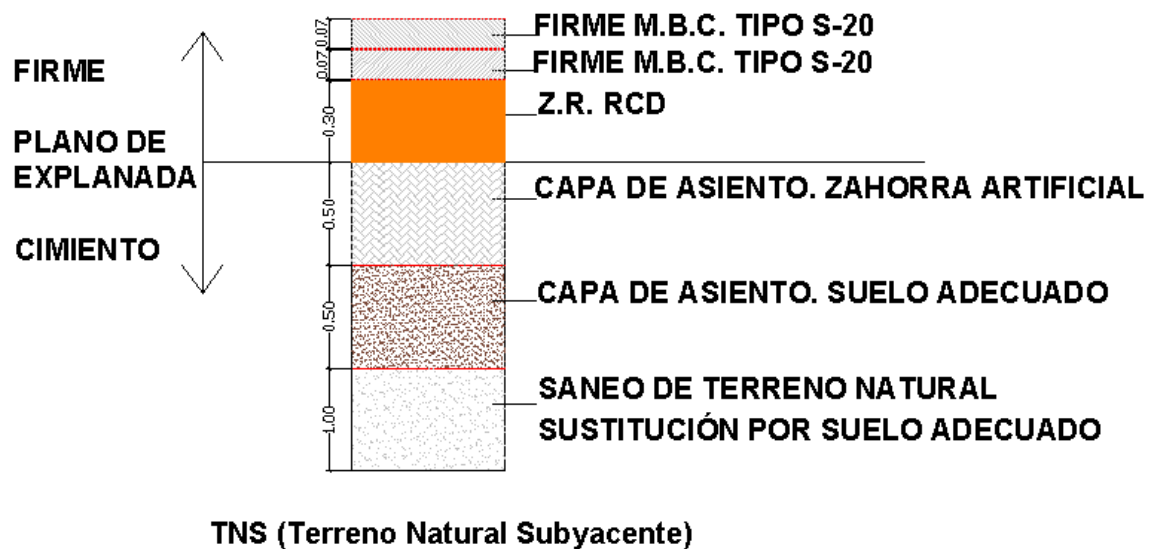


Figura 12. Sección tipo terraplén para Zahorra artificial de RCD.

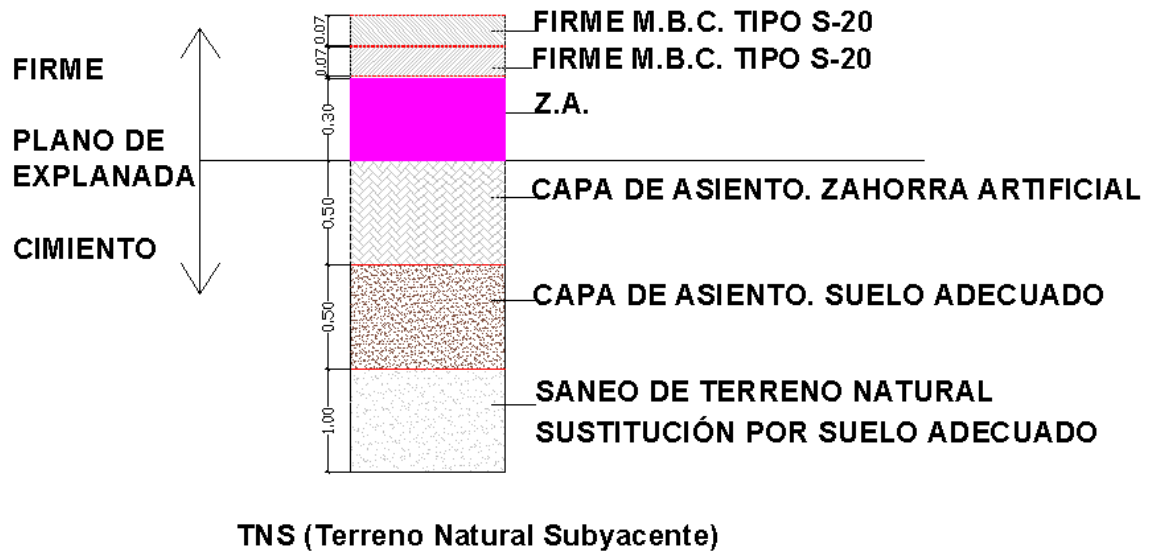
RAMAL2 - ZAHORRA ARTIFICIAL DE CANTERA (ZA)

Figura 13. Sección tipo terraplén para Zahorra artificial de cantera.

4.5. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES

La producción del material se inició una vez aprobada la correspondiente fórmula de trabajo, establecida a partir de los resultados del control de procedencia del material.

Según el artículo 510.5.1 del PG-3 la fórmula de trabajo establece:

- La identificación y proporción (en seco) de cada fracción en la alimentación.
- La granulometría de la zahorra por los tamices establecidos en la definición del huso granulométrico.
- La humedad de compactación.
- La densidad mínima a alcanzar.

Las tolerancias admisibles respecto a la fórmula de trabajo son las que figuran en la tabla 9:

CARACTERÍSTICA		UNIDAD	TOLERANCIAS PARA EL TRAFICO T4
Cernido por los tamices UNE-EN-933-2	> 4 mm	% sobre la masa total	±8
	≤4 mm		±6
	0,063 mm		±2
Humedad de compactación		% respecto a la óptima	-1,5/+1

Tabla 9. Tolerancias admisibles respecto de la fórmula de trabajo en zahorra artificial.

Fuente: PG-3

Antes de poner los materiales en obra se realizaron ensayos de caracterización, tanto del material procedente de RCD como del natural. Se comprobó que cumplía con las exigencias marcadas inicialmente y que se han descrito en los puntos 4.1. y 4.2.(Especificaciones de los materiales).

En la tabla 10 se recogen los ensayos realizados.

Ensayo	Norma
Muestreo	UNE 103100 Y UNE EN 933-2
Granulometría por tamizado	UNE EN 933-1
Equivalente de arena	UNE EN 933-8
Límites de Atterberg	UNE 103103 y UNE 103104
Proctor modificado	UNE EN 103501
Porcentaje partículas trituradas	UNE EN 933-5
Índice de lajas	UNE EN 933-3
Resistencia a la fragmentación	UNE EN 1097-2

Tabla 10. Ensayos de caracterización del material reciclado y de cantera.

4.6. PUESTA EN OBRA

Una vez que se aprobaron las características del material a colocar en obra, a partir de los resultados obtenidos en los ensayos, se llevó a cabo la fabricación y acopio previo del material en la planta de reciclaje. Tanto en lo que se refiere a la fabricación del material, su acopio y su correspondiente transporte a obra se respetaron las condiciones definidas en el procedimiento de ejecución y que se regula en los artículos 510.4. y 510.5. del PG-3.

Los equipos utilizados para poner en obra el material tenían como objetivo conseguir una compacidad adecuada y homogénea de la zahorra en todo su espesor, sin producir roturas del material granular ni arrollamientos (art. 510.4.4. del PG-3).

Para el extendido, riego y compactación, (fig.14a, 14b y 14c respectivamente), se empleó una extendedora automotriz, tipo motoniveladora Caterpillar 140 G, una cuba de riego remolcada por una cabeza tractora, compactadores autopropulsados y compactador de rodillo metálico vibratorio liso de 19 Tn de la marca Bomag.



Figura 14. Equipos utilizados en la puesta en obra

Para la zahorra reciclada se decidió llevar a cabo los mismos procedimientos de ejecución que para los materiales convencionales. El material fue puesto en obra para su extendido y compactación posterior, entre los días 11 y 12 de agosto del año 2008.

El procedimiento de ejecución se realizó según el pliego de prescripciones técnicas particulares del proyecto (P.P.T.P.). Este pliego se basaba en el artículo 510 del PG-3. El procedimiento se describe en el punto siguiente.

4.6.1. PREPARACIÓN DE LA SUPERFICIE QUE VA A RECIBIR LA ZAHORRA.

En cuanto a la superficie que va a recibir la zahorra, el procedimiento de ejecución seguido en el P.P.T.P. sigue el artículo 510.5.2 del PG-3, En este artículo se especifica que la capa de zahorra no se podrá extender hasta que la capa previa tenga las condiciones de calidad previstas, como la regularidad y que el estado de la superficie no sea deficiente.

Se comprobaron las condiciones de calidad de la superficie donde se iba a extender el material, resultando satisfactorias.

4.6.2. PREPARACIÓN DEL MATERIAL.

En este punto el P.P.T.P. se rige por el artículo 510.5.3 del PG-3, en el se indica que cuando las zahorras se fabriquen en central, la adición de agua se realizará en la misma. Para los demás casos, antes de extender una tongada se procederá, si fuera necesario, a su homogeneización y humectación.

En nuestro caso las zahorras fueron fabricadas en central, por tanto, previo a su transporte a obra, el material reciclado se humectó durante dos días, mediante aspersión en el lugar de acopio del material en la planta.

4.6.3. PUESTA EN OBRA.

En este punto el P.P.T.P. sigue el artículo 510.9.2.2 del PG-3, que incide sobre la comprobación visual de la zahorra, antes de su extendido, para rechazar los materiales segregados. Y una vez extendida, se deberá comprobar el espesor, la humedad y la maquinaria que compactará, tanto en sus características mecánicas (número de compactadores, masa de los mismos, presión inflado en los compactadores neumáticos,...) como en el número de pasadas de cada compactador.

Con el material en obra se llevaron a cabo las actividades correspondientes al regado, extendido y compactado de la Zahorra artificial reciclada, con el procedimiento

habitual de regado de manera progresiva, que tenía como objetivo conseguir la homogeneidad de la mezcla indicada en el PG-3.

Con el fin de conseguir una correcta homogeneidad, el riego de la capa se realizó en tres pasadas.

En el momento en el que se observaba que la capa presentaba un aspecto de mezcla homogénea, la motoniveladora realizaba una última pasada para conseguir la forma establecida por el replanteo y acto seguido, se comenzaba con la compactación.

Las figura 15 representa las fases de ejecución descritas para la zahorra reciclada y de cantera: suministro, extendido, riego y compactado. La última foto ilustra el aspecto final de la capa de zahorra reciclada puesta en obra.

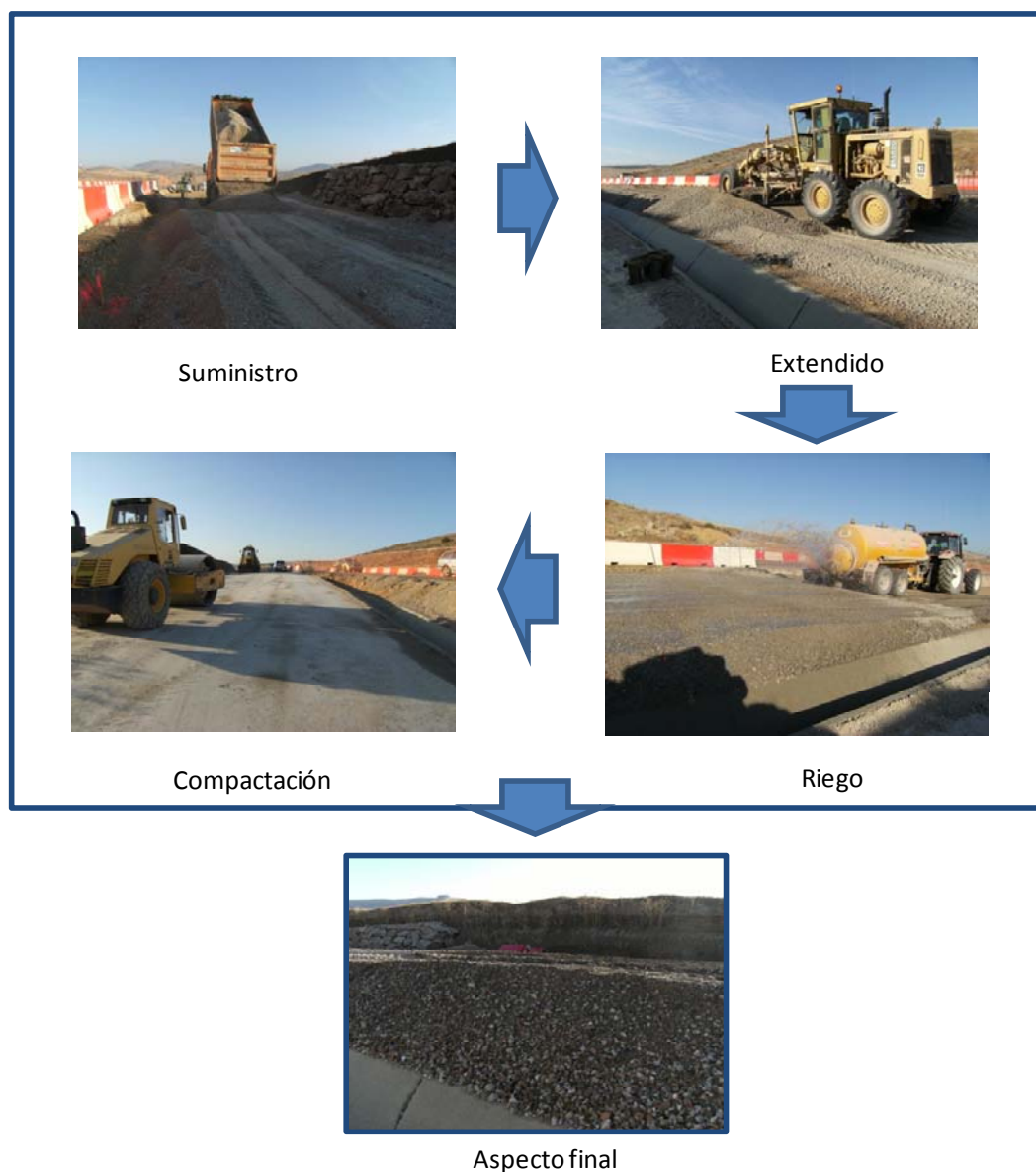


Figura 15. Fases de puesta en obra de la zahorra reciclada y natural

Siguiendo el esquema de la metodología, a continuación se procede a describir los ensayos realizados durante la puesta en obra de los materiales.

4.7. PLAN DE ENSAYOS DURANTE LA EJECUCIÓN

Los ensayos realizados durante la ejecución de la obra se hicieron conforme al artículo 510.5 del PG-3 y fueron los siguientes: ensayo de compactación (Próctor Modificado), densidad y humedad in situ y ensayo de placa con carga. A continuación se describirá el plan de ensayos realizado durante la ejecución del tramo de investigación. Para la descripción del plan de ensayos es necesario introducir el concepto de lote.

El artículo 510.9.3 del PG-3 lo define como el menor que resulte de aplicar tres criterios a una sola tongada de zahorra: longitud de quinientos metros de calzada, superficie de tres mil quinientos metros cuadrados de calzada o la fracción construida diariamente. El lote se aceptará o rechazará en bloque.

En nuestro caso solo habrá un lote por ser la longitud menor de 500 m, pero se ha tomado más de una muestra con objeto de obtener resultados más representativos.

Según el citado artículo, se realizarían ensayos para determinar la humedad y la densidad en emplazamientos aleatorios con un mínimo de siete por cada lote, determinando además en esos puntos el espesor de la capa de zahorra.

Para evaluar la capacidad portante de la capa se realizó un ensayo de carga con placa según la norma NLT-357 (CEDEX, 1998a) por lote, tal como indica el artículo citado.

En lo relativo a la regularidad superficial de la capa finalizada se debía realizar el control para cada lote antes de extender la siguiente capa, mediante la determinación del índice de regularidad internacional (IRI) basado en la norma NLT-330 (CEDEX, 1998b).

En nuestro caso, este ensayo no se ha realizado ya que el tramo de zahorra reciclada es un ramal menor de 100 m por lo que los resultados no serían significativos.¹⁰

En la tabla siguiente se recoge un resumen de los ensayos realizados durante la puesta en obra de las zahorras:

¹⁰ La respuesta dinámica de un vehículo al circular por una carretera y por tanto el coeficiente IRI, depende fundamentalmente de la velocidad de operación del vehículo. La NLT-330 define el IRI para un vehículo tipificado que circula a 80 km/h por el tramo de carretera que se pretende evaluar. Obviamente, en un ramal de enlace menor de 100 m de longitud era inviable alcanzar esta velocidad por el vehículo de control ADAR.

Ensayo	Norma
Ensayo de Compactación. Próctor Modificado	UNE 103501
Densidad in situ	ASTM D 2922
Humedad in situ	ASTM D 3017
Ensayo de carga con placa	NLT-357

Tabla 11. Ensayos para la puesta en obra del material natural y reciclado.

- ENSAYO DE COMPACTACIÓN EN LABORATORIO. PRÓCTOR MODIFICADO (UNE 103501)

El ensayo Próctor permite obtener en laboratorio la densidad seca máxima y la humedad óptima de un material para una determinada energía de compactación.

Se define como “densidad seca máxima del ensayo Próctor modificado” la que se obtiene para la “humedad óptima”, para una determinada energía de compactación.

La humedad óptima de compactación es aquella humedad (% de agua) para la cual la densidad del suelo es máxima. Para determinar la humedad óptima y densidad máxima se realizan cuatro ensayos de un mismo suelo pero con diferentes humedades, de forma que después de haber realizado las compactaciones obtendremos cuatro densidades de este suelo para cuatro humedades diferentes. Se representan gráficamente los cuatro valores de densidad y humedad obtenidos. Se traza una curva con los cuatro puntos, de manera que el punto más alto de la curva nos dará la densidad seca máxima y la humedad óptima del suelo. (fig. 16).

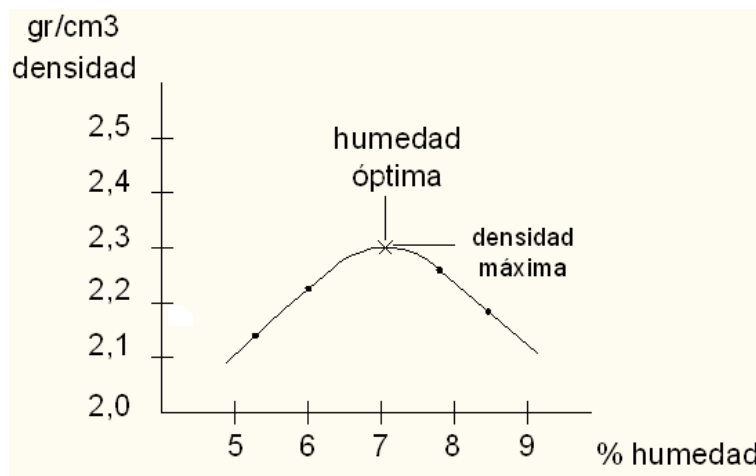


Figura 16. Ejemplo de curva para el Ensayo Próctor.

Fuente: M.O.P.U., 1987. Sistematización de los Medios de Compactación y su Control.

La densidad seca máxima nos permitirá saber la densidad que debemos conseguir en obra tras compactar la capa, y la humedad óptima nos permitirá conocer cuál debe ser la dotación de agua para la puesta en obra del material. Según el artículo 510.5.1 del PG-3, la humedad óptima por la que se procederá a la compactación del material en obra puede tener una tolerancia entre -1,5 y +1 respecto al % de la humedad óptima

(teniendo en cuenta la categoría de tráfico pesado que tiene el tramo de investigación, T4). Sin embargo, según el artículo 510.10 del PG-3, los ensayos de humedad *“tendrán carácter indicativo y no constituirán, por sí solos, base de aceptación o rechazo de la capa”*. En cuanto a la densidad que debe de alcanzarse en obra para las categorías de tráfico pesado T4, según el artículo 510.10 del PG-3 se podrá admitir una densidad no inferior al noventa y ocho por ciento (98%) de la máxima de referencia obtenida en el ensayo Próctor modificado.

Existen dos tipos de ensayo Próctor normalizados; el "Ensayo Próctor Normal", y el "Ensayo Próctor Modificado". La diferencia entre ambos estriba en la distinta energía utilizada, debido al diferente peso del pisón y altura de caída.

El ensayo Próctor normal es el habitual de los suelos empleados en el núcleo del terraplén, mientras que el modificado suele exigirse para los suelos de coronación del terraplén, para los suelos estabilizados y para los materiales granulares, tratados o no con conglomerantes, empleados en las capas del terraplén o firme de carretera.

En nuestro caso se exigió el ensayo del Próctor Modificado por estar en capas de firme y tratarse de zahorras, en base al artículo 510.7.1. del PG-3.

- ENSAYO DE DENSIDAD Y HUMEDAD IN SITU (ASTM D 2922 Y ASTM D 3017).

Tanto la densidad como la humedad in situ, una vez compactada la capa de zahorra reciclada o de cantera, se determinaron mediante el método nuclear.

Este método nos permite precisar rápidamente la Densidad Seca y la Humedad de los suelos in situ sin tener que recurrir a métodos de intervención física tales como la extracción de testigos.

El equipo utilizado para este ensayo es el Densímetro Nuclear (ver fig.17) que permite obtener la Densidad mediante la transmisión de rayos gamma cuantificando el número de fotones emitidos por una fuente de Cesio-137. Los detectores ubicados en la base del medidor detectan los rayos gamma y un microprocesador convierte los conteos en una medida de Densidad.

Por el contrario, para determinar la Humedad de los suelos y materiales semejantes se utiliza el principio de termalización de neutrones. El Hidrógeno (agua) en el material frena los neutrones emitidos por una fuente construida de Americio 241. La detección de los neutrones frenados se hace mediante detectores de Helio-3 situados en la base de la sonda.

Los datos de Densidad Seca y porcentaje de Humedad se obtienen directamente del aparato de medición.



Figura 17. Aparato densímetro nuclear

Fuente: <http://www.iscyc.net/>

- ENSAYO DE CARGA CON PLACA (NLT-357).

Este ensayo permite determinar la deformabilidad y la capacidad portante del suelo. A partir de una serie de curvas se puede calcular el módulo de compresibilidad E_v .

El ensayo consiste en la aplicación de unas ciertas cargas sobre una placa circular de 700 cm^2 (30 cm de diámetro), apoyada sobre la capa del firme, y en la medida de los asientos producidos.

Tras la aplicación de una carga sobre la placa se produce un asiento inmediato que se estabiliza en unos minutos. Parte de esta deformación se recuperaría si se descargase la placa pero parte de ella es remanente. Posteriormente se pasa a otro escalón de carga que producirá otro asiento, repitiendo el proceso para los escalones que indica la norma NLT-357, dependiendo del uso del suelo que se ensaye. Este procedimiento se repite tras la descarga de la placa, obteniéndose los asientos para los sucesivos ciclos de carga.

Esto permite establecer una relación entre cargas y asientos que se puede representar gráficamente mediante la correspondiente curva carga-asiento. Los coeficientes de compresibilidad E_{vi} (E_{v1} para el primer ciclo y E_{v2} para el segundo ciclo de carga) se obtienen mediante la expresión:

$$E_{vi} = \frac{\Delta P_i}{\Delta s_i} D$$

Siendo:

ΔP_i : Diferencia de carga transmitida al suelo entre dos escalones, en MPa.

Δs_i : Diferencia de asientos de la placa al aplicar ΔP , en mm

D: Diámetro de la placa en mm.

De acuerdo al artículo 510.10 del PG-3, para aceptar el lote el valor del módulo de compresibilidad en el segundo ciclo de carga del ensayo de carga con placa (E_{v2}) será superior a 60 MPa.

El valor de la relación de módulos E_{v2}/E_{v1} será inferior a dos unidades y dos décimas (2,2).

4.8. PLAN DE ENSAYOS DE EVOLUCIÓN

Una vez puesta en obra la zahorra en los dos ramales de investigación se procede a ejecutar las dos capas de aglomerado tal y como se describió en las secciones tipo del tramo.

Tras finalizar los tramos de investigación se programa un plan de ensayos para controlar la evolución de los tramos durante cuatro años y que consistirá en un plan de auscultación de dinámica de alto rendimiento e inspecciones visuales, tal y como se detalla a continuación.

4.8.1. INSPECCIÓN VISUAL.

El control de la evolución de los tramos experimentales, tras su puesta en servicio, se ha llevado a cabo mediante un plan de auscultación dinámica con equipos de alto rendimiento (ADAR) que será explicado en el siguiente punto, con una cadencia semestral, durante cuatro años y acompañada de una inspección visual para detectar posibles defectos como grietas, fisuras, etc. En cada una de las inspecciones visuales se ha realizado un reportaje fotográfico.

4.8.2. DEFLEXIONES

El control ADAR es un control de obras mediante una serie de equipos de auscultación de carreteras que trata de conocer de una forma intensiva, continuada y no destructiva, la calidad de la ejecución de las diferentes capas de los firmes. Es una auscultación dinámica de alto rendimiento de determinados parámetros como la capacidad portante, que se mide a través de las deflexiones, la regularidad superficial y los espesores de las capas desde la explanada hasta la capa de rodadura, pasando por las capas intermedias a lo largo de la construcción de un firme de carretera, permitiendo conocer si la ejecución de la obra se ajusta a los parámetros del proyecto. El objetivo del ensayo es evaluar la calidad de la ejecución de las distintas capas del firme.

Para el caso de nuestra investigación se ha utilizado este ensayo para controlar la evolución de la capacidad estructural del firme en el tiempo, determinada a partir de las deflexiones. El ensayo ADAR se realizó sobre la capa terminada de zahorra (tanto

reciclada como de cantera), la capa intermedia de aglomerado y la capa de rodadura finalizada.

La deflexión es el parámetro empleado para la caracterización de la capacidad portante de un pavimento. Se determina midiendo la deformación producida en la superficie del pavimento por efectos de la aplicación de una carga conocida.

Para obtener la capacidad estructural de cada tramo se ha utilizado el programa de cálculo ICAFIR (herramienta informática de la Instrucción para el diseño de firmes de la red de carreteras de Andalucía) publicado por Gestión de Infraestructuras de Andalucía (GIASA). Se han calculado las deflexiones teóricas que se han comparado con las deflexiones reales obtenidas por los vehículos de auscultación. El análisis de las deflexiones se lleva a cabo aplicando las teorías del *“modelo del cálculo directo”*.

En el caso de esta investigación se ha querido complementar el método de cálculo directo con el de cálculo inverso (4.8.2.2).

4.8.2.1. CÁLCULO DIRECTO

El cálculo directo consiste en comparar la deflexión teórica calculada con la deflexión real en cada una de las capas del firme. En el Proyecto de construcción de la carretera están definidos los módulos de elasticidad que tienen cada una de las capas que componen el firme. Estos módulos de elasticidad teóricos son los señalados en la *“Instrucción para el diseño de firmes de la red de carreteras de Andalucía”* (ICAFIR) en función de las características que, al efecto, se exponen en el Proyecto.

Con estos parámetros y mediante el programa de cálculo ICAFIR¹¹ se determinan, para la estructura del firme ejecutado en obra en el momento del ensayo, las deflexiones teóricas que se compararán con las obtenidas por los vehículos de auscultación, una vez finalizada la obra.

Para la medida de las deflexiones en obra se ha utilizado un Deflectómetro de Impacto (fig.18).

¹¹ Programa diseñado por la Junta de Andalucía, disponible su descarga en la página web de la Agencia de Obra Pública de la Junta de Andalucía (http://www.aopandalucia.es/principal.asp?alias=descarga&t=6&idsejpf=area_tecnica%5CIngenieria%5CRedaccion_de_proyectos%5CICAFIR)



Figura 18. Vehículo deflectómetro de impacto
Fuente: Gestión y Auscultación de Infraestructuras, S.L.

El sistema de ensayo del Deflectómetro de Impacto consiste en un vehículo de arrastre, del tipo todo terreno, en cuya cabina se instala un ordenador personal con el software necesario para que el operador ejecute y controle el ensayo. Este vehículo arrastra un tráiler de medida, donde se ubica el deflectómetro de impacto con un sistema de guías capaz de levantar unas pesas a alturas variables reguladas por el operario mediante un ordenador desde la cabina, una célula de carga y los geófonos colocados en una viga con situación regulable. En función del número de pesas empleado y de la altura a las que se dejan caer sobre la placa, se podrán obtener distintas presiones en la placa.

Las pesas al caer golpean una serie de tetones de goma unidos a una placa circular de 30 ó 45 cm de diámetro, que transmite la fuerza a la capa analizada y a la estructura de firme subyacente.(Fig.19).

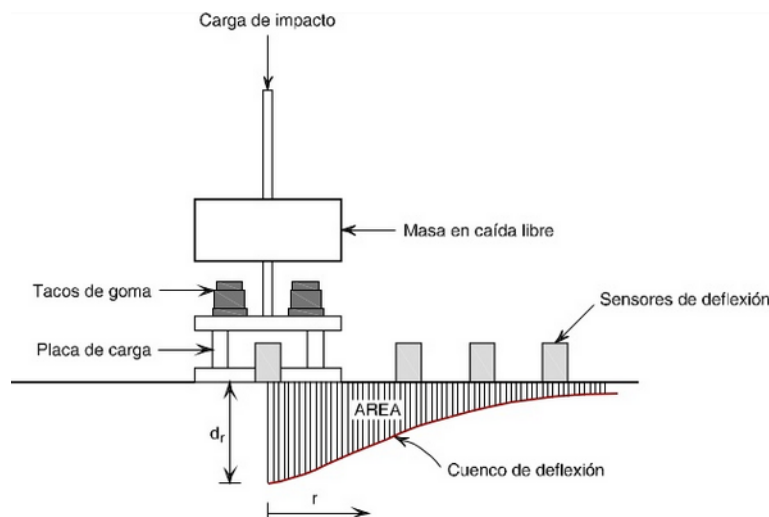


Figura 19. Esquema de funcionamiento del deflectómetro.
Fuente: VI Jornadas de pavimentos y mantenimiento vial. Bogotá. C.H. Higuera, 2011

La medida de la deflexión se realiza calculando la deformación producida en la superficie del pavimento y se mide por medio del sensor situado en el centro de la placa. La deflexión obtenida se compara con la deflexión teórica y se comprueba si se cumplen las especificaciones del Proyecto. La deflexión real no debe ser mayor que la teórica.

Para ver si el tramo de investigación sigue cumpliendo la especificación en el tiempo, una vez sometido a las solicitaciones del tráfico se realiza este ensayo cada seis meses. Se obtiene de esta forma la evolución de la capacidad estructural del firme en el tiempo.

4.8.2.2. CÁLCULO INVERSO

El cálculo directo permite el cálculo de las tensiones, deformaciones y deflexiones a partir de una estructura de firme dada. Para ello deben conocerse las cargas impuestas por el tráfico, los espesores de las capas y sus parámetros estructurales (módulos y coeficientes de Poisson).

El cálculo inverso permite obtener los parámetros estructurales característicos de cada una de las capas del pavimento (módulos) a partir de las deflexiones medidas sobre su superficie, la carga aplicada por el deflectómetro de impacto y los espesores de las correspondientes capas de estructura del pavimento, tal y como se muestra en la figura 20.



Nota:

E =Módulo de los materiales

γ =Coeficiente de Poisson

h =espesor de la capa

δ = Deflexión del pavimento

ϵ = Deformación unitaria

σ = Esfuerzo de cada capa de la estructura

Figura 20. Variables para el cálculo directo e inverso.

Fuente: Ávila, 2014.

El cálculo inverso permite estimar la capacidad estructural de un firme existente a partir de la medida de su desplazamiento vertical (deflexión) bajo una carga conocida.

Para realizar el cálculo inverso se necesita conocer los espesores de las capas y los valores de la deflexión en el punto de carga y en varios puntos alejados del punto de impacto, lo que se conoce como el cuenco de deflexiones (figura 19). El cuenco de deflexiones es generado por el impacto de una carga estándar a través del Deflectómetro de Impacto.

El principio de medida de un deflectómetro de impacto para la obtención del cuenco de deflexión es relativamente sencillo. Para ello se aplica un impacto sobre el pavimento por medio de la caída libre de una carga sobre un sistema de amortiguación, que a su vez está colocado sobre una placa de carga que reparte las tensiones. Por medio de unos sensores (geófonos o sismómetros) se mide la deformación vertical de la superficie (deflexión) bajo el punto de aplicación de la carga y a unas distancias determinadas del mismo (habitualmente en seis u ocho puntos más, dependiendo del equipo y de las características del trabajo). El conjunto de dichas deflexiones registradas es lo que se denomina cuenco de deflexión. El geófono ubicado bajo el plato de carga medirá la deflexión máxima.

A partir de los valores de deflexión obtenidos se determinan los valores de los módulos de elasticidad de las capas mediante el cálculo inverso.

En el cálculo inverso la solución no es exacta ni única y se requieren una serie de reiteraciones y de condiciones para ajustar la solución a los criterios de la ingeniería de firmes.

El análisis inverso es una evaluación mecanicista de la superficie del pavimento y del cuenco de deflexiones generado por el deflectómetro de impacto. Involucra el cálculo de las deflexiones teóricas asumiendo una primera aproximación para los módulos de cada capa. En una fase posterior y mediante un proceso iterativo se ajustan las curvas de deformación teóricas y las curvas medidas por el deflectómetro de impacto hasta que se presente un ajuste razonable. Los módulos hallados de esta manera se consideran representativos de la respuesta del pavimento frente a la carga (Ávila, 2014).

Para el cálculo del módulo inverso se ha utilizado el software EVERCALC 5.0.¹², desarrollado por el Departamento de Transportes del Estado de Washington (USA).

El programa utiliza como subrutina el programa WESLEA¹³ para calcular las deflexiones teóricas del modelo multicapa elástico y el algoritmo modificado de Gauss-Newton para la optimización de los resultados. En esencia, el programa calcula las deflexiones teóricas y las va comparando con las deflexiones medidas, por el deflectómetro de impacto, ajustando por iteración los valores de los módulos hasta obtener una diferencia entre las deflexiones calculadas y las deflexiones medidas que se consideren

¹²Everseries Pavement Analysis Programs (Sivaneswaran, Pierce and Mahoney, 2001)

¹³David H. Timm, 1999. Department of Civil Engineering. Auburn. University. www.engauburn.edu/users/timmdav/Software.html

adecuadas. El programa permite ubicar hasta siete sensores y 8 golpes por cada punto de ensayo. El número máximo de capas de firme que pueden calcularse son cinco.

A partir de unos valores iniciales de módulos propuestos por el usuario se establece una semilla de módulos y el programa busca mediante iteraciones sucesivas el valor final del módulo de cada capa que hace que las diferencias entre las deflexiones medidas y calculadas sea menor que una tolerancia.

El error medio cuadrático se calcula por la expresión:

$$RMS (\%) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{d_{ci} - d_{mi}}{d_{mi}} \right)^2}$$

- d_{ci} y d_{mi} : deflexiones medidas y calculadas
- n : número de sensores.

Valores de RMS inferiores al 1% se consideran aceptables y permiten concluir que los cálculos son correctos.

A partir de los módulos obtenidos el software calcula las tensiones y deformaciones en la fibra inferior de la primera capa, en la mitad de las otras capas y en la fibra superior de la explanada (capa de espesor infinito).

El diagrama de flujos de la figura 21 describe las fases del cálculo inverso.

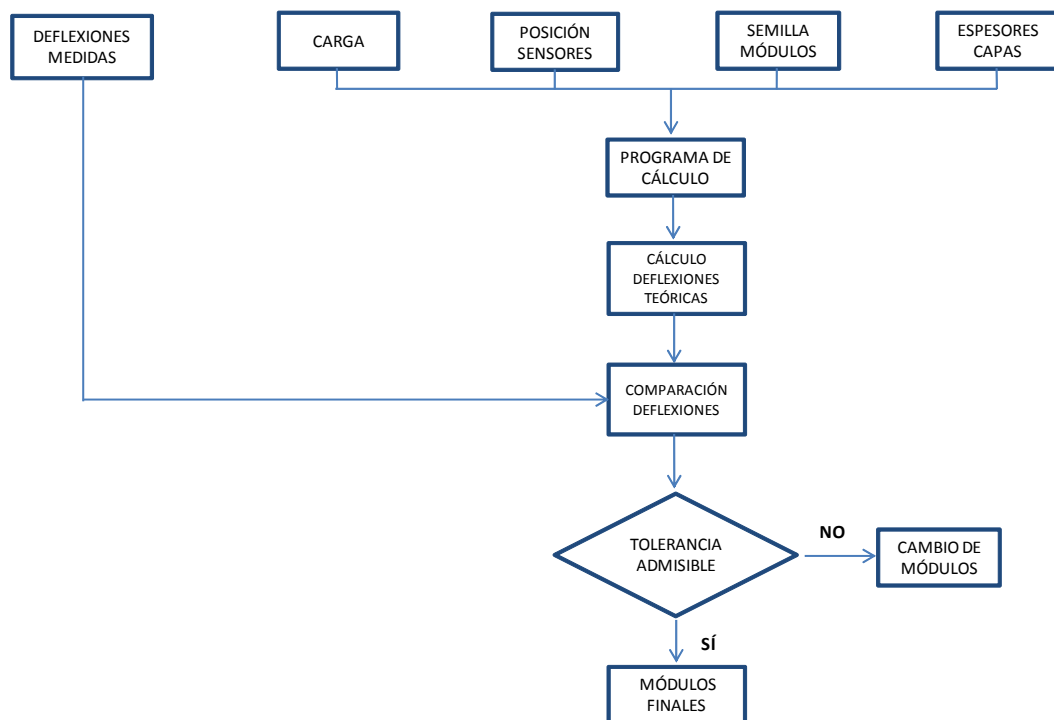


Figura 21. Esquema de cálculo inverso.
Fuente: Gestión y Auscultación de infraestructuras, S.L

Una vez obtenidos los módulos de elasticidad, a través del cálculo inverso, se compararán con los módulos teóricos. Si los valores obtenidos son mayores que los teóricos, quiere decir que las capas tendrán una respuesta elástica mayor que la teórica y, por tanto, mejor capacidad estructural que la diseñada en fase de proyecto.

A continuación, se detalla el cronograma de los ensayos realizados para controlar la evolución en el tiempo de los tramos de investigación.

4.8.3. ELABORACIÓN DEL PLAN DE CONTROL DE EVOLUCIÓN.

El plan de control se redactó según lo indicado en el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para los controles de Auscultación Dinámica de Alto Rendimiento de la AOPJA.¹⁴

En un primer momento se auscultó, además de las deflexiones, el Índice de Regularidad Internacional (IRI) y se pretendía igualmente controlar su evolución cada 6 meses. Se obtuvieron lecturas de IRI poco usuales que se ha considerado que puedan deberse a la longitud de los tramos, que no supera los 100 m (ver punto 4.7.) Se tomó la decisión de no incluir el IRI, como parámetro de control, para estudiar la evolución de los tramos.

Una vez finalizados los trabajos, en marzo del 2009, se realizó un seguimiento posterior de los tramos ejecutados durante un periodo de 4 años, donde se llevó a cabo un control de las deflexiones cada 5 metros y al tresbolillo. Dado que los tramos de investigación tenían poca longitud, se decidió aumentar la cadencia del impacto del deflectómetro para tener más valores de deflexiones y que los resultados fueran más representativos.

La investigación finalizó en marzo del 2013.

El cronograma para realizar los ensayos de control ADAR se realizó como sigue:

	AÑO 1		AÑO 2		AÑO 3		AÑO 4	
Nº SEGUIMIENTO	1	2	3	4	5	6	7	8
FECHA	MAR-09	OCT-09	MAR-10	SEPT-10	MAR-11	SEPT-11	OCT-12	MAR-13

Figura 22. Cronograma de ensayos de control ADAR

¹⁴http://www.aopandalucia.es/inetfiles/area_tecnica/Calidad/ADAR/pliego_prescripciones_ADAR.pdf

5 RESULTADOS

5. RESULTADOS

En este capítulo se exponen y analizan los resultados obtenidos en cada una de las fases de la investigación. Se va a analizar el comportamiento en condiciones de tráfico real de un firme construido con una capa de material procedente de residuos de construcción y demolición. Este comportamiento será comparado con el del material natural colocado en las mismas condiciones que el anterior.

5.1. ESPECIFICACIONES DE LOS MATERIALES

Los materiales utilizados deben cumplir con las especificaciones expuestas en la metodología y que son las exigidas en el artículo 510 del PG-3. Para ambos materiales son las mismas, siendo la única diferencia (tabla 8) los valores límite para el Ensayo de Desgaste de los Ángeles, menor de 35 para la Zahorra artificial de cantera y menor de 45 para la Zahorra reciclada.

Los materiales objeto de esta investigación fueron certificados con el marcado CE asegurando así que cumplían los requisitos exigidos.

Las plantas de procedencia de los materiales, el tipo y su designación correspondiente fueron los siguientes:

- **Zahorra artificial de cantera**

La zahorra artificial de cantera utilizada en este tramo experimental fue la misma que la empleada para el resto de esta obra.

Se eligió “Zahorra artificial caliza” procedente de la Cantera de Cañete La Real (Málaga). Este producto poseía el marcado CE y la designación de la etiqueta CE era 0/32. Su designación correspondiente en el PG-3 era: “Zahorra artificial ZA-25”.

- **Zahorra de áridos reciclados**

La zahorra reciclada fue fabricada por ARISTERRA en su planta de reciclaje de Málaga.

Este producto poseía el marcado CE y la designación de la etiqueta CE era 0/32. Su designación correspondiente en el PG-3 era: “Zahorra reciclada RCDs ZA-25”.

5.2. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES

Antes de poner los materiales en obra, se realizaron sus ensayos de caracterización, tal y como se ha descrito en la metodología (tabla 5). De este modo, se comprobó que los

materiales cumplían las especificaciones establecidas para esta investigación. Esta caracterización permitió además establecer los parámetros de humedad y compactación de puesta en obra de los materiales. Se realizó una campaña de ensayos de los materiales acopiados en la entrada en obra, tanto de los procedentes de la planta de reciclado como de los que procedían de la cantera.

Los resultados de los ensayos fueron los siguientes:

5.2.1. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO:

- **Zahorra artificial de cantera**

En la tabla 12 se muestran los resultados del análisis granulométrico realizado a la zahorra artificial de cantera para cuatro muestras. Se reflejan los valores medios del conjunto de ensayos. Estos valores son los que sirvieron de referencia para decidir si el material era aceptado para su colocación en obra. Los resultados de estos valores medios debían situarse entre los valores límite máximos y mínimos que marca el PG-3 para cada huso granulométrico.

Tamiz (mm)	% material que pasa (en peso)								
	40	25	20	8	4	2	0,5	0,25	0,063
Ensayo 1	92,6	88,4	86,4	44,4	31,5	14,6	12,7	12,7	10,2
Ensayo 2	100,0	99,5	99,1	88,8	43,7	29,1	11,8	8,7	5,2
Ensayo 3	100,0	100,0	100,0	78,0	53,0	36,0	16,0	12,0	10,2
Ensayo 4	100,0	100,0	99,0	75,0	55,0	39,0	18,0	14,0	9,1
Valor medio	98,2	97,0	96,1	71,6	45,8	29,7	14,6	11,9	8,7

	40,0	25,0	20,0	8,0	4,0	2,0	0,5	0,25	0,063
Límite mín PG3	100,0	75,0	65,0	40,0	26,0	15,0	7,0	4,0	0,0
Límite máx PG3	100,0	100,0	90,0	63,0	45,0	32,0	21,0	16,0	9,0

Nota: En rojo se destacan los valores que no cumplen con las especificaciones del PG-3.

Tabla 12. Ensayos de análisis granulométrico en zahorra artificial de cantera.

En color rojo se han marcado los resultados anómalos que quedarían fuera de los límites que marca el PG-3. Hay tres valores medios que quedan fuera de los límites establecidos por el PG-3 (tamices 20, 8 y 4 mm), siendo el tanto por ciento de material que pasa por esos tamices mayor al permitido. Presentan valores en porcentaje de material que pasa del 96.1 %, 71.6 %, y del 45.8 % respectivamente, cuando el límite máximo permitido por el PG-3 es del 90 %, 63 % y del 45%.

Como se aprecia, la dispersión respecto a los husos granulométricos permitidos en el PG-3 no es muy significativo. Siguiendo este criterio, se tomó la decisión de aceptar la zahorra artificial de cantera para colocarla en obra.

- **Zahorras de áridos reciclados**

En la tabla 13 se muestran los resultados del análisis granulométrico, realizado a la zavorra de áridos reciclados para dos muestras. Al igual que para la zavorra de materiales naturales, se reflejan los valores medios del conjunto de ensayos, estos valores son los que sirvieron de referencia para decidir si el material era aceptado para su colocación en obra. Los resultados de estos valores medios debían situarse entre los valores límite máximos y mínimos que marca el PG-3 para cada huso granulométrico.

Tamiz (mm)	% de material que pasa (en peso)								
	40	25	20	8	4	2	0,5	0,25	0,063
Ensayo 1	100,0	97,3	90,6	57,1	40,5	30,6	16,2	10,7	4,6
Ensayo 2	100,0	96,0	89,0	59,0	46,0	36,0	22,0	16,0	10,0
Valor medio	100,0	96,7	89,8	58,1	43,3	33,3	19,1	13,4	7,3

	40,0	25,0	20,0	8,0	4,0	2,0	0,5	0,250	0,063
Límite mín PG3	100,0	75,0	65,0	40,0	26,0	15,0	7,0	4,0	0,0
Límite máx PG3	100,0	100,0	90,0	63,0	45,0	32,0	21,0	16,0	9,0

Nota: En rojo se destacan los valores que no cumplen con las especificaciones del PG-3.

Tabla 13. Ensayos de análisis granulométrico en zavorra de áridos reciclados.

Solo un valor medio, el del tamiz de 2mm, presenta un valor anómalo, un 33,3 %, cuando el valor máximo permitido es el 32 %.

Como se aprecia la dispersión respecto a los husos granulométricos permitidos en el PG-3 es mínima. Siguiendo este criterio, de diferencia mínima, se tomó la decisión de aceptar la zavorra reciclada para colocarla en obra.

En la figura 23 se representa la gráfica comparativa de ambas zavorras. Se han incluido las curvas con las especificaciones del PG-3, tanto su límite mínimo como máximo. En color rosa se dibuja la curva del análisis granulométrico para la zavorra de cantera y en naranja la de árido reciclado.

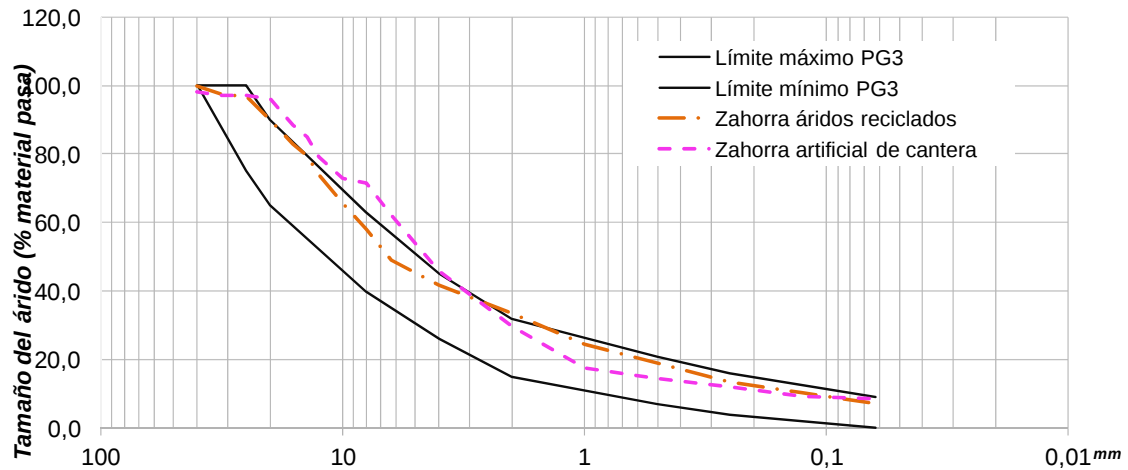


Figura 23. Comparativa del análisis granulométrico para ambos tipos de zahorra.

Como se observa en la figura 23, la curva de la zahorra de áridos reciclados se ajusta más a los límites máximos y mínimos permitidos por la normativa, quedando su curva encuadrada dentro de las dos curvas de límites establecidos por el PG-3

5.2.2. FORMA DEL ÁRIDO GRUESO

Para determinar la forma del árido grueso se realizó el ensayo del índice de lajas.

Para la zahorra artificial de cantera, los ensayos dieron un resultado para el índice de lajas de ocho. El valor máximo permitido por el PG-3 es de treinta y cinco. Podemos concluir que el porcentaje de partículas con mala forma es mínimo.

Para la zahorra de áridos reciclados, los ensayos arrojaron un resultado para el índice de lajas de 12. Es un valor algo más alto que el de la zahorra de cantera, pero resulta igualmente satisfactorio por encontrarse en un valor muy inferior al permitido por el PG-3.

5.2.3. PORCENTAJE DE PARTÍCULAS TRITURADAS O FRACTURADAS (% EN MASA)

El resultado del porcentaje de partículas fracturadas para ambos materiales ha sido mayor del 50%. Para el caso de la Zahorra artificial de cantera del 100% y para la Zahorra de áridos reciclados del 93%, muy superior al límite mínimo establecido en el PG-3. Se puede determinar que el resultado del ensayo para ambos materiales es muy satisfactorio.

5.2.4. RESISTENCIA A LA FRAGMENTACIÓN

La resistencia a la fragmentación se determina por el Coeficiente de Desgaste de los Ángeles. Los resultados para ambos materiales se trasladaron a la tabla 14. El valor medio del resultado de los ensayos realizados sería el valor que se compararía con el valor límite que establece el PG-3, determinando así si el material era apto.

Ensayo	Tipo de material	
	Zahorra artificial de cantera	Zahorra de áridos reciclados
Ensayo 1	34,0	-
Ensayo 2	33,0	34,0
Ensayo 3	28,0	35,0
Valor medio	31,7	34,5
Límite PG-3	<35	<45

Tabla 14. Resultados del ensayo de desgaste de los Ángeles para ambos tipos de zahorra.

Como se observa en la tabla 14, para la zahorra artificial de cantera el valor medio que arrojan los resultados de las distintas muestras (31.7) es menor que el límite máximo permitido por el PG-3 (35). La zahorra artificial de cantera cumple los requisitos de la resistencia a la fragmentación.

Para la zahorra de áridos reciclados el límite máximo establecido por el PG-3 es más alto que para la zahorra artificial, 45 frente a 35. El valor medio de los resultados de los ensayos de los laboratorios fue del 34.5. El material no solo cumple el límite máximo de 45 del PG-3 sino también con el límite de 35 establecido para la zahorra artificial.

De lo anterior se deduce que los requisitos de la resistencia a la fragmentación son superados por ambas zavorras.

5.2.5. REQUISITOS QUÍMICOS.

Los requisitos químicos que exige el PG-3 para las zavorras hacen referencia al contenido de materia orgánica y al contenido ponderal de compuestos de azufre totales (expresados en SO_3), determinado según la UNE-EN 1744-1.

- Contenido en materia orgánica:

Tanto la zahorra de áridos reciclados como la zahorra artificial de cantera estaban ausentes de sustancia orgánica, medida ésta en base al contenido de humus.

- Contenido total de azufre ($\text{SO}_3\%$):

Ambos materiales cumplieron los requisitos mínimos del PG-3 (menor del 1%) sobre el contenido total de azufre. Así la zahorra artificial de cantera dio un valor del 0,2 % de SO_3 y la zahorra de áridos reciclados de 0,52 %.

5.2.6. LIMPIEZA

El ensayo del equivalente de arena es un índice representativo de la limpieza de la muestra. Según el PG-3, para las zahorras debe ser mayor de 35. Estos fueron los resultados que arrojaron los ensayos para las distintas muestras, así como sus valores medios.

Ensayo	Tipo de material	
	Zahorra artificial de cantera	Zahorra de áridos reciclados
Ensayo 1	47,0	-
Ensayo 2	42,0	49,0
Ensayo 3	59,0	41,0
Valor medio	49,3	45,0
Límite PG-3	>35	>35

Tabla 15. Resultados del ensayo del equivalente de arena para ambos tipos de zahorra.

Como se observa en la tabla 15, la zahorra artificial de cantera cumple los requisitos de la limpieza de la muestra, al ser el valor medio que arrojan los resultados de las distintas muestras (49.3) mayor al límite mínimo permitido por el PG-3 (35).

Para la zahorra de áridos reciclados, el límite mínimo establecido por el PG-3 es el mismo que para la zahorra artificial (>35). El valor medio de los resultados de los ensayos es de 45. Podemos concluir que la zahorra de áridos reciclados también supera satisfactoriamente este ensayo.

5.2.7. PLASTICIDAD

Ambos materiales resultaron no plásticos, tal y como exige el PG-3.

5.2.8. PRÓCTOR MODIFICADO. DENSIDAD MÁXIMA Y HUMEDAD ÓPTIMA

El ensayo de Próctor Modificado permite obtener en laboratorio la densidad seca máxima y la humedad óptima para una determinada energía de compactación.

De este modo conoceremos qué densidad debemos conseguir en obra tras compactar la capa y cuál debe ser la dotación de agua para la puesta en obra del material.

Para las categorías de tráfico pesado T4, que es nuestro caso, y según el artículo 510.10 del PG-3, la mínima densidad a obtener en obra tras la compactación debe ser del 98% de la máxima de referencia obtenida en el ensayo Próctor Modificado. Para la humedad, según el artículo 510.5.1. del PG-3, la tolerancia admisible de humedad respecto al porcentaje de humedad óptima que el material debe alcanzar antes de proceder a compactar debe estar entre el -1.5 y el +1% de la humedad óptima obtenida en el laboratorio.

Los resultados obtenidos en el ensayo Próctor Modificado para el material de cantera y el reciclado fueron los siguientes:

- **Zahorra artificial de cantera**

La tabla siguiente recoge los resultados de los ensayos a cuatro muestras. Se calcula su valor medio para tomarlo como valor de referencia.

Ensayo	Próctor Modificado	
	densidad máxima(g/cm ³)	humedad óptima (%)
Ensayo 1	2,36	6,90
Ensayo 2	2,26	7,80
Ensayo 3	2,32	6,90
Ensayo 4	2,29	6,30
Valor medio	2,31	6,98

Tabla 16. Resultados del ensayo Próctor Modificado en zahorra artificial.

Según los resultados obtenidos en la tabla 16, para la zahorra artificial de cantera la densidad mínima a obtener, una vez compactada la capa, será el 98% de 2.31, es decir, 2.26 gr/cm³.

El valor medio de referencia del porcentaje de humedad óptima es del 6,98. Para la zahorra de cantera, la humedad óptima previa a la compactación estará comprendida en el intervalo comprendido entre el 6.98%-1,5% y el 6.98%+1%, lo que da lugar al intervalo de humedad [5.48% ,7.98%].

- **Zahorras de áridos reciclados**

En cuanto a la zahorra de áridos reciclados los resultados obtenidos en el ensayo Próctor Modificado fueron los que se muestran en la tabla siguiente. Al igual que para la zahorra artificial, se tomó como valor de referencia la media de los dos ensayos realizados.

Ensayo	Próctor Modificado	
	densidad máxima(g/cm ³)	humedad óptima (%)
Ensayo 1	2,05	9,52
Ensayo 2	2,05	10,60
Valor medio	2,05	10,06

Tabla 17. Resultados del ensayo Próctor Modificado en zahorra de áridos reciclados.

Como se aprecia en la tabla 17, para la zahorra de áridos reciclados la densidad mínima a obtener, una vez compactado el material en obra, debía ser el 98% de 2,05 gr/cm³. La humedad óptima a alcanzar sería el 10,06%. Este porcentaje es mayor que el obtenido para la zahorra artificial. Esto es acorde con las conclusiones de Agrela et al.(2012) que destacan la mayor absorción de humedad del material reciclado frente al natural. Al igual que para la zahorra artificial, según el artículo 510.5.1. del PG-3, la tolerancia admisible de humedad respecto al porcentaje de humedad óptima que el material debe alcanzar antes de proceder a compactar estará comprendida entre el 10,06%-1,5% y el 10,06+1% (8,56% y 11,06%).

Como se verá en el siguiente apartado, este mayor grado de absorción de humedad ha sido uno de los problemas de la puesta en obra de estos materiales.

5.3. RESULTADOS DE LA PUESTA EN OBRA

5.3.1. ENSAYO DE COMPACTACIÓN. DENSIDAD Y HUMEDAD IN SITU.

Los resultados de los ensayos de compactación y de humedad in situ para ambos tipos de zahorra fueron los siguientes:

- **Zahorra artificial de cantera**

Según se ha comentado en el apartado anterior, para la zahorra artificial de cantera todas las densidades tomadas en obra deben ser superiores al 98% de la densidad máxima obtenida en el ensayo de Próctor Modificado, en este caso 2.26 gr/cm³ (98% de 2.31 gr/cm³). La humedad debe estar comprendida en el intervalo de 5.48% y 7.98% (-1.5% y 1% de la humedad óptima 6.98%). En la tabla siguiente se detallan los resultados obtenidos para la zahorra artificial de cantera.

Nº de punto	Próctor de referencia		Resultados		
	Densidad máxima (g/cm ³)	Humedad óptima (%)	Densidad (g/cm ³)	Humedad (%)	% Compactación respecto a la densidad máxima
1	2,31	6,98	2,26	5,4	98
2	2,31	6,98	2,26	5,6	98
3	2,31	6,98	2,27	4,8	98
4	2,31	6,98	2,31	5,2	100
5	2,31	6,98	2,25	6,2	98
6	2,31	6,98	2,28	5,2	99
7	2,31	6,98	2,27	5,5	98
8	2,31	6,98	2,24	5,4	97
9	2,31	6,98	2,29	5,8	99
10	2,31	6,98	2,30	5,6	99

Nota: En rojo se destacan los valores que no cumplen el PG-3.

Tabla 18. Resultados del ensayo de compactación en zahorra artificial de cantera.

La tabla 18 muestra los resultados de los 10 puntos ensayados en obra para la zahorra artificial. Sólo uno de ellos no cumple (en color rojo), mostrando un porcentaje de compactación de 2.24 gr/cm³ (97% de la densidad máxima), algo menor que la densidad mínima permitida.

En cuanto a la humedad hay tres resultados que no están dentro de los límites establecidos en el PG-3, dado que el intervalo está entre -1.5/+1 de 6.98 (es decir, entre 5.48 y 7.98). Sin embargo, según el artículo 510.10 del PG-3 los ensayos de humedad *“tendrán carácter indicativo y no constituirán, por sí solos, base de aceptación o rechazo de la capa”*. El criterio de aceptación o rechazo de la capa por su grado de compactación se basa pues, en conseguir que la densidad obtenida en la compactación de la capa sea como mínimo del 98% de la densidad de referencia obtenida en laboratorio, siendo el ensayo de humedad sólo indicativo.

- **Zahorras de áridos reciclados**

Según se ha comentado en el correspondiente apartado, en el caso de zahorras procedentes de áridos reciclados todas las densidades tomadas en obra deben ser superiores al 98% de la densidad máxima obtenida en el ensayo de Próctor Modificado, en este caso 2.01 gr/cm³ (98% de 2.05 gr/cm³). La humedad debe estar comprendida en el intervalo de 8.56% y 11.06% (-1.5% y 1% de la humedad óptima que en este caso es 10.06%).

Nº de punto	Próctor de referencia		Resultados		
	Densidad máxima (g/cm ³)	Humedad óptima (%)	Densidad (g/cm ³)	Humedad (%)	% Compactación respecto a la densidad máxima
1	2,05	10,06	2,09	10,4	102
2	2,05	10,06	2,06	7,5	100
3	2,05	10,06	2,11	8,4	103
4	2,05	10,06	2,08	11,2	101
5	2,05	10,06	2,05	8,3	100
6	2,05	10,06	2,04	8,7	100
7	2,05	10,06	2,02	8,2	99
8	2,05	10,06	2,01	9,1	98
9	2,05	10,06	2,03	10,8	99

Nota: En rojo se destacan los valores que no cumplen el PG-3.

Tabla 19. Resultados del ensayo de compactación en zahorra de áridos reciclados.

Como se observa, en la tabla 19, la zahorra de árido reciclado en todos los puntos ha superado el mínimo del 98% del Próctor Modificado exigido. A pesar de que las densidades de los áridos reciclados, lógicamente, son inferiores a las de los áridos naturales, el comportamiento de la zahorra reciclada ha sido muy bueno. En lo referente al grado de compactación, si se comparan las tablas 18 y 19 se observa como en la mayoría de los casos ha sido del 100% en los reciclados mientras que en los áridos naturales fue del 98%.

Por otro lado, respecto al % de humedad exigido se han marcado en rojo los cuatro puntos que están fuera del intervalo de humedad óptima. Como se comentó en la metodología, el PG-3 indica que la humedad no es criterio para aceptar o rechazar la capa. De cualquier forma, cabe destacar la dificultad que tienen estos materiales para alcanzar la humedad óptima.

La mayor dificultad de la puesta en obra de los suelos y materiales granulares preparados a partir de áridos reciclados es conseguir los porcentajes de compactación solicitados por el PG-3. El principal motivo por el que se produce este problema es por el mayor grado de absorción de agua de estos materiales.

La mejor forma de resolver esta dificultad es que las zahorras se preparen, se extiendan y se compacten tal y como solicita el PG-3 en su artículo 510.5.3, lo que implica que la humectación se realice antes de su extensión y que una vez colocada en obra, las tareas de humectación se reduzcan a la hidratación superficial para conseguir un mejor acabado.

Por ello, previo a su transporte a obra, el material reciclado se humectó durante dos días mediante aspersión en el lugar de acopio del material en la planta.

Este fue el *modus operandi* que se llevó a cabo durante la ejecución del tramo experimental. El material reciclado se humectaba en la planta de tratamiento y

posteriormente a su llegada a la obra, en el punto de descarga de los camiones, se determinaba la humedad de lo recepcionado con el densímetro nuclear antes de proceder a su extendido. Si le faltaba agua se humectaba en estos “acopios de obra”. Por último se extendía, se procedía a un riego final para el sellado de la superficie y se compactaba.

Trabajando según este procedimiento se consiguió la compactación solicitada por el PG-3, el 98% del Próctor Modificado.

5.3.2. ENSAYO DE CARGA CON PLACA

Para comprobar la capacidad portante de la capa se realizó el ensayo de placa de carga, obteniéndose los resultados que se muestran en la tabla 20.

	Zahorra artificial de cantera		Zahorra de áridos reciclados	
	1 ^{er} CICLO DE CARGA	2 ^o CICLO DE CARGA	1 ^{er} CICLO DE CARGA	2 ^o CICLO DE CARGA
Ev [MN/mm ²]	236,8	338,4	375	454,2
E _{v2} /E _{v1}	1,43		1,21	

E_v=Módulo de compresibilidad del ciclo de carga

Tabla 20. Resultados del ensayo de placa de carga de ambas zahorras.

Analizando la tabla 20, se observa que ambos materiales cumplen las especificaciones para los resultados del ensayo de carga con placa. El valor del módulo de compresibilidad en el segundo ciclo de carga E_{v2}, es superior a 60 en ambos casos. También el valor de la relación de módulos E_{v2}/ E_{v1} es inferior a 2,2 en ambos casos.

Las placas de carga realizadas para estos materiales ponen de manifiesto que para zahorras similares en cuanto a resultados de granulometría, plasticidad y equivalente de arena, se obtienen mayores módulos cuando los áridos procedentes de reciclados.

Si comparamos el valor del módulo del 2º ciclo de carga de la zahorra reciclada se observa que se encuentra en el entorno de los 450 Mpa, mientras que el de la zahorra de cantera se encuentra en el entorno de 340 Mpa. Se deduce que es mayor la capacidad portante de la capa construida con materiales reciclados.

Como ya defienden algunos autores (Arm, 2001; Poon et al., 2006; Kou and Poon, 2009; Sangiorgi, 2014), este aumento en la capacidad portante en el árido reciclado puede deberse posiblemente a la auto cementación que puede producirse en los materiales RCD debido al cemento remanente que contienen. Al regar la capa para compactar el material en obra, parte de las partículas de cemento adheridas al árido reciclado fraguan y aportan una mayor capacidad portante que la de un árido natural, lo hace de forma similar a como endurece un hormigón o un suelocemento.

5.3.3. DEFLEXIONES. AUSCULTACIÓN DE ALTO RENDIMIENTO (ADAR)

Como se ha indicado en la metodología, para controlar la capacidad estructural se realizó el control ADAR en la capa de zahorra de ambos ramales, una vez que se obtuvieron resultados satisfactorios en los ensayos de compactación y de placa de carga. En segundo lugar, se realizó de nuevo el control ADAR cuando se finalizó el ramal con el extendido de las dos capas de mezcla bituminosa (la capa intermedia y la de rodadura). La figura 24 muestra el croquis de la planta de los tramos de investigación.

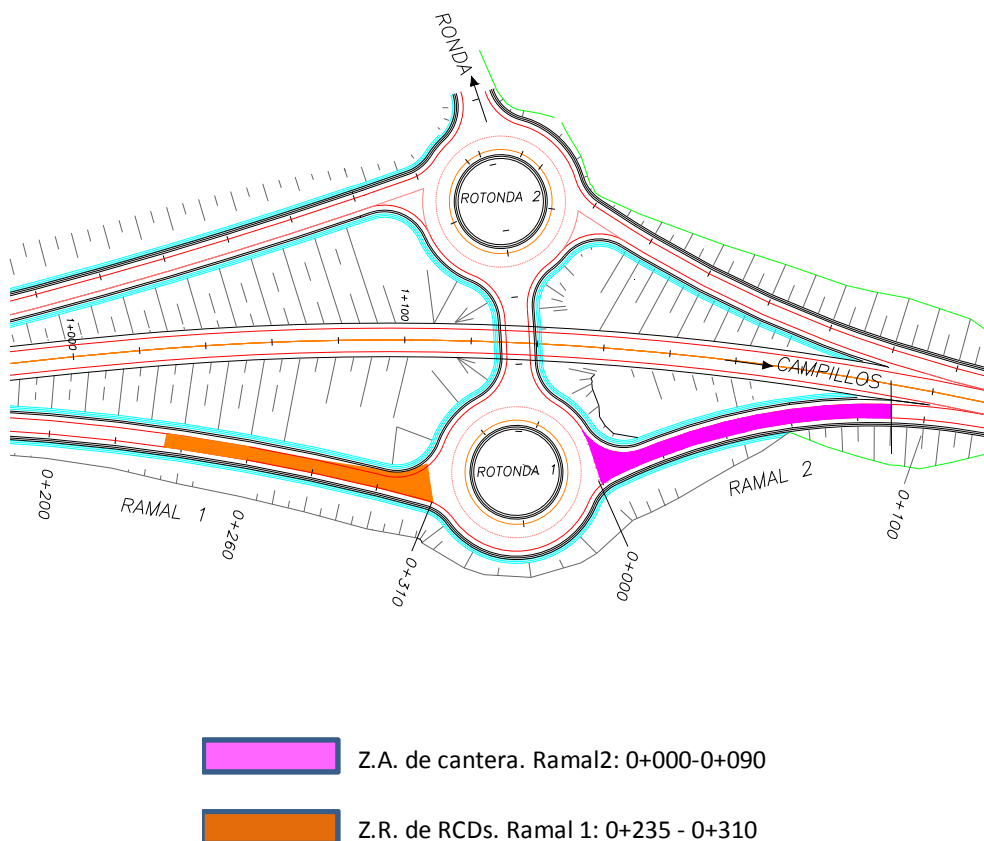


Figura 24. Croquis control ADAR

La zona de color naranja representa al tramo experimental, de 75 m de longitud, correspondiente a la zahorra de áridos reciclados. La zona de color rosa corresponde al tramo, de 90 m de longitud, de la zahorra artificial de cantera.

Dado que los ramales eran de una sola calzada de 7 m de sección y de poca longitud, se decidió dividir la calzada en dos carriles: izquierdo y derecho. Así se podían obtener datos al tresbolillo. Del otro modo, solo se obtendrían datos en la zona central del ramal.

Mediante el programa de cálculo multicapa con los parámetros de la O.C. 1/99 “Orden circular 1/99 de Instrucción para el Diseño de Firmes de la Red de Carreteras de

Andalucía”¹⁵ (COPT, 1999) se calculan las deflexiones teóricas en cada capa para la estructura del firme previsto. En las figuras 25 y 26 se detalla la deflexión teórica (calculada según se indicó en el apartado 4.8.2.1.) para cada ramal del tramo de investigación.

CAPA		ESPESOR DE LA CAPA (cm)	DEFLEXIÓN TEÓRICA (mm/100)
FIRME	M.B.C. S-20	7	73
	M.B.C. S-20	7	87
	Z.R. RCD	30	136
CIMIENTO DE FIRME	ZAHORRA ARTIFICIAL	50	
	SUELO ADECUADO	50	
	SUELO ADECUADO	100	
TNS	TNS		

Nota: TNS, Terreno Natural Subyacente

Figura 25. Deflexiones teóricas para la capa del firme del Ramal 1

CAPA		ESPESOR DE LA CAPA (cm)	DEFLEXIÓN TEÓRICA (mm/100)
FIRME	M.B.C. S-20	7	52
	M.B.C. S-20	7	65
	Z.A.	30	103
CIMIENTO DE FIRME	ZAHORRA ARTIFICIAL	50	
	SUELO ADECUADO	50	
	SUELO ADECUADO	100	
TNS	TNS		

Nota: TNS, Terreno Natural Subyacente

Figura 26. Deflexiones teóricas para la capa del firme del Ramal 2

¹⁵ Adaptación de la normativa estatal de diseño de firmes (Instrucción 6.1 y 2-IC secciones de firmes de 1990) a la especificidad de terrenos de Andalucía. La parte más destacada de la instrucción es la inclusión, por primera vez en España, de criterios para el dimensionamiento analítico de firmes, sustituyendo a los tradicionales catálogos de dimensionamiento, pretendiendo con ello que los proyectistas diseñen sus propios firmes de acuerdo con las características específicas de cada obra y de los materiales de la zona.

Como se observa en las figuras 25 y 26 las deflexiones teóricas obtenidas en el tramo de materiales naturales son menores que las del tramo de materiales reciclados en todas las capas del firme (Por ejemplo, en la capa de rodadura de M.B.C. S-20 se han obtenido una deflexión teórica de 52 mm/100 en materiales naturales frente a 73 mm/100 en los reciclados). Esto se debe a que, a pesar de que el módulo de elasticidad teórico es el mismo para ambas zahorras, el terreno natural subyacente es de mayor capacidad portante y, por tanto, de mayor calidad para el caso de la zahorra artificial de cantera.

Para que la capa fuera aceptada, las deflexiones que se obtuvieran con el deflectómetro de impacto deberían ser menores para cada capa que las deflexiones teóricas de referencia.

A las deflexiones obtenidas por el deflectómetro de impacto se les aplicaron los coeficientes correctores de la deflexión por la humedad de la explanada y temperatura del pavimento, según las correcciones establecidas en los apartados 2.5 y 2.6 del Anejo 3 de la Norma 6.3.-IC del Ministerio de Fomento (Ministerio de Fomento, 2003b).

A continuación se exponen los resultados del control ADAR obtenidos en cada una de las capas del firme de los ramales.

RAMAL 1. TRAMO CON ZAHORRA RECICLADA PROCEDENTE DE RCD

En el ramal 1, de 75 m de longitud, se auscultaron las tres últimas capas de firme. El primer control se hizo sobre la capa de zahorra reciclada terminada, el segundo sobre la primera capa de aglomerado y el último sobre la capa de rodadura de aglomerado.

- **Auscultación sobre la capa de zahorra reciclada terminada**

Las deflexiones obtenidas en la capa de zahorra de áridos reciclados, una vez terminada, son las que se muestran en la siguiente tabla.

Distancia desde pk de obra (km)	Deflexión real (mm/100)	Deflexión Teórica= 136mm/100
0,235	97	136
0,260	102	136
0,285	158	136
0,310	136	136

Nota: En rojo se destacan los valores que no cumplen.

Tabla 21. Deflexiones sobre zahorra procedente de RCD en ramal 1

Como se aprecia en la tabla 21 en este ramal solo existe un punto con deflexión superior a la deflexión teórica, ubicado en el P.K. 0+285. Se decide dar por buena la capa con la condición de que las siguientes capas que se extiendan, las capas de

aglomerado, den resultados satisfactorios. Para ello se pone la condición de que las deflexiones que se obtengan en la auscultación sean menores que las teóricas.

En la figura 27 se refleja gráficamente los datos de la tabla 21, representándose la deflexión teórica en negro y en naranja los datos reales obtenidos.

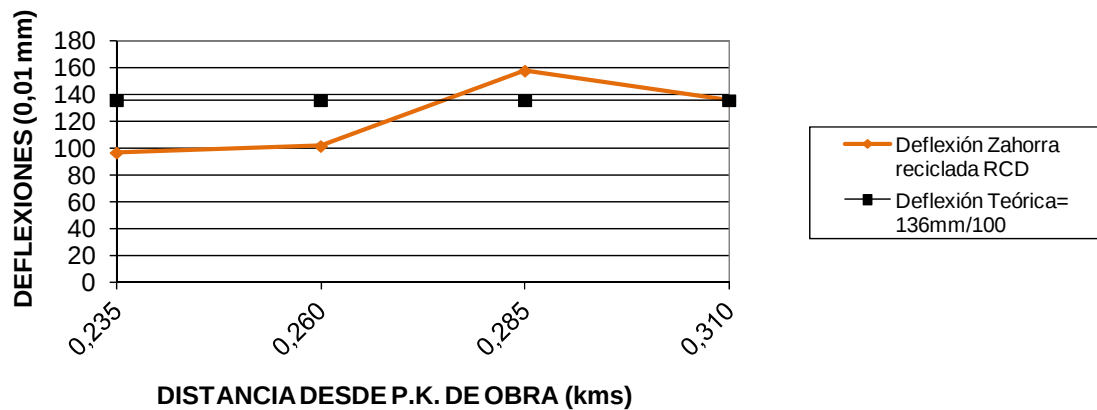


Figura 27. Deflexiones sobre zahorra procedente de RCD en ramal 1

En la gráfica representada en la figura 27 se muestra como solo un punto supera a la deflexión teórica calculada para ese tramo.

- **Auscultación sobre la capa intermedia de aglomerado**

Tras el extendido de la capa de zahorra reciclada, se ejecutó la capa intermedia de aglomerado. Los resultados obtenidos con el deflectómetro se observan en la tabla 22.

Distancia desde pk de obra (km)	Deflexión real (mm/100)	Deflexión Teórica= 87mm/100
0,250	29	87
0,275	60	87
0,300	55	87
0,310	29	87

Tabla 22. Deflexiones sobre capa intermedia de aglomerado en Ramal 1

Los resultados mejoraron los obtenidos en la capa de zahorra reciclada, no obteniéndose ningún punto por encima de la deflexión teórica. Se observa cómo la diferencia entre la deflexión teórica y la real es mucho mayor que la existente en la anterior capa. Así, en la capa de zahorra y en el P.K. 0+260 se obtenía una deflexión real de 102 mm/100 respecto a la teórica de 136 mm/100. En el P.K. 0+250 y en la capa de aglomerado se obtuvieron 29 mm/100 respecto a la teórica de 87 mm/100.

En la figura 28 se reflejan gráficamente los datos obtenidos en la tabla 22, identificándose con una línea naranja las deflexiones reales y la deflexión teórica con una línea negra.

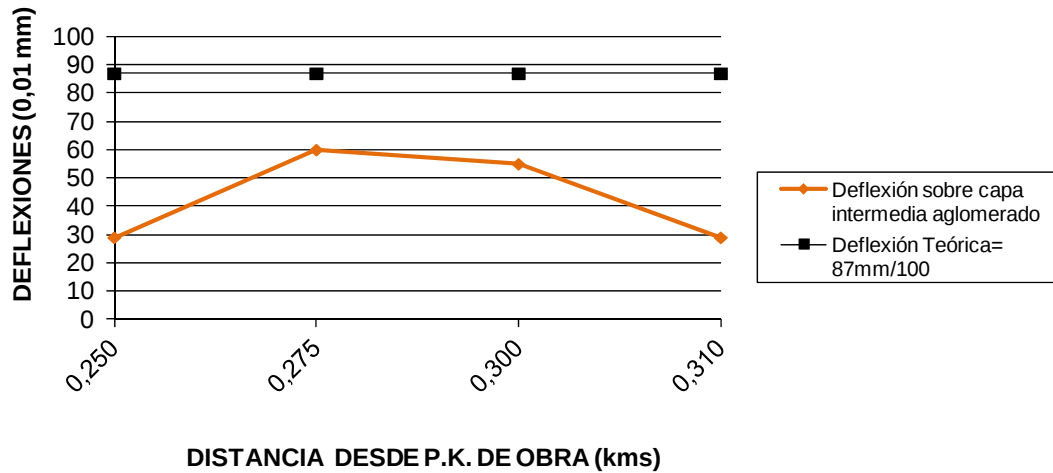


Figura 28. Deflexiones sobre capa intermedia de aglomerado en Ramal 1

En la gráfica de la figura 28 se observa la bondad de los resultados al quedar todos los puntos por debajo de la deflexión teórica.

- **Auscultación sobre la capa de rodadura de aglomerado**

Tras el extendido de la capa intermedia de aglomerado se ejecutó la capa de rodadura. Los resultados obtenidos con el deflectómetro se observan en la siguiente tabla.

Distancia desde pk de obra (km)	Deflexión real (mm/100)	Deflexión Teórica=73mm/100
0,235	7	73
0,270	10	73
0,295	20	73
0,310	21	73

Tabla 23. Deflexiones sobre capa de rodadura en Ramal 1

En la tabla 23 se observan los resultados obtenidos en la capa de rodadura de aglomerado, no obteniéndose ningún punto por encima de la deflexión teórica. En la figura 29 se representa gráficamente los valores obtenidos en la auscultación, identificándose con una línea naranja las deflexiones reales y la deflexión teórica con una línea negra.

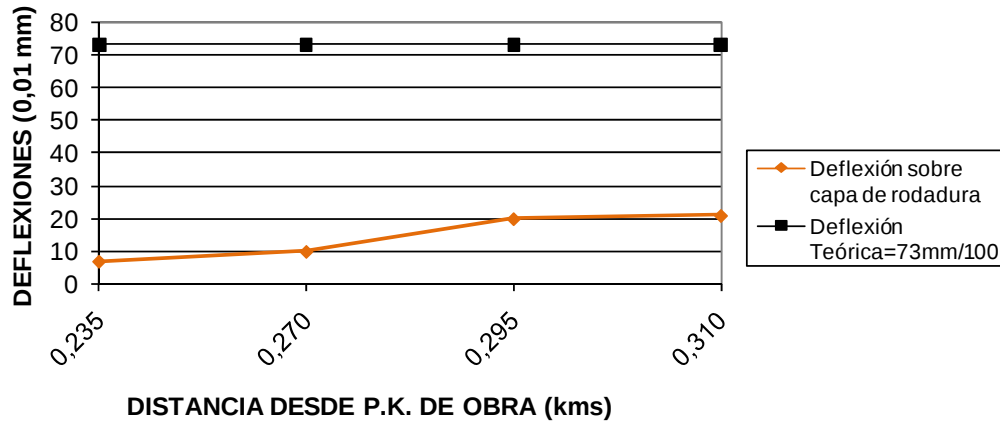


Figura 29. Deflexiones sobre capa de rodadura en Ramal 1

La figura 29 muestra la diferencia que hay entre la deflexión teórica y las deflexiones reales. Las deflexiones reales han quedado por debajo de la teórica en todos los puntos.

Como se observa en el resultado de las deflexiones en el tramo con zahorra reciclada procedente de RCD, conforme se han ido extendiendo capas las deflexiones han ido mejorando hasta alcanzar valores muy por debajo de la deflexión teórica en la capa de rodadura. Esto podemos observarlo con más facilidad si nos fijamos en los P.K. que se han puesto como ejemplos en el apartado anterior; el PK. 250 y 260. Si los comparamos con el punto auscultado en rodadura, próximos a ellos el P.K. 270 vemos cómo han aumentado las diferencias entre deflexión real y deflexión teórica:

- Capa de zahorra: P.K. 260, deflexión teórica (mm/100) =136, deflexión teórica (mm/100) real: 102, diferencia: 34 mm/100.
- Capa de intermedia de aglomerado: P.K. 250, deflexión teórica (mm/100) =87, deflexión teórica (mm/100) real: 29, diferencia: 58 mm/100.
- Capa de rodadura de aglomerado: P.K. 270, deflexión teórica (mm/100) =73, deflexión teórica (mm/100) real: 10, diferencia: 63 mm/100.

En todas las capas se ha observado una mejora importante de las deflexiones y la diferencia entre la deflexión real y teórica va mejorando en las capas superiores (Se ha pasado de una diferencia de 34 mm/100 en la zahorras a una diferencia de 63 mm/100 en la capa de rodadura).

RAMAL 2. TRAMO CON ZAHORRA ARTIFICIAL DE CANTERA

En el ramal 2, de 90 m de longitud, se auscultaron, al igual que en el de zahorra reciclada, las tres últimas capas de firme. El primer control se hizo sobre la capa de zahorra artificial de cantera terminada, el segundo sobre la primera capa de aglomerado y por último, sobre la capa de rodadura de aglomerado.

- **Auscultación sobre la capa de zahorra de cantera terminada**

En la tabla 24 se muestran los resultados de las deflexiones reales obtenidas en la obra, señalando en color rojo las deflexiones que superan a la deflexión teórica.

Distancia desde pk de obra (km)	Deflexión real (mm/100)	Deflexión Teórica= 103mm/100
0,000	168	103
0,025	159	103
0,050	149	103
0,075	99	103
0,090	159	103

Nota: En rojo se destacan los valores que no cumplen.

Tabla 24. Deflexiones sobre zahorra de cantera en ramal 2

Como se aprecia en la tabla 24, en este ramal solo existe un punto con deflexión inferior a la deflexión teórica. Los resultados son desfavorables. De los cinco puntos auscultados, cuatro de ellos superan en más de 46 mm/100 la deflexión teórica. A pesar de ello, se decidió aplazar la decisión sobre la aceptación de la capa esperando a los resultados del control ADAR de la capa siguiente, la primera capa de aglomerado. Si la auscultación de la primera capa de aglomerado diera deflexiones por debajo de la teórica, se aceptaría la capa de zahorra; en caso contrario se rechazarían ambas capas, la de aglomerado y la de zahorra. Antes de extender la capa de aglomerado se recompactó la capa de zahorra con objeto de mejorar los resultados de las deflexiones.

En la figura 30 se representa gráficamente los resultados obtenidos por el deflectómetro para los cinco puntos auscultados, identificándose en color rosa los resultados de las deflexiones reales y en negro la deflexión teórica.

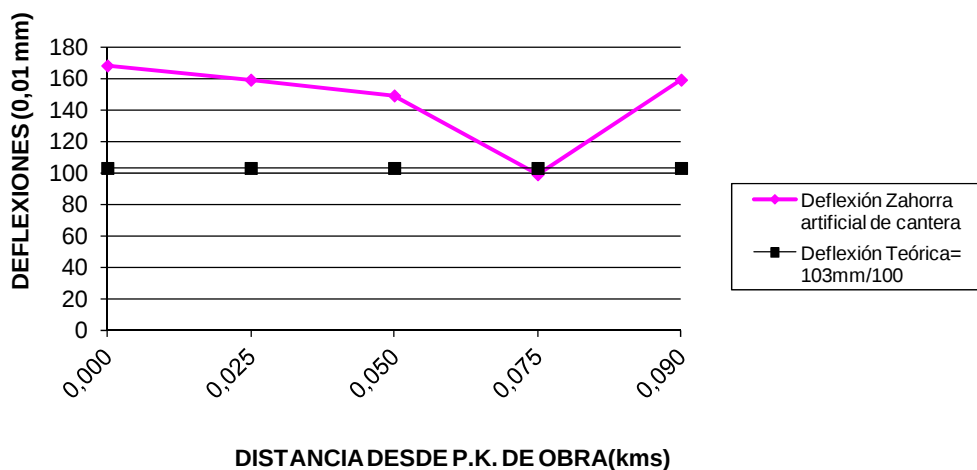


Figura 30. Deflexiones sobre zahorra de cantera en ramal 2

Se observa, en la figura 30 como cuatro de los cinco puntos auscultados no cumplen porque están por encima de la línea de la deflexión teórica.

- **Auscultación sobre la capa intermedia de aglomerado**

Tras el extendido de la capa de zahorra artificial de cantera se ejecutó la capa intermedia de aglomerado. Los resultados que se obtuvieron con el deflectómetro se observan en la tabla 25.

Distancia desde pk de obra (km)	Deflexión real (mm/100)	Deflexión Teórica=65mm/100
0,000	37	65
0,025	45	65
0,050	36	65
0,075	42	65
0,090	64	65

Tabla 25. Deflexiones sobre capa intermedia de aglomerado en Ramal 2

Los resultados mejoraron considerablemente los obtenidos en la capa de zahorra, no obteniéndose ningún punto por encima de la deflexión teórica. Incluso el P.K. 0+075, que en la capa de zahorra daba un resultado idéntico a la deflexión teórica, mejora mucho su resultado, dando 23 mm/100 por debajo de la misma.

La figura 31 representa gráficamente los resultados obtenidos por el deflectómetro para los puntos auscultados, en color rosa los resultados de las deflexiones reales y en negro la deflexión teórica.

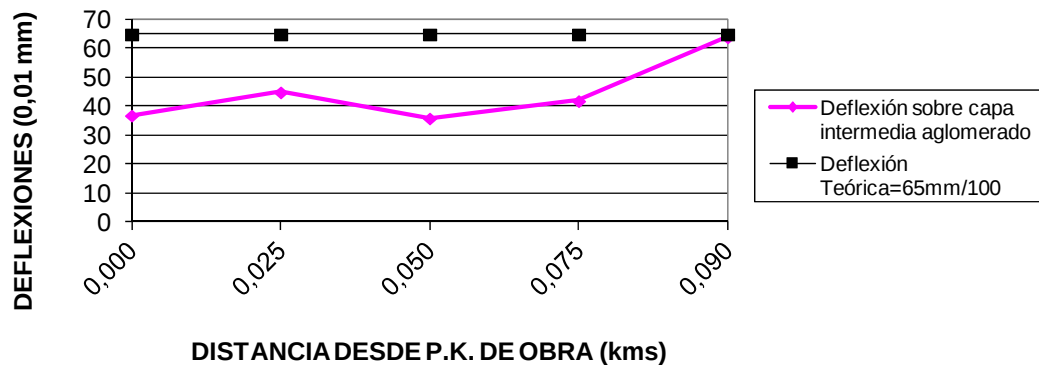


Figura 31. Deflexiones sobre capa intermedia de aglomerado en Ramal 2

Se observa en la gráfica de la figura 31 la bondad de los resultados al no haber ninguno que supere la deflexión teórica. Se aceptó esta capa y la anterior de zahorra que no había dado buenos resultados, y que su aceptación había sido condicionada a los resultados de esta capa.

- **Auscultación sobre la capa de rodadura de aglomerado**

Tras el extendido de la capa intermedia de aglomerado se ejecutó la capa de rodadura. Los resultados que se obtuvieron con el deflectómetro se observan en la tabla 26.

Distancia desde pk de obra (km)	Deflexión real (mm/100)	Deflexión Teórica=52mm/100
0,030	18	52
0,055	20	52
0,080	28	52

Tabla 26.Deflexiones sobre capa de rodadura en Ramal 2

Los resultados mejoraron respecto a los obtenidos en la capa de zahorra y en la capa intermedia de aglomerado, no obteniéndose ningún punto por encima de la deflexión teórica de 52 mm/100.

La figura 32 refleja gráficamente los resultados obtenidos en la auscultación, en color rosa los resultados de las deflexiones reales y en negro la deflexión teórica.

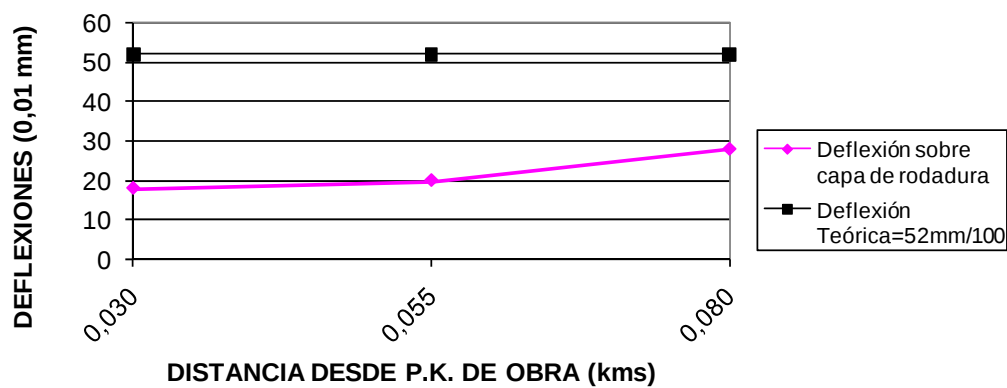


Figura 32. Deflexiones sobre capa de rodadura en Ramal 2

Para esta capa se han aumentado las diferencias con respecto a la deflexión teórica. Si nos fijamos en el P.K. 0+075 se ha pasado de una diferencia de 4 mm/100 en el control de la capa de la zahorra, a 23 mm/100 en la primera capa de aglomerado y a 24 mm/100 mm en la capa de rodadura.

Como se deduce de los resultados de las deflexiones obtenidas en el tramo con zahorra artificial de cantera y conforme se han ido extendiendo las capas, las deflexiones han ido mejorando hasta alcanzar valores muy por debajo de la deflexión teórica en la capa de rodadura.

Por tanto, y en base a los resultados obtenidos, ambos ramales finalizaron con un valor de deflexiones satisfactorio.

Como resumen, para cada ramal de la investigación se ha calculado la deflexión media obtenida en cada capa y se ha comparado con la deflexión media de la misma capa. A mayor diferencia, mejor resultado y mejor capacidad portante tendrá la capa.

Las deflexiones reales, teóricas y la diferencia entre ambas en el ramal 1 se presentan en la tabla 27:

Capa sobre la que se hace el control	Deflexión media real (mm/100)	Deflexión teórica (mm/100)	Diferencia (mm/100)
Zahorra reciclada RCD	123	136	13
Aglomerado: capa intermedia	43	87	44
Aglomerado: capa rodadura	15	73	58

Tabla 27. Valores de deflexiones teóricas y medias en Ramal 1

En la tabla 27 se comprueba cómo mejora el valor de la deflexión media real conforme se han ido extendiendo capas (de 123 mm/100 en la capa de zahorra reciclada a 15 mm/100 en la capa de rodadura). Esta mejora se hace más evidente observando el aumento de la diferencia entre la deflexión teórica y la deflexión media real en cada capa que se ha ensayado (desde 13 mm/100 para la capa de zahorra reciclada a 58 mm/100 para la capa de rodadura).

En la tabla 28 se muestran las deflexiones reales, teóricas y la diferencia entre ambas en el ramal 2:

Capa sobre la que se hace el control	Deflexión media real (mm/100)	Deflexión teórica (mm/100)	Diferencia (mm/100)
Zahorra artificial de cantera	147	103	-44
Aglomerado: capa intermedia	45	65	20
Aglomerado: capa rodadura	22	52	30

Tabla 28. Valores de deflexiones teóricas y medias en Ramal 2

Se aprecia la variación de la deflexión media real conforme se han ido extendiendo capas. La primera capa daba resultados negativos, sobrepasando la deflexión real a la teórica en 44 mm/100. No obstante, se decidió extender la capa intermedia de aglomerado para ver si mejoraba la deflexión, y así fue. La deflexión media real estuvo por debajo de la deflexión teórica.

Como en el ramal 1, se hace más evidente la mejora observando el aumento de la diferencia entre la deflexión teórica y la deflexión media real en cada capa que se ha ensayado (desde una diferencia negativa de 44 mm/100 para la capa de zahorra de cantera a una diferencia positiva de 30 mm/100 para la capa de rodadura).

5.4. RESULTADOS DEL PLAN DE ENSAYOS DE EVOLUCIÓN

5.4.1. INSPECCIÓN VISUAL.

El control de la evolución de los tramos experimentales, tras la puesta en servicio de los mismos, se ha llevado a cabo mediante un plan de auscultación dinámica con equipos de alto rendimiento (ADAR) con cadencia semestral, durante 4 años, acompañada de una inspección visual para detectar posibles defectos como grietas, fisuras, etc.

En cada una de las inspecciones visuales se ha realizado un reportaje fotográfico. El objetivo de las inspecciones era observar visualmente el comportamiento de los dos ramales estudiados.

- RAMAL 1:

Para el caso del Ramal 1, tramo en el que se ubica la zahorra reciclada de RCD, el control de evolución mediante inspección visual se ha recogido en las imágenes que se muestran en la figura 33:



(a) Abril 2009. Puesta en servicio



(b) Noviembre 2011



(c) Octubre 2012



(d) Abril 2013

Figura 33. Evolución visual del Ramal 1

Se recogen fotografías desde el año de la puesta en servicio (2009) en el que empieza a circular tráfico por el tramo, hasta el año 2013, año en que finalizaron los ensayos de los tramos de investigación. Visualmente, en el Ramal 1 no se ha apreciado evolución negativa significativa respecto a la situación de puesta en servicio de la obra. Esto avala los buenos resultados obtenidos en la evolución de las deflexiones que se verá en el siguiente apartado.

- **RAMAL 2:**

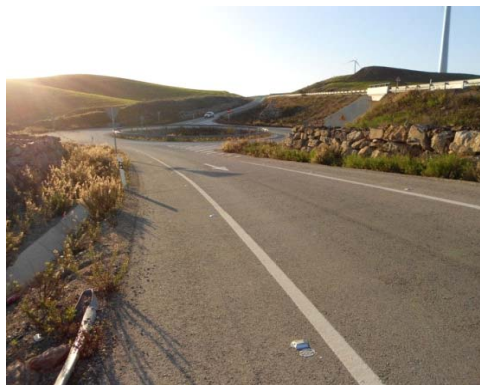
Para el Ramal 2, tramo en que se incluye la zahorra artificial de cantera, el control de evolución mediante inspección visual se ha recogido en las siguientes imágenes de la figura 34:



(a) Abril 2009. Puesta en servicio



(b) Noviembre 2011



(c) Octubre 2012



(d) Abril 2013

Figura 34. Evolución visual del Ramal 2

Se recogen fotografías desde el año de la puesta en servicio (2009) en el que empieza a circular tráfico por el tramo, hasta 2013, año en que se finalizan los ensayos de estos tramos de investigación. Visualmente tampoco se ha apreciado evolución negativa significativa respecto a la situación de puesta en servicio de la obra. Igualmente, esto avala los buenos resultados obtenidos en la evolución de las deflexiones que se verá en el siguiente apartado.

Se ha observado que toda la zona de investigación presenta un excelente aspecto en relación a la capacidad portante sin zonas cedidas ni agrietadas en las rodadas de los vehículos. Esto coincide con los buenos resultados de las deflexiones.

5.4.2. EVOLUCIÓN DE LAS DEFLEXIONES

Como se ha indicado en la metodología, una vez finalizados los trabajos, en marzo del 2009, se realizó un seguimiento posterior de los tramos ejecutados durante un periodo de 4 años, donde se llevó a cabo un control de las deflexiones cada 5 metros y al tresbolillo.

Al objeto de analizar la evolución de la capacidad portante de cada uno de los tramos, se presentan a continuación los cuadros comparativos de los resultados obtenidos, su representación gráfica y una interpretación de los mismos.

RAMAL 1. TRAMO CON ZAHORRA RECICLADA PROCEDENTE DE RCDS

En la tabla 29 se reflejan los valores de las deflexiones para cada punto kilométrico de la obra, obtenidos en los distintos controles que se han realizado en el tiempo para el Ramal 1, así como el valor de la deflexión media obtenida en cada control.

Distancia desde P.K. de obra	Deflexión Teórica	Marzo-2009 Control final obra	Oct-2009 1er control de evolución	Marzo-2010 2º control de evolución	Sept-2010 3er control de evolución	Marzo-2011 4º control de evolución	Sept-2011 5º control de evolución	Oct-2012 6º control de evolución	Marzo-2013 7º control de evolución
0,235	73	7	12	11	15	11	19	17	16
0,240	73		12	11	11	9	16	18	13
0,245	73		10	9	12	13	14	19	15
0,250	73		12	10	12	14	14	15	16
0,255	73		12	9	10	10	12	18	13
0,260	73		14	7	9	9	12	14	9
0,265	73		10	6	8	9	12	13	12
0,270	73	10	9	9	8	9	12	14	13
0,275	73		11	9	9	9	15	19	9
0,280	73		13	8	10	8	9	20	12
0,285	73		13	10	10	9	13	17	15
0,290	73		13	13	11	10	16	12	14
0,295	73	20	15	13	12	9			
0,300	73		17	23	26	10			
0,305	73		35	32	17	11			
0,310	73	21	23	17	18	13			
DEFLEXIÓN MEDIA		15	14	12	12	10	14	16	13

Tabla 29. Evolución de deflexiones sobre capa de rodadura en Ramal 1

La variación de los valores ha sido poco significativa con el paso del tiempo. Se observa que la deflexión media en marzo de 2009 era de 15 mm/100, en septiembre de 2011 era de 14 mm/100 y en marzo de 2013 se obtenía un valor de 13 mm/100.

En la figura 35 se ha representado gráficamente la evolución de la deflexión media para cada uno de los controles realizados para el ramal 1.

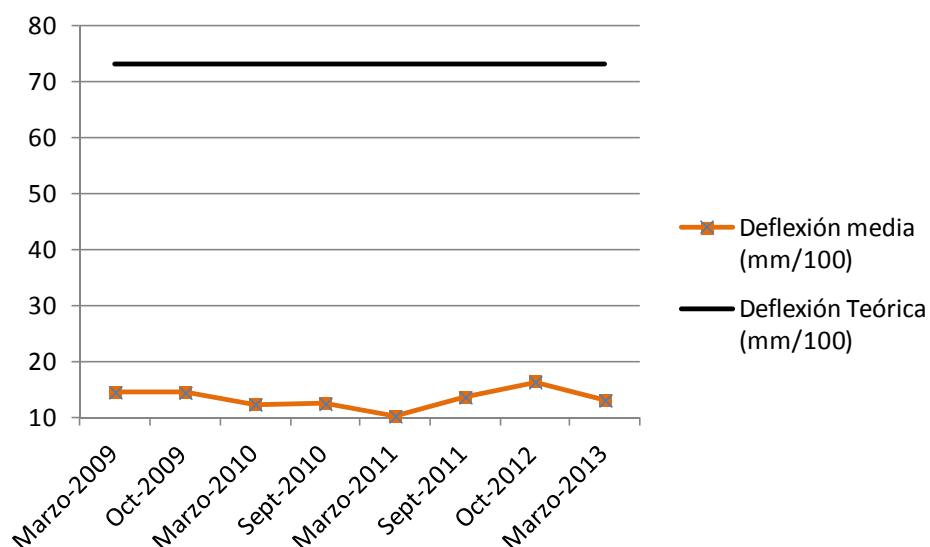


Figura 35. Evolución de deflexiones medias en Ramal 1

Los valores obtenidos de la deflexión media son muy similares y muy satisfactorios ya que están muy por debajo de la deflexión teórica. Se aprecia una ligera mejoría en el valor medio de la deflexión del último control respecto al de la deflexión media del control final de ejecución de obra del año 2009.

RAMAL 2. TRAMO CON ZAHORRA ARTIFICIAL DE CANTERA

En la tabla 30 se reflejan los valores de las deflexiones para cada punto kilométrico de la obra en los distintos controles que se han realizado en el tiempo para el Ramal 2, así como el valor de la deflexión media obtenida en cada control.

Distancia desde P.K. de obra	Deflexión Teórica	Marzo-2009 Control final obra	Oct-2009 1er control de evolución	Marzo-2010 2º control de evolución	Sept-2010 3er control de evolución	Marzo-2011 4º control de evolución	Sept-2011 5º control de evolución	Oct-2012 6º control de evolución	Marzo-2013 7º control de evolución
0,000	52		25	20	22	21	23	11	21
0,005	52		26	21	21	19	22	18	19
0,010	52		28	22	17	19	18	16	18
0,015	52		25	18	17	17	20	16	15
0,020	52		24	19	20	20	20	18	21
0,025	52		27	20	20	19	23	19	20
0,030	52	18	25	21	22	21	26	20	23
0,035	52		28	22	23	22	27	22	23
0,040	52		27	21	19	20	19	18	19
0,045	52		22	23	22	21	20	17	24
0,050	52		28	24	25	28	24	22	31
0,055	52	20	33	30	25	25	26	26	28
0,060	52		33	27	22	21	23	20	21
0,065	52		33	26	22	17	23	18	20
0,070	52		29	25	20	15	22	17	18
0,075	52		33	32	16	12	19	16	14
0,080	52	28	28	23	15	11	17	15	15
0,085	52		24	22	13	10	16	10	12
0,090	52		20	17	11	8	12	9	9
DEFLEXIÓN MEDIA		22	28	23	20	19	22	18	20

Tabla 30. Evolución de deflexiones sobre capa de rodadura en Ramal 2

Al igual que en el tramo de zahorra reciclada los valores de las deflexiones para cada punto kilométrico de la obra han sido muy inferiores a la deflexión teórica y la variación de los valores ha sido poco significativa con el paso del tiempo. Se observa que la deflexión media en marzo de 2009 y en septiembre de 2011 era 22 mm/100, y en marzo de 2013 se obtenía 20 mm/100.

En la figura 36 se ha representado gráficamente la evolución de la deflexión media para cada uno de los controles realizados para el ramal 2.

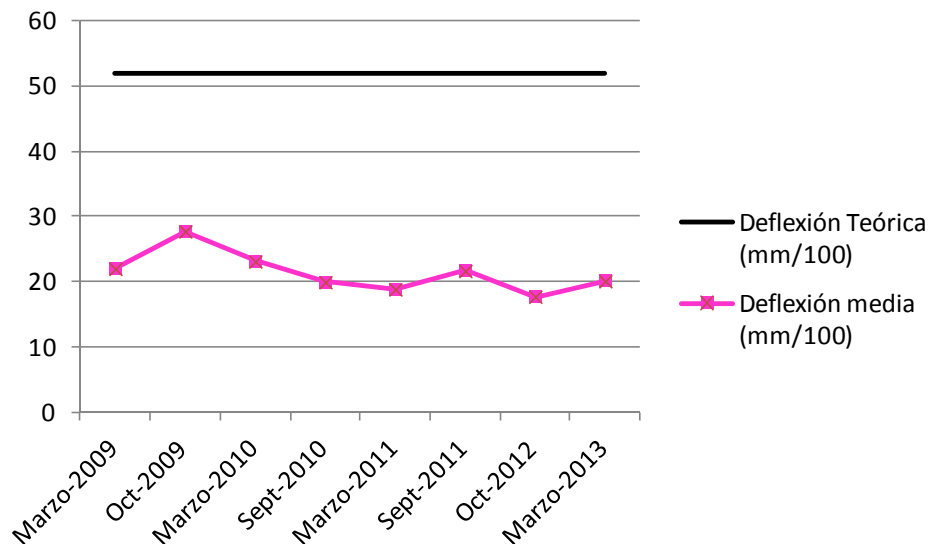


Figura 36. Evolución de deflexiones medias en Ramal 2

Se aprecia, al igual de lo que ocurría en el Ramal 1, una uniformidad en los resultados de las deflexiones medias. Se observa una ligera mejoría en el valor del último control de la deflexión respecto al de la deflexión media del control final de obra.

Si atendemos a las diferencias entre la deflexión teórica y media de cada ramal, vemos que las mayores las presenta el ramal 1, dando diferencias del orden de 60 mm/100 frente al ramal 2 que da diferencias del orden de 30 mm/100. Aunque ambos resultados son buenos al estar por debajo de la deflexión teórica, la mayor lejanía de las deflexiones del ramal 1 (de zahorras recicladas) muestra su mejor comportamiento respecto al ramal 2 realizado con zahorras de materiales naturales.

En marzo de 2013, cuando se hizo el último control ADAR, se realizó un aforo de tráfico para evaluar si el tramo experimental sufría más o menos tráfico que en la fecha en que se ejecutó el mismo. El aforo determinó que el tráfico había crecido desde una categoría de tráfico pesado T4 hasta una categoría de tráfico pesado T2. A pesar de que había aumentado el tráfico considerablemente, mucho más elevado que para el que se había diseñado el tramo de investigación, los resultados de las deflexiones fueron satisfactorios.

A continuación procederemos a analizar los resultados del cálculo inverso de deflexiones.

5.4.3. EVOLUCIÓN MEDIANTE EL CÁLCULO INVERSO

El cálculo inverso se realizó para los últimos 4 controles ADAR (marzo 2011, septiembre 2011, octubre 2012 y marzo de 2013).

Los módulos teóricos de elasticidad se determinan en base al software ICAFIR a partir de la sección de firme y son los que figuran en la tabla 31.

		RAMAL-1: Zahorra de RCD		RAMAL-2: Zahorra artificial	
		espesor	Módulo teórico (Mpa)	espesor	Módulo teórico (Mpa)
MBC	E1	14 cm	6000	14 cm	6000
BASE	E2	30 cm	300	30 cm	300
EXPLANADA	E3		100		100

Tabla 31. Módulos teóricos de elasticidad

Se asignará el módulo E_3 al valor del módulo equivalente de la explanada (también llamada cimiento del firme). De acuerdo con el tipo de tráfico que tienen los tramos de investigación (T4), según la tabla 4.5. del ICAFIR la categoría de cimiento de proyecto es media y el valor teórico que asigna ICAFIR es 100 MPa. E_2 será el módulo de la base del firme, en nuestro caso Zahorra (ya sea reciclada o no). El valor que determina ICAFIR, en su capítulo 4.7.2 es 300 Mpa y se obtiene del siguiente modo:

$$E_i = C_i \times E_{i-1} \cdot C_i$$

E_i : Módulo de la tongada "i"

C_i : Coeficiente que se toma de la tabla 4.8 de ICAFIR

E_{i-1} : Módulo de la subyacente "i-1"

$$E_2 = 3 \times 100 \text{ MPa} = 300 \text{ MPa}$$

E_1 será el modulo teórico de la mezcla bituminosa que, según la tabla 5.11 de ICAFIR y para un tipo de mezcla semidensa, como es el caso de la de este estudio, toma un valor de 6.000 MPa.

Se ha procedido a calcular los módulos inversos de los distintos ramales para poder comparar unos materiales con otros y su comportamiento respecto a los valores teóricos.

Los valores medios obtenidos para las tres capas estudiadas han sido los siguientes:

				Módulo medio obtenido por retrocálculo (Mpa)			
		espesor	Módulo teórico (Mpa)	mar-11	sep-11	oct-12	mar-13
MBC	E1	14 cm	6.000	10.841	10.233	8.492	10.080
BASE	E2	30 cm	300	3.233	2.524	2.136	2.153
EXPLANADA	E3		100	380	278	314	313

Tabla 32. Módulos obtenidos según el cálculo inverso en el ramal 1

En la tabla 32, se aprecia para el ramal 1 cómo el módulo teórico de la Mezcla bituminosa, de la base del firme y de la explanada, es superado ampliamente por los módulos de elasticidad medios obtenidos en los cuatro controles ADAR realizados. Los valores medios de los módulos obtenidos por cálculo inverso en la zahorra reciclada han sido superiores en 2.000 MPa en los cuatro controles. Debían superar 300 Mpa, por lo que la diferencia es muy amplia, indicando que el comportamiento estructural de la capa ha sido muy satisfactorio.

La tabla 33 representa los módulos medios obtenidos en el cálculo inverso para el ramal 2.

				Módulo medio obtenido por retrocálculo (Mpa)			
		espesor	Módulo teórico (Mpa)	mar-11	sep-11	oct-12	mar-13
MBC	E1	14 cm	6.000	11.566	9.314	9.846	9.452
BASE	E2	30 cm	300	1.088	302	613	687
EXPLANADA	E3		100	410	402	416	388

Tabla 33. Módulos obtenidos según el cálculo inverso en el ramal 2

Como en el ramal 1, se han obtenido valores de módulos medios por encima de los teóricos en todas las capas estudiadas. Se aprecia cómo el módulo teórico de la mezcla bituminosa, de la base del firme y de la explanada, es superado ampliamente por los módulos de elasticidad medios obtenidos en los cuatro controles ADAR realizados. Los módulos obtenidos por cálculo inverso para la zahorra artificial han sido superiores a 300 MPa, mayores que el módulo teórico. El mes de septiembre de 2011 es el que da

menor módulo de elasticidad (302 Mpa), pero en los siguientes controles se recupera, dando valores por encima de 600 Mpa.

Podemos asegurar que el comportamiento de ambas zahorras ha sido satisfactorio. Los módulos de elasticidad obtenidos por retrocálculo han sido superiores a los teóricos, y en el caso de la zahorra reciclada con gran diferencia.

El aumento de capacidad portante observada en la zahorra reciclada respecto a la de la zahorra natural posiblemente sea debido a fenómenos de autocementación producidos en la zahorra reciclada. La autocementación puede producirse porque en el proceso de fabricación y compactación del material reciclado, la trituración que éste sufre provoca que el cemento antiguo sin hidratar presente en los RCD fragüe y endurezca de forma similar a como endurece un hormigón o un suelocemento.

Se decidió estudiar con más detalle lo producido en estos materiales. A continuación se recogen los resultados de este estudio.

5.4.4. ESTUDIO DE LA AUTOCEMENTACIÓN EN LA ZAHORRA DE ÁRIDOS RECICLADOS.

Para estudiar los posibles fenómenos de autocementación que justificarían la mejora en la capacidad portante en la zahorra de áridos reciclados se programó la extracción y el ensayo de probetas testigo en el ramal de investigación. De este modo se pretendía analizar lo ocurrido mediante análisis visual y ensayos de laboratorio. En especial, se quería conocer si las reacciones de conglomeración que posiblemente se hubieran producido en los materiales reciclados habían conseguido una autocementación en las zahorras, que permitiese la extracción del testigo sin que se desmoronase la muestra. Posteriormente, se realizaría el ensayo a compresión de la probeta testigo.

En diciembre de 2011 se realizaron las extracciones de las probetas testigo. Dichas extracciones se realizaron con una sonda rotativa marca HILTI provista de corona de diamante de 15 centímetros de diámetro, y según lo indicado en la norma UNE EN 12697-27.

El proceso del trabajo realizado in situ para cada muestra de ensayo fue:

- Extracción de las probetas testigo, consistentes en la perforación de las tres capas más superficiales del firme: las dos bituminosas y la de investigación.
- Medidas de las longitudes de estas capas, teniendo en cuenta que no se puede asegurar que se extrajera la totalidad de la capa de zahorra reciclada.
- Separación con cincel y machota de las capas bituminosas de la capa objeto de la investigación.
- Traslado al laboratorio del testigo de la capa de zahorra.

- Retacado de los agujeros de las extracciones, mediante relleno con hormigón preparado en obra, y colocación de las capas asfálticas anteriormente extraídas.

Del ramal 1, tramo de investigación con zahorras de áridos reciclados, se extrajeron 2 testigos ubicados en el arcén exterior del ramal. En el ramal 2, tramo de investigación con zahorra artificial de cantera, se realizó la perforación para la extracción de la probeta testigo, pero solo se pudieron extraer las capas bituminosas ya que la capa de la zahorra de cantera, aunque se presentaba muy compacta, se desmoronaba. El no poder extraer el testigo en la zahorra artificial de cantera indica que la resistencia a compresión en ella es nula, por lo que se puede deducir que no se ha producido reacción de conglomeración o autocementación en esta zahorra.

De las dos probetas testigo que se extrajeron de la capa de zahorra de áridos reciclados, una se desechó al tener una esbeltez (relación entre altura y diámetro) tan baja que el valor del ensayo de compresión no resultaría representativo. Pero el mero hecho de haber conseguido extraer el testigo indica que el material ha pasado de ser granular a cohesivo, pudiendo ser la autocementación de la muestra la responsable de esa cohesión.

Sobre la probeta testigo ensayada se determinó la densidad aparente y el ensayo a compresión:

- La densidad aparente de la probeta se realiza sobre las probetas talladas, determinando el volumen por medida directa de sus dimensiones.
- El ensayo a compresión se realiza, según lo indicado en la norma NLT 305/90, con el fin de determinar la resistencia o esfuerzo último de un suelo cohesivo a la compresión no confinada. Se aplica una carga axial con control de deformación y se utiliza una muestra de suelo inalterada tallada y en forma de cilindro. Las probetas testigo deben tallarse con el objeto de conseguir que sus bases sean lisas y que exista una perpendicular entre el eje longitudinal y la sección transversal constante. Esto garantizará la uniformidad en la aplicación de la carga a la probeta en el ensayo de compresión.

La densidad de las probetas testigo fue $2,15 \text{ kg/m}^3$. La densidad Próctor Modificado de aplicación para esta zahorra fue de $2,05 \text{ kg/m}^3$, que fue la que se exigió en obra. Por tanto, el material ha ganado consistencia y compacidad, pues ha pasado de una densidad inicial de $2,05$ a una de $2,15 \text{ kg/m}^3$. La figura 37 muestra la probeta testigo extraída del ramal 1.



Figura 37. Probeta-testigo del ramal 1

Como muestra la figura 37 la altura de la probeta testigo de la zahorra de áridos reciclados fue de 21 cm.

En la figura 38 se observa la probeta antes de aplicar la carga del ensayo (imagen izquierda) y la probeta rompiendo tras aplicar la carga del ensayo (imagen derecha).

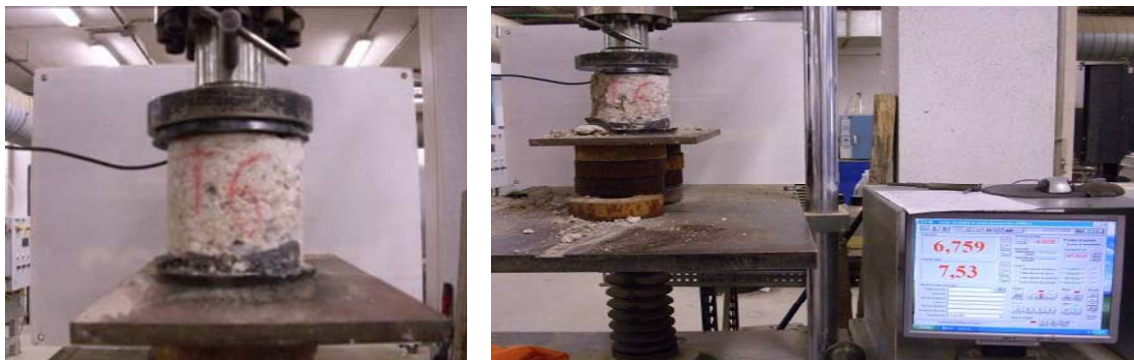


Figura 38. Probeta-testigo del ramal 1 ensayada a compresión

La resistencia de compresión obtenida en la probeta número 2 fue de 4.2 Mpa a una carga de rotura de 6.759 kp (figura 38), lo que indica que se han producido reacciones de conglomeración, pero ahora equivalentes a un suelocemento, ya que según el artículo 513.3 del PG-3 la resistencia media a compresión a 7 días debe estar comprendida entre 2,5 y 4,5 MPa.

Por tanto, se puede determinar que en la zahorra reciclada de RCD de esta investigación se han producido reacciones de conglomeración y que el factor más importante de estas reacciones es el cemento remanente.



6 CONCLUSIONES

6. CONCLUSIONES

El objetivo de este apartado es resumir las conclusiones que se desprenden de los resultados obtenidos en esta investigación. En la comparación del comportamiento de los firmes de zahorras de áridos naturales con el comportamiento de los firmes de zahorra de áridos procedentes de RCD, se han podido obtener las siguientes conclusiones:

- Heterogeneidad de los áridos RCD.

Las características y, consecuentemente, la calidad de los áridos reciclados dependen de una manera muy importante del proceso de fabricación. Por eso es fundamental que en dicho proceso se definan sus características en la ficha del material y se asegure la calidad del mismo mediante control de producción y certificación.

Bastará para ello que los áridos sujetos a la Directiva Europea posean el obligado marcado CE.

- Absorción de agua de los áridos.

Los áridos reciclados de RCD están constituidos por materiales como hormigones, morteros de cemento o ladrillos que son los causantes de que estos áridos de RCD tengan un mayor grado de absorción de agua que los áridos naturales y de que esta absorción se realice de manera más lenta. Dado que en los ensayos de laboratorio las humectaciones se hacen sin ningún “tiempo de maduración”, no da tiempo a que los áridos reciclados se hidraten totalmente y esto provoca, que los valores que se obtienen no sean válidos para la puesta en obra. Los áridos deberían humectarse previamente. Si no se realiza esta humectación previa, los áridos solo absorberán parte del agua necesaria para su puesta en obra, y esto provocará que un material, como por ejemplo la zahorra, presente un aspecto de falta de humedad, aunque tenga el grado de humedad óptima Próctor, y como consecuencia, sea muy difícil que conseguir la compactación solicitada del 100%, incluso el 98%, del Próctor Modificado.

Estas diferencias de absorción de agua hay que tenerlas en cuenta en la realización de todos los ensayos que requieran un amasado de la muestra con agua, como son la determinación de las condiciones de compactación o ensayo Próctor, la de los plazos de trabajabilidad o los ensayos que se emplean para determinar propiedades de los áridos compactados, como son el CBR, los hinchamientos, colapsos, etc. Por lo tanto, los ensayos anteriormente citados deberán realizarse con los áridos previamente saturados.

- Capacidad portante de los áridos reciclados.

En relación con el comportamiento de la capa de firme, a partir de los resultados de esta investigación, podemos determinar que la capacidad portante de la zahorra fabricada con áridos reciclados estudiada ha sido superior a la capacidad portante de la zahorra artificial de cantera en los tramos objeto de estudio. Este aumento se ha puesto de manifiesto en el análisis de la evolución de las deflexiones en el tiempo. Las deflexiones obtenidas en el ramal 1 de zahorras de áridos reciclados fueron inferiores a las obtenidas en el ramal 2 de zahorra artificial de cantera.

- Autocementación.

El aumento de capacidad portante observado en la zahorra reciclada respecto al de la zahorra natural posiblemente sea debido a fenómenos de autocementación producidos en la zahorra reciclada. La autocementación puede producirse porque en el proceso de fabricación y compactación del material reciclado, la trituration que éste sufre, ocasiona que el cemento antiguo sin hidratar presente en los RCD fragüe y endurezca de forma similar a como endurece un hormigón o un suelocemento. Esa teoría ha sido avalada por los resultados obtenidos en el punto 5.4.4. de esta tesis, que permiten observar que la resistencia obtenida en el ensayo de compresión simple de la probeta testigo de zahorra reciclada es equivalente a la de un suelocemento. Este aspecto, una vez estudiado y analizado, podría suponer un aspecto muy importante a tener en cuenta para utilizar los RCD en los firmes de carreteras.

- Aumento de la capacidad portante a pesar del incremento del tráfico.

El último control ADAR realizado en obra, en marzo de 2013, sigue poniendo de manifiesto el buen comportamiento del árido reciclado, a pesar de que se realizó un aforo de tráfico que reveló un tráfico T2, muy superior al tráfico T4 para el que se había dimensionado el tramo.

Se puede concluir que un árido reciclado mixto con las proporciones consideradas (70% procedente de residuos de hormigón, 20% de asfalto y 10% de material cerámico) presenta un comportamiento, como capa de firme en carreteras, que puede ser equivalente e incluso mejorar al del árido natural de cantera.



7 FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

7. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Este trabajo deja abiertas unas líneas de investigación que se podrían acometer en el futuro partiendo de los resultados obtenidos. Con el fin de ampliar la labor emprendida en esta Tesis Doctoral se sugieren las siguientes líneas de investigación:

- o Analizar en profundidad el aumento de la capacidad portante registrado en la zahorra reciclada. Utilizar técnicas de difracción de rayos X y/o de microscopía electrónica para intentar verificar si este aumento en la capacidad portante se produce por el fenómeno de autocementación debido al cemento no hidratado remanente en el árido reciclado o a las reacciones puzolánicas que pueden producirse al combinar el material de hormigón con el material cerámico en el árido reciclado. Así, se podría determinar qué mejoras hay que hacer en los procesos de fabricación y puesta en obra de los áridos de RCD para conseguir la mayor autocementación posible.
- o Los áridos reciclados de RCD presentan valores de Desgaste de los Ángeles (DLA) superiores a los permitidos por el PG-3 para los áridos naturales. Una de las causas que elevan el DLA de los áridos RCD es la presencia en ellos de mortero de cemento. Este mortero aporta a los áridos RCD unos finos de gran calidad, que pueden producir reacciones de autocementación ayudando a que el material reciclado aumente su capacidad portante. Se podría investigar sobre la idoneidad de elevar los valores de DLA sobre los permitidos en la norma, estudiando si el posible daño que pueda ocasionar el incremento de DLA se pueda ver compensado por el aumento de la capacidad portante del material a lo largo de tiempo.
- o Estudiar la capacidad de descontaminación por la absorción de CO_2 en la preparación de áridos RCD procedentes de materiales ligados con cemento. Los áridos de RCD presentan hidróxido cálcico $((\text{OH})_2 \text{Ca})$ atrapado en su interior. Esto se puede determinar porque el PH de los trozos de hormigón es básico y solo el hidróxido cálcico puede producir este PH en el hormigón. El hidróxido cálcico en determinadas condiciones puede generar las reacciones puzolánicas de los áridos RCD. El hidróxido cálcico que no genera reacciones puzolánicas reacciona con el CO_2 atmosférico para generar carbonatos, por lo tanto es un material que consume CO_2 y descontamina. Utilizando cámaras de CO_2 se podría determinar cuánto CO_2 puede absorber un árido RCD.
- o Determinar cuál de los métodos de ensayo de la UNE 1744-1 para la determinación del azufre (el anterior al 2010 o el posterior) es el más adecuado para los áridos RCD, teniendo en cuenta que estos compuestos de azufre proceden de residuos de productos de la construcción, y atendiendo a lo

investigado y a lo establecido en la normativa europea de obligado cumplimiento proponer la mejor normativa para aplicar a los áridos RCD. Investigar a partir de qué contenido en compuestos de azufre, y en qué condiciones se pueden producir patologías y, en base a ello, proponer modificaciones a los límites actualmente establecidos.

- O Los contenidos de materia orgánica que presentan los áridos RCD normalmente son superiores a los valores máximos permitidos por el PG-3 para los áridos y suelos naturales. Esto puede ser consecuencia de la presencia de material bituminoso, material de características muy distintas a los materiales responsables de la materia orgánica de los áridos naturales, como pueden ser los ácidos húmicos o fúlvicos. Los productos bituminosos, como son las mezclas asfálticas, aportan gran calidad a los áridos RCD, mientras que los ácidos húmicos o fúlvicos limitan la calidad de los áridos naturales y de RCD. Por tanto, el incremento en el contenido de materia orgánica de los áridos RCD se compensa con el incremento en la calidad del material. Por eso, se podría estudiar, para los áridos RCD, distintos valores de materia orgánica superiores a los máximos permitidos para los áridos naturales comprobando que ese incremento no disminuya la calidad de dichos áridos.

8 BIBLIOGRAFÍA

8. BIBLIOGRAFÍA

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

Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). Norma UNE-EN 933-1. Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 1: Determinación de la granulometría de los áridos. Métodos del tamizado. 1998

Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). Norma UNE-EN 933-2. Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 1: Métodos de muestreo. 1997.

Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). Norma UNE-EN 933-2. Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 2: Determinación de la granulometría de las partículas. Tamices de ensayo, tamaño nominal de las aberturas. 1998.

Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). Norma UNE-EN 933-3. Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 3: Determinación de la forma de las partículas. Índice de lajas. 2004

Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). Norma UNE-EN 933-5. Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 5: Determinación del porcentaje de caras de fractura de las partículas de árido grueso. 2005

Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). Norma UNE-EN 933-8. Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 8: Evaluación de los finos. Ensayo del equivalente de arena. 2000

Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). Norma UNE-EN 933-9. Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 9: Evaluación de los finos. Ensayo de azul de metileno. 1999

Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). Norma UNE-103100. Preparación de muestras para ensayos de suelos. 1995

Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). Norma UNE-103103. Determinación del límite líquido de un suelo. 1994.

Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). Norma UNE-103104. Determinación del límite plástico de un suelo. 1993.

Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). Norma UNE-103105. Geotecnia. Ensayo de compactación. Próctor modificado. 1994.

Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR) Norma UNE 103502. California Bearing Ratio; 1995.

Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). Norma UNE-EN 1097-2. Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 2: Métodos para la determinación de la resistencia a la fragmentación. Desgaste los Ángeles. 2007

Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). Norma UNE-EN 1744-1. Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos. Parte 1: Análisis químico. 1999.

Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). Norma UNE-EN 12697-27. Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezcla bituminosa en caliente. Parte 27: Toma de muestras. 2001.

Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). Norma UNE-EN 13242:2003 + A1:2008 (Áridos para capas granulares y capas tratadas con conglomerados hidráulicos para uso en capas estructurales de firmes.), Colección de Áridos, 2008.

Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). Norma UNE-146130. Anexo C. Áridos para mezclas bituminosas y tratamientos superficiales de carreteras, aeropuertos y otras áreas pavimentadas. 2000.

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

Agrela, F., Sánchez de Juan, M., Ayuso J, Gerales, V.L., Jiménez JR. (2011). Limiting properties in the manufacture of mixed recycled aggregates for use in the manufacture of concrete. *Construction and Building Materials*, vol. 25, pp. 3950-3955.

ASTM D2922-05. Standard Test Methods for Density of Soil and Soil-Aggregate in Place by Nuclear Methods.

ASTM D 3017-04. Standard Test Method for Water Content of Soil and Rock in Place by Nuclear Methods (Shallow Depth).

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

Ávila, E., Albarracín, F. (2014). Evaluación de Pavimentos en base a métodos no destructivos y análisis inverso. Universidad de Cuenca, Ecuador.

Barbudo, A., Agrela, F., Ayuso, J., Jiménez, J.R., Poon, C.S. (2011). Statistical analysis of recycled aggregates derived from different sources for sub-base applications. *Construction and Building Materials*, vol. 28, pp. 129–138.

Beltrán, M.G., Barbudo, A., Agrela, F., Galvín, A.P., Jiménez, J.R. (2014). Effect of cement addition on the properties of recycled concretes to reach control concretes strengths. *Journal of Cleaner Production*, vol. 79, pp. 124-133.

CEDEX. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. Dirección General de Carreteras, Ministerio de Fomento (1990). Normas NLT de ensayo de carreteras. Norma NLT-305. Resistencia a compresión simple de materiales tratados con conglomerantes hidráulicos. Madrid.

CEDEX. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. Dirección General de Carreteras, Ministerio de Fomento (1998a). Normas NLT de ensayo de carreteras. Norma NLT-330. Cálculo del índice de regularidad internacional, IRI, en pavimentos de carreteras. Madrid.

CEDEX. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. Dirección General de Carreteras, Ministerio de Fomento (1998b). Normas NLT de ensayo de carreteras. Norma NLT-357. Ensayo de carga con placa. Madrid.

Chong and Muhammed (2009). The Forward Path of Construction and Demolition Waste Reuse and Recycling: Market Forces, Regulatory Efforts and Actions from Construction Stakeholders. TRB.

COPT. Consejería de Obras Públicas y Transportes de la Junta de Andalucía (1999). Orden Circular 1/99 de Instrucción para el Diseño de Firmes de la Red de Carreteras de Andalucía.

Control de los Residuos de Construcción y Demolición, RCD, en los Ayuntamientos, Noviembre 2010. Asociación Española de Gestores de Residuos de Construcción y Demolición(<http://www.gerd.es/wp-content/uploads/2010/12/Cuadernillo-de-Ayuntamientos.pdf>).

Decreto 397/2010, de 2 de noviembre, por el que se aprueba el Plan Director Territorial de Residuos No Peligrosos de Andalucía 2010-2019. BOJA 231/2010, de noviembre de 2010.

Decreto 73/2012, de 20 de marzo, por el que se aprueba el reglamento de residuos de la comunidad autónoma de Andalucía. BOJA 81/2012, de abril de 2012.

Directiva 2008/98/CE – Parlamento Europeo y del Consejo de 19 de noviembre de 2008 sobre los residuos. Diario Oficial de la Unión Europea 22.11.2008- L 312/3.

Etxeberria, M., Marí, A., Vázquez, E. (2007). Recycled aggregate concrete as structural material. *Materials and Structures*, vol. 40, pp. 529–541.

European Commission (DG ENV). 2011. Final report task-2. Management of CDW. France; Available from: http://ec.europa.eu/environment/waste/pdf/2011_CDW_Report.pdf

European Commission (DG ENV).2012. Unit G.4 Sustainable Production and Consumption. Use of economic instruments and waste management performances. Final Report 10 April 2012. Contract ENV.G.4/FRA/2008/0112.

GIASA: “Manual ICAFIR, “Instrucción para el Diseño de firmes de la Red de carreteras de Andalucía del año 2007”. Consejería de Obras Públicas y Transportes de la Junta de Andalucía, 2007.

Kou, S.C., Poon, C.S. (2009) Properties of self-compacting concrete prepared with coarse and fine recycled concrete aggregates. *Cement&Concrete Composites*, vol. 31, pp. 622–627.

Higuera Sandoval, C.H. (2011). Caracterización de la resistencia de la subrasante con la información del deflectómetro de impacto. VI Jornadas de pavimentos y mantenimiento vial, Bogotá.

Jiménez J.R., Agrela F., Ayuso J., López M. A. (2011a). Comparative study of recycled aggregates from concrete and mixed debris as material for unbound road sub-base. *Materiales de Construcción*; 61(302):289–302.

Jiménez J.R., Agrela F., Ayuso J., López M. A, Galvin A.P. (2011b). Utilisation of unbound recycled aggregates from selected CDW in unpaved rural. *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 58, pp. 88-97.ELSEVIER

Jiménez J.R., Ayuso J., López M. A., Fernández, J.M., de Brito, J. (2012a). Use of fine recycled aggregates from ceramic waste in masonry mortar manufacturing. *Construction and Building Materials*, vol. 40, pp. 679–690.

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

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

Leite F.C., Motta, R.S., Vasconcelos, K.L., Bernucci, L. (2011). Laboratory evaluation of recycled construction and demolition waste for pavements. *Construction and Building Materials*, vol. 25, pp. 2972-2979.

Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados. BOE núm.181 del 29 de julio de 2011 Sec. I. Pág. 85650. Ministerio de la Presidencia de España.

Ley 10/1998, de 21 de abril, de Residuos. BOE núm.96 del 22 de abril de 1998 Pág. 13372. Ministerio de la Presidencia de España.

Mas, B., Cladera, A., del Olmo, T., Pitarch, F.(2012) Influence of the amount of mixed recycled aggregates on the properties of concrete for non-structural use. *Construction and Building Materials* vol. 27, pp. 612–622

Ministerio de Fomento. Dirección General de Carreteras (2003a), “Norma 6.1.-IC “Secciones de Firms”. Orden FOM 3460/2003.

Ministerio de Fomento. Dirección General de Carreteras (2003b), “Norma 6.3.-IC “Rehabilitación de Firms”. Orden Ministerial (BOE de 12-12-03).

Ministerio de Fomento. Dirección General de Carreteras (2008): “Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes PG-3”. Orden Circular 24/2008.

Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo, Centro de Publicaciones, D.L. 1987. “Sistematización de los medios de compactación y su control”

Molenaar, A.A.A., Van Niekerk, A.A. (2002). Effects of gradation, composition, and degree of compaction on the mechanical characteristics of recycled unbound materials. *Transportation Research Record*, vol. 1787, pp.73-82.

Nataatmadja, A.; Tan, Y. L. Resilient response of recycled concrete road aggregates. *Journal of Transportation Engineering*. Reston, Virginia, v.127, n.5, p.450-453, 2001.

Manual de Directrices para el uso de Áridos Reciclados en Obras Públicas de la Comunidad Autónoma del País Vasco. Edita Ihobe, S.A. 2009. Sociedad Pública del Departamento de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio del Gobierno Vasco.

II Programa Marco Ambiental de la Comunidad Autónoma del País Vasco 2007-2010. Edita Ihobe, S.A. 2007. Sociedad Pública del Departamento de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio del Gobierno Vasco.

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. Boletín Oficial del Estado, núm. 43 de 19 de febrero de 2002, pp. 6494-6515.

Pérez, P., Agrela, F., Herrador, R., Ordóñez, J. (2013). Application of cement-treated recycled materials in the construction of a section of road in Malaga, Spain. *Construction and Building Materials*, vol. 44, pp. 593–599.

Plan Nacional Integrado de Residuos (PNIR) 2008-2015(Integrated National Waste Plan for the period 2008–2015). Ministerio de Medio Ambiente de España. Boletín Oficial del Estado Español 2009;49:19893–20016.

Plan Director Territorial de Gestión de Residuos no Peligrosos de Andalucía, 2010-2019. Boletín oficial de la Junta de Andalucía, BOJA, año 2010, núm. 231, pág. 214.

Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para los Controles de Auscultación Dinámica de Alto Rendimiento. Gestión de Infraestructuras de Andalucía. Consejería de Obras Públicas y Vivienda de la Junta de Andalucía.http://www.giasa.com/inetfiles/area_tecnica/Calidad/ADAR/pliego_prescripciones_ADAR.pdf.

Poon, C.S.; Chan, D. (2006) Feasible use of recycled concrete aggregates and crushed clay brick as unbound road sub-base. *Construction and building materials*, vol. 20, pp. 578-585.

Poon, C.S., Kou, S.C., Lam, L. (2002) Use of recycled aggregates in molded concrete bricks and blocks. *Construction and Building Materials*, vol. 16, pp. 281–289.

Poon, C.S., Qiao, X.C., 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*, vol. 26 (10), pp. 1166-1172.

Poon C.S., Shui, Z.H., Lam, L., Fok, H., 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*, 1:31-6.

Proyecto Gear. Asociación Española de Gestores de Residuos de Construcción y Demolición (GERD). Guía española de áridos reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición, 2008-2011. (<http://www.gerd.com>)

Rahal K., (2007). Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate. *Building and environment* 42, pp. 407-415.

Real Decreto 105/2008, de 1 de febrero, por el que se regula la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición. Boletín Oficial del Estado núm. 38 del 13 de febrero de 2008, páginas 7727 a 7730.

Real Decreto 1328/1995 Transposición de la Directiva 93/68/CE Marcado CE (Boletín Oficial del Estado. 19.8.95).

Rodriguez, G., Alegre F.J., Martínez, G. (2007). The contribution of environmental management systems to the management of construction and demolition waste: the case of the Autonomous Community of Madrid (Spain). *Resources, Conservation and Recycling*; 50(3):334-49.

Sangiorgi, C., Lantieri, C., Dondi, G. (2014). Construction and demolition waste recycling: an application for road construction, *International Journal of Pavement Engineering*, DOI: 10.1080/10298436.2014.943134.

Schulz, R.; Hendricks, F. (1992). Recycling of masonry rubble. Recycling of Demolished Concrete and Masonry. Report of Technical Committee – Demolition and Reuse of Concrete, 37. London: RILEM, 1992. <http://es.scribd.com/doc/93482482/Recycling-of-Demolished-B>.

Solís-Guzman, J., Marreno, M., Montes-Delgado, M.V., Ramírez-de-Arellano A. (2009). A Spanish model for quantification and management of construction waste. *Waste Management*, vol. 29, pp.2542–8.

Taha, R.; Al-Rawas, A.; Al-Jabri, K.; Al-Harthy, A.; Hassan, H.; Al-Oraimi, S. (2004) An overview of waste materials recycling in the Sultanate of Oman. *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 41, pp. 293-306.

Vegas I, Ibañez JA, San José JT, Urzelai A. (2008). Construction demolition wastes, Waelz slag and MSWI bottom ash: A comparative technical analysis as material for road construction. *Waste Management*, vol. 28, pp.565-574.

Vegas I, Ibañez JA, Lisbona A., Sáez de Cortazar A, Frías M. (2011). Pre-normative research on the use of mixed recycled aggregates in unbound road sections. *Construction and Building Materials* vol. 25, pp. 2674–2682.

Von Stein, E. L. Chapter 20: Construction and demolition debris. *The McGraw-Hill Recycling Handbook*. Herbert F. Lund, McGraw-Hill Professional, 2nd edition, New York, 2000, 976p.

Xuan D.X., Houben L.J.M., Molenaar A.A.A., Zhonghe S. (2010). Cement treated recycled Demolition waste as a road base material. *Journal of Wuhan University of Technology Materials* vol. 25(4), pp.96-699.