

# Catálogo de firmes y unidades de obra con áridos reciclados de Residuos de Construcción y Demolición (RCD)

*Catalogue for pavement and construction units design, by using recycled aggregates from Construction and Demolition Waste (CDW)*

María José SIERRA LÓPEZ  
*Jefe de Unidad de Control Técnico de Obras  
Agencia de Obra Pública de la Junta de Andalucía*

María del Lirio GARCÍA GARRIDO  
*Gerente de Obras. Agencia de Obra Pública de la Junta de Andalucía*

Francisco Javier MORALES GÁMIZ  
*Departamento de I+D+i. Centro de Estudios de Materiales y Obras (CEMOSA)*

Francisco Antonio GARCÍA VILLENA  
*Departamento de I+D+i. Centro de Estudios de Materiales y Obras (CEMOSA)*

## RESUMEN

En cumplimiento de las directrices europeas y nacionales sobre la eficiencia ambiental en la construcción de infraestructuras, la Agencia de Obra Pública de la Junta de Andalucía (AOPJA) ha llevado a cabo diversos proyectos de investigación para el fomento del uso de los materiales reciclados de residuos de construcción y demolición RCD en las obras, cuya tasa de utilización es aún muy inferior a lo exigido.

Fruto de los resultados de estas investigaciones es el *Catálogo de firmes y unidades de obra con áridos reciclados de residuos de construcción y demolición (RCD)*, que pretende ser una guía técnica para los proyectistas y/o direcciones de obra, contribuyendo a eliminar la barrera técnica que aún existe para el uso de estos materiales.

En el catálogo se presentan soluciones constructivas avaladas por la experiencia o bien calculadas considerando las características particulares de los materiales reciclados. Para ello estos materiales se han sometido a una caracterización físicoquímica y mecánica en laboratorio, y analizado su comportamiento a escala real mediante la ejecución de tramos experimentales, que se han evaluado a lo largo del tiempo mediante programas de auscultación.

**PALABRAS CLAVE:** Árido, Firme, Dimensionamiento, Cálculo analítico, Construcción, Residuo de construcción y demolición RCD, Árido reciclado, Sección de firme, Catálogo de firme.

## ABSTRACT

*In accordance with European and national guidelines for environmental efficiency in infrastructure building, the Public Works Agency of the Andalusia Regional Government has carried out several research projects in order to increase the use of recycled aggregates from construction and demolition waste in public works, whose utilization is yet under the legislation rates.*

*As a result of these researches is has been drafted the *Catalogue for pavement and construction units design, by using recycles aggregates from construction and demolition waste (CDW)*. This catalogue is intended to be a technical guideline for construction managers and designers in order to remove the technical barrier that still exists for the use of those products.*

*The technical solutions that are presented in the catalogue are based in the experience or calculated considering the particular characteristics of the recycled materials. A physiochemical and mechanical characterization of those materials has been made in laboratory and its behavior has been evaluated full scale by the execution of experimental sections that have been assessed over time.*

**KEY WORDS:** *Aggregate, Pavement, Sizing, Aanalytical calculation, Construction, Aggregate from construction and demolition CDW, Recycled aggregate, Pavement section, Catalogue for pavement.*

## Antecedentes

La *Agencia de Obra Pública de la Junta de Andalucía (AOPJA)*, en su compromiso con el medio ambiente y en la línea de conseguir un desarrollo más sostenible de la actividad constructiva, ha liderado varios proyectos de investigación en colaboración con empresas del sector, para el estudio del comportamiento tanto a nivel de laboratorio como en condiciones de uso real de distintos tipos de residuos generados en la comunidad andaluza, como son los residuos de construcción y demolición (RCD's), polvo de neumático fuera de uso (PNFU), residuos de la industria del Silestone®<sup>(a)</sup>, residuos de las plantas de biomasa, residuos plásticos de invernaderos, etc.

En abril de 2010 GIASA (actualmente AOPJA) redactó unas *Recomendaciones para la redacción de Pliegos de Especificaciones Técnicas para el uso de Materiales Reciclados de Residuos de Construcción y Demolición (RCD)*, con el objetivo de normalizar el uso de los materiales procedentes de *residuos de construcción y demolición (RCD)*, y llenar el vacío normativo existente en ese momento, definiendo unas pautas para la utilización efectiva de estos materiales (Fotos 1 a 3).

Estas recomendaciones se redactaron en base a los resultados de las investigaciones realizadas durante la ejecución de dos convenios integrados firmados al efecto por GIASA con empresas del sector de la construcción (constructoras y laboratorios de ensayos de materiales) y recicladores de residuos de construcción y demolición; junto con el análisis de la normativa y la experiencia en la gestión y ejecución de obras de infraestructura en Andalucía. En dichos proyectos no solo se han ejecutado tramos de investigación tecnológica con estos residuos, sino que se ha evaluado el comportamiento de estos tramos y su funcionalidad durante los cuatro años siguientes a su ejecución, mediante la auscultación de sus características, comparándolos con tramos de referencia ejecutados con materiales convencionales.

La aparición de estas recomendaciones supuso un paso importante en el fomento del uso de estos materiales reciclados, sirviendo de guía en diferentes tipologías de obras en las que estos materiales se han utilizado. Sin embargo, aún siguen existiendo importantes barreras técnicas para el empleo de estos materiales reciclados.

## Introducción

En la línea de la mejora de la eficiencia ambiental en la construcción de las infraestructuras viarias y ferroviarias de Andalucía, concretamente en la investigación y utilización de residuos, entre ellos los procedentes de construcción y demolición, la AOPJA adjudicó a la Universidad de Córdoba en el año 2012, en la 1ª Convocatoria de Proyectos de I+D+i de la Consejería de Fomento y Vivienda de la Junta de Andalucía 2011-2013, el proyecto *Aplicaciones de los áridos reciclados de residuos de construcción y demolición (RCD) para la construcción sostenible de infraestructuras viarias en Andalucía*



**Foto 1.** Demolición de un edificio. Generación de los residuos de construcción y demolición, RCD.



**Foto 2.** Separación previa en origen de residuos de construcción y demolición, RCD.



**Foto 3.** Fabricación de áridos reciclados a partir de RCD.

(a) Piedra artificial compuesta de resinas, micronizado de sílice y triturados de sílice, cuarzo y otros materiales, muy utilizada en la fabricación de encimeras de cocina y revestimiento de suelos y paredes.

*Central*. En dicho proyecto, financiado con fondos FEDER de la Unión Europea, han participado como empresas colaboradoras CEMOSA (Centro de Estudios de Materiales y Control de Obra, S.A.) y AGRECA (Asociación de Empresas Gestoras de Residuos de Construcción y Demolición de Andalucía).

La redacción de un catálogo de firmes y unidades de obra con materiales reciclados de residuos de construcción y demolición constituye uno de los objetivos específicos de dicho proyecto.

## Marco legal y situación actual de los RCD

Residuo de construcción y demolición es cualquier sustancia u objeto que, cumpliendo la definición de residuo incluida en la Ley 22/2011 del 28 de julio, se genere en una obra de construcción o demolición (Foto 1).

El instrumento normativo específico en materia de RCD es el Real Decreto 105/2008, por el que se regula la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición (RCD).

La actual Directiva Marco de Residuos establece que, antes de 2020, deberá aumentarse hasta un 70% en peso la preparación para la reutilización, el reciclado y otra valorización de materiales, de los residuos no peligrosos procedentes de la construcción y de las demoliciones. Esta exigencia se recoge lógicamente en las legislaciones estatal y autonómica.

Así la Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados (conocida como la *Ley Marco de Residuos*), es la transposición de la Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 9 de noviembre de 2008 (*Directiva Marco de Residuos*). La Directiva Marco centra su objetivo en la prevención y el reciclado y en reforzar el principio de jerarquía en las opciones de gestión de residuos. Es decir, la prevención es la mejor opción de gestión seguida, y en este orden, de la preparación para la reutilización, del reciclado, de otras formas de valorización y, por último, de la eliminación (el depósito en vertederos, entre otras).

A nivel de la Comunidad Andaluza, el Plan Director Territorial de Gestión de residuos no peligrosos de Andalucía 2010-2019 constituye el marco en el que se establecen las bases que deberán regir la política en materia de residuos no peligrosos en Andalucía. Incluye, entre otras medidas, que tanto las administraciones locales como el gobierno autonómico potenciarán el uso de los áridos reciclados y definirán estándares de calidad para estos productos, para sus posibles aplicaciones, complementando la normativa existente.

A finales de 2016 se publicó el Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos (PEMAR) 2016-2022, el instrumento para orientar la política de residuos en España, impulsando las medidas necesarias para mejorar las deficiencias detectadas y promoviendo las actuaciones que proporcionen un mejor resultado ambiental y aseguren la consecución de los objetivos legales.

El objetivo es convertir a Europa en una sociedad eficiente en el uso de los recursos, que produzca menos residuos y que utilice como recurso, siempre que sea posible, los que no pueden ser evitados. En definitiva, se trata de sustituir una economía *lineal* basada en producir, consumir y tirar, por una economía *circULAR* en la que se reincorporen al proceso productivo una y otra vez los materiales que contienen residuos para la producción de nuevos productos o materias primas. En este planteamiento, el reciclaje o la valorización material de los residuos juegan un papel primordial.

Tanto los datos aportados por el Gremio Español de Entidades de Reciclaje de residuos de RCD como por la Comisión Europea, ponen de manifiesto que la tasa de reciclado de RCD en España es bastante inferior a la media del resto de Estados Miembros, y distan mucho de los objetivos marcados por la legislación. Esto provoca serios impactos ambientales, entre los que destacan la contaminación de suelos y acuíferos, el deterioro paisajístico y la eliminación de estos residuos sin aprovechamiento de sus recursos valorizables.

Son diversas las causas de estas bajas tasas de reciclado de residuos de RCD, entre ellas se pueden apuntar: bajo coste de su depósito en vertedero sin tratamiento previo, altos costes de transporte y tratamiento de los residuos en el proceso de transformación de los RCD en áridos reciclados, insuficiente motivación medioambiental en el sector de la construcción, escaso conocimiento técnico de las características y el comportamiento de los áridos preparados a partir del reciclado de los RCD y, también, aspectos relacionados con las exigencias de las normativas técnicas de materiales de construcción respecto al empleo de este tipo de áridos.

## Objetivos del Catálogo

Como estrategia de la AOPJA para el cumplimiento del marco legal, el objetivo general del proyecto de investigación *Aplicaciones de los áridos reciclados de residuos de construcción y demolición (RCD) para la construcción sostenible de infraestructuras viarias en Andalucía Central* es el de promocionar el uso de los áridos reciclados de RCD en las obras de infraestructuras viarias mediante el estudio de nuevas aplicaciones de mayor valor añadido. Este objetivo general se desglosa en los siguientes objetivos específicos, alcanzados a la finalización del mismo:

- Desarrollo de nuevas aplicaciones de los áridos reciclados.
- Redacción de una *Guía de áridos reciclados de Andalucía: Parte 1-Andalucía Central*.
- Redacción de una *Guía de Buenas Prácticas en la Gestión y Tratamiento de los Residuos de Construcción y Demolición (RCD)*.
- Redacción de un *Catálogo de Firmes y Unidades de Obra con áridos reciclados de Residuos de Construcción y Demolición (RCD)*.





Foto 4. Medida de deflexiones en capa de suelo seleccionado reciclado.

En base a los resultados del proyecto de investigación y considerando también la actualización del *Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para obras de carreteras y puentes (PG-3)*, se han actualizado las recomendaciones de 2010, apareciendo la 2ª edición en julio de 2017.

El fomento del uso de los materiales reciclados de RCD pasa por su inclusión en los proyectos de obras. Los proyectistas deben contar con el respaldo de guías técnicas o recomendaciones de cálculo para sus proyectos, tales como la *Instrucción de Firmes 6.1-IC* del Ministerio de Fomento o la *Instrucción para el Diseño de Firmes de la Red de Carreteras de Andalucía (ICAFIR)* o la *Instrucción 5.2-IC* en el caso de drenaje superficial de obras viarias. Estas normativas no contemplan el uso de áridos reciclados, dejando al proyectista y, en su caso, a la dirección de obra toda la responsabilidad sobre el modo de uso de estos materiales, aún cumpliendo las características del pliego de RCD de la AOPJA.

El catálogo se redacta, pues, con la finalidad de eliminar esta barrera técnica a través de la presentación de soluciones constructivas bien avaladas por la experiencia o bien calculadas teniendo en cuenta las características particulares de los áridos de RCD (ver Figura 1).

### Ámbito de aplicación del Catálogo

El ámbito de aplicación de este catálogo son las unidades de obra, dentro de obras viarias, en las que actualmente se emplean áridos RCD pero sin una normativa específica para ello, como son:

- Firmes de obras viarias,
- Firmes de caminos rurales,
- Acerados y vías peatonales,
- Firmes de vías ciclistas, y
- Obras de drenaje y zanjas.

En todas estas tipologías de obra existen casos en los que es factible la sustitución total o parcial de áridos naturales con áridos de RCD.



Foto 5. Tramo experimental en la carretera A-367. Venta El Cordobés. A la izquierda extendido de gravacemiento reciclada, a la derecha aspecto del tramo una vez asfaltado.



Figura 1. Catálogo de firmes con áridos reciclados de RCD.

La modificación de las especificaciones de calidad de los áridos para el fomento del empleo de los RCD que solicita la legislación medioambiental, solo sería técnicamente aceptable si se garantiza que las obras o unidades de obra fabricadas con estos materiales cumplirán con los requisitos de calidad fijados en el proyecto. Es decir, el comportamiento estructural del paquete de firme con materiales reciclados de RCD debe ser igual al construido con sus materiales equivalentes convencionales.

Estas modificaciones de estándares de calidad han de estar fundamentadas en criterios técnicos rigurosos, por lo que resulta imprescindible la investigación de las características físicas, químicas y mecánicas de estos materiales; en primer lugar a nivel de laboratorio y, posteriormente con la ejecución y seguimiento de tramos experimentales, tal y como se ha llevado a cabo en distintos proyectos realizados por la AOPJA (Fotos 4 y 5).

## Contenido y estructura del Catálogo

Para facilitar el empleo de este catálogo a los proyectistas, el documento se compone de varias partes diferenciadas:

- Un catálogo de firmes.
- Soluciones constructivas para otras unidades de obra.
- Fichas de características de materiales reciclados de RCD: zohorras, suelos, suelocemento, gravacemento, hormigón compactado con rodillo.

En el catálogo se establece un sistema de clasificación y designación de los áridos reciclados, que se pueden utilizar de forma homogénea en las plantas de tratamiento, en los proyectos y en las obras. Esta clasificación se ha realizado en base a los ensayos de composición, según la norma *UNE-EN 933-11. Ensayos de clasificación de los componentes de los áridos gruesos reciclados* (ver Tabla 1).

Tipo	Composición			Absorción	
	Componentes principales	X	FL (*)	Finos (< 4mm)	Gruesos (≥ 4mm)
ARH	Rc + Ru ≥ 90 %	< 1 %	< 1 cm³/kg	< 10 %	< 7 %
ARM	Rc + Ru+Ra ≥ 70 %	< 1 %		< 12 %	< 9 %
	Rc + Ru ≥ 55 %	< 2 %	< 2 cm³/kg	< 14 %	< 11 %
ARA	Ra ≥ 50% Rc + Ru + Ra ≥ 90%	< 1 %	< 1 cm³/kg	< 10 %	< 7 %
SR Seleccionado	-	< 3 %	< 2 cm³/kg	-	< 12 %
SR Tolerable	-	< 5 %		-	< 14 %

(\*) Se rebajará a 0,5 cm³/kg cuando el suelo no vaya a ser cubierto por ninguna otra capa.

**Tabla 1.** Clasificación de los materiales reciclados.

En el documento se especifican las características exigibles a cada uno de los materiales reciclados en función del uso, capa y categoría de tráfico pesado. El catálogo recoge una caracterización de los áridos reciclados, con las características mecánicas exigibles a cada material y para cada uso, tal como se refleja en la Tabla 2, en la que se recoge la denominación de los distintos materiales reciclados contemplados en el catálogo, junto con su símbolo o designación reducida.

El resto de requisitos relativos a composición, geometría, físico-mecánicos y químicos que deben cumplir estos materiales, se recogen en el Anexo II del Catálogo *Características exigibles a los materiales*.

Símbolo	Designación del material	Características	Prescripciones complementarias para su empleo en					
			Firmes de carretera	Firmes de caminos rurales	Carril bici y vías peatonales	Cimiento del firme: Núcleo	Cimiento del firme: Capas de asiento	Obras de drenaje y zanjas
ZARHor	Zahorra artificial reciclada de hormigón	Ver Anexo II	T2: LA<35 T3: LA<40 T4: LA<40	T4: LA<40	LA<40			
ZARM I	Zahorra artificial reciclada mixta Tipo I de RCD	Ver Anexo II	T3: LA<40 T4: LA<40	T4: LA<40	LA<40			
ZARM II	Zahorra artificial reciclada mixta Tipo II de RCD	Ver Anexo II	T4: LA<40	T4: LA<40	LA<45			
ZARA	Zahorra artificial reciclada asfáltica	Ver Anexo II	T2: LA<35 T3: LA<40 T4: LA<40	T4: LA<40	LA<40			
SR-SEL	Suelo seleccionado reciclado de RCD	Ver Anexo II				CBR≥3	CBR≥5	
SR TOL	Suelo tolerable reciclado de RCD	Ver Anexo II				CBR≥3		
SCR	Suelo-cemento reciclado de RCD	Ver Anexo II	T2, T3, T4: fc=2,5 a 4,5 MPa		fc>1,5 MPa			
HRC	Hormigón seco compactado reciclado de RCD	Ver Anexo II						
GCR20	Gravacemento reciclada de RCD	Ver Anexo II	T2: LA<35 T3: LA<40 T4: LA<40					
GCR32	Gravacemento reciclada de RCD	Ver Anexo II	T2: LA<35 T3: LA<40 T4: LA<40					

Nota: LA Los Angeles; fc Resistencia a compresión.

**Tabla 2.** Características mecánicas exigibles a cada material.

Para cada tipología de obra (firmes de carreteras, caminos rurales, vías ciclistas, obras de drenaje,... etc.) se incluyen, además de las secciones tipo, criterios de proyecto y aspectos constructivos.

En el Anexo III se incluyen ejemplos de fichas modelo de características para distintos materiales reciclados de RCD, con las especificaciones que deben cumplir estos materiales y el uso previsto (ver ejemplo de suelo seleccionado reciclado en Figura 2).

## Firmes de carreteras

### 1. Generalidades

En lo relativo a las obras de carretera, en base a la experiencia de los tramos de prueba ejecutados hasta el momento, el uso de áridos reciclados de RCD en secciones de firme presenta un buen comportamiento en categorías de tráfico T2 e inferiores, de ahí que las secciones tipo consideradas en esta guía se restrinjan a las categorías de tráfico pesado T2 a T4.

De acuerdo con la *Instrucción de Diseño de Firmes de la Red de Carreteras de Andalucía ICAFIR*, se definen tres categorías de cimiento del firme en función de su capacidad de soporte. La categoría de cimiento se seleccionará teniendo en cuenta la categoría de tráfico de proyecto elegido, el terreno natural subyacente existente, los suelos disponibles y el coste total de la solución (Figura 3).

### 2. Metodología de cálculo

La metodología de cálculo se basó en la comprobación de diferentes secciones calculadas, para un determinado nivel de tráfico, mediante la aplicación de criterios de fatiga. Estos criterios son expresiones matemáticas que relacionan la deformación o tensión en un determinado punto de una capa de la sección de firme, ante la aplicación estática de una carga patrón, con el número máximo de ciclos que podría resistir dicha capa para dicha carga patrón antes de que se produjera su fallo. Existen diferentes criterios dependiendo de la naturaleza del material y de la capa analizada.

Para la aplicación de los criterios de fatiga es necesario obtener el estado tensional generado en el paquete de firme ocasionado por la carga patrón en su superficie. La modelización de este estado tensional fue generada mediante el programa comercial ANSYS® (Versión 14). Este es un programa tridimensional que emplea un modelo de elementos finitos, permitiendo simular el comportamiento elástico y elastoplástico de diferentes materiales como suelos, rocas o mezclas bituminosas.

Sello de Marcado CE o AGRECA, según corresponda		
EMPRESA DIRECCIÓN XXXXXXXXXX		
CENTRO DE PRODUCCIÓN XXXXXXXXXXXXXX		
Denominación: Suelo seleccionado reciclado de RCD SR-SEL Tipo material: Suelo seleccionado Uso previsto: Explanadas de firmes de carreteras, relleno de zanjas, explanada en vías ciclistas y caminos rurales.		
Composición UNE-EN 933-11	X	Fl      Yeso
	< 3%	< 2 <sup>m</sup> cm <sup>3</sup> /kg      < 1%
(*) se rebajará a 0,3 cm <sup>3</sup> /kg cuando el suelo no vaya a ser cubierto por ninguna otra capa		
Granulometría UNE-EN 933-1	Dmax	≤ 100
	#20	> 70 %
Además debe cumplir que:		
	#0,40	< 15 %
A de no ser así:		
	#2	< 80 %
	#0,40	< 75 %
	#0,080	< 25 %
Plasticidad de las partículas UNE 103103 / UNE 103104	LL	< 30
	IP	< 10
Contenido en materia orgánica UNE 103204	< 0,2 % si procede de firmes de excavación < 1 % si procede de RCD < 2 % si contiene bituminoso	
Sales Solubles NLT 114	< 2 %	
Contenido en yeso NLT 115	< 2 %	

Figura 2. Ficha de características de suelo seleccionado reciclado.

### 3. Características de los materiales reciclados. Disposición de las diferentes capas en las nuevas secciones equivalentes

Los áridos reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición (RCD) considerados en el diseño de las nuevas secciones del Catálogo de Firmes y Unidades de Obra con Áridos Reciclados fueron clasificados en base a su procedencia (composición), tamaño y características mecánicas (módulo de elasticidad, coeficiente de Poisson y desgaste los Ángeles DLA) en forma de equivalencia respecto a los áridos naturales. Esta equivalencia faci-

		TIPO DE SUELO DE LA EXPLANACIÓN O DE LA OBRA DE TIERRA SUBYACENTE		
		Suelos inadecuados y marginales	Suelos tolerables	Suelos adecuados
CATEGORÍA DE EXPLANADA	E1	SR-Sel 85 IN	SR-Sel 35 SR-Tol 70 IN	S-EST1 30 SR-Tol 50 IN
	E2	SR-Sel 40 SR-Tol 80 IN	SR-Sel 75 S-Tol	SR-Sel 25 S-EST1 25 S-Tol
	E3	S-EST 3 SR-Sel 50 IN	S-EST 3 SR-Sel 75 S-Tol	S-Ad 55

IN: suelo inadecuado; S-Tol: Suelo tolerable; S-Ad: Suelo adecuado; SR-Tol: suelo reciclado tolerable de RCD; SR-Sel: Suelo reciclado seleccionado de RCD; S-EST1: Suelo estabilizado tipo 1; S-EST2: Suelo estabilizado tipo 2; S-EST3: Suelo estabilizado tipo 3.

Figura 3 . Secciones de explanada en función del terreno natural subyacente.

litó la posterior fase de diseño de las nuevas secciones constructivas.

De esta forma los materiales reciclados procedentes de RCD se agruparon en las tipologías detalladas en la Tabla 3.

Para su inclusión en las capas de las nuevas secciones de firme equivalente, a los materiales reciclados se les realizó una caracterización previa a fin de evaluar sus características mecánicas y resistentes. Esta caracterización se basó en una serie de ensayos entre los que destacan la obtención del módulo de deformación del material o módulo elástico y su coeficiente de Poisson, que serán de gran utilidad para la definición del modelo computacional del material.

Designación del material	Abreviatura	Valores límite del DLA en relación a categoría de tráfico
Zahorra artificial reciclada de hormigón	ZARHor	T2: DLA<35 T3: DLA<40 T4: DLA<40
Zahorra artificial reciclada mixta tipo I de RCD	ZARM I	T3: DLA<40 T4: DLA<40
Zahorra artificial reciclada mixta tipo II de RCD	ZARM II	T4: DLA<40
Zahorra artificial reciclada asfáltica	ZARA	T2: DLA<35 T3: DLA<40 T4: DLA<40
Suelo seleccionado reciclado de RCD	SR-SEL	-
Suelo tolerable reciclado de RCD	SR-TOL	-
Suelocemento reciclado de RCD	SCR	-
Hormigón seco compactado reciclado de RCD	HCR	T2: DLA<35 T3: DLA<40 T4: DLA<40
Gravacemento reciclada de RCD	GCR	T2: DLA<35 T3: DLA<40 T4: DLA<40

Pie tabla: DLA Desgaste Los Angeles.

**Tabla 3.** Clasificación de los áridos reciclados de RCD usados en las nuevas secciones de firme.

De los resultados de estos ensayos se demuestra una equivalencia total entre la zahorra reciclada de hormigón (ZARHor) y una zahorra artificial (ZA) en cuanto a su comportamiento mecánico en firmes de carretera, de acuerdo al PG-3, artículo 510 (ver Tabla 4). De igual forma, para el suelocemento reciclado con áridos RCD (SCR) se encuentra una equivalencia respecto al suelocemento (SC) de acuerdo al artículo 513 del PG-3. Esto posibilita la sustitución de una capa de iguales dimensiones de suelocemento y zahorra artificial por sus equivalentes reciclados de hormigón.

Material	Árido natural	Árido reciclado equivalente	Módulo de elasticidad (MPa)	Coficiente de Poisson
Zahorra	ZA	ZARHor	500	0,35
		ZARM I	400	0,35
		ZARM II	300	0,35
Suelocemento	SC	SCR	8.000	0,25
Hormigón compactado	HC	HCR	13.000	0,25

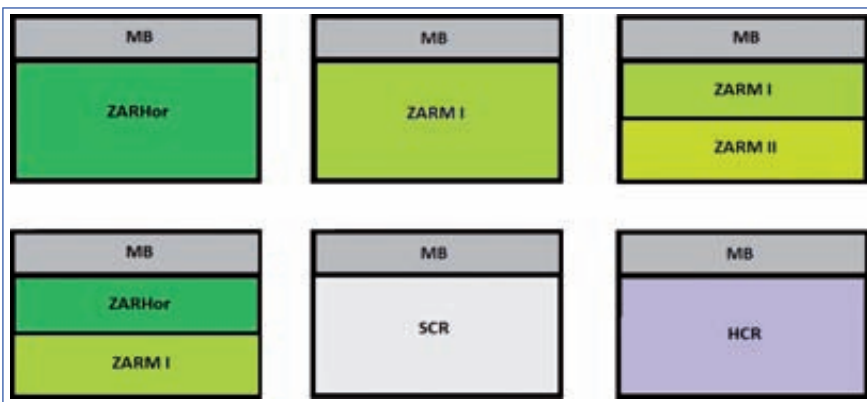
**Tabla 4.** Características mecánicas de los materiales reciclados utilizados en las nuevas secciones y sus equivalentes áridos naturales.

Sin embargo, en el caso de las zahorras artificiales mixtas con áridos procedentes de RCD (ZARM I y ZARM II) las características resistentes presentan valores inferiores a su equivalente convencional (Tabla 4). Este hecho implica que las capas que incluyen estos materiales han de ser de mayor espesor respecto a las secciones equivalentes actuales con árido natural.

En el resto de capas al no haberse considerado empleo de áridos de RCD se consideró las características mínimas prescritas en la normativa de aplicación para cada una de ellas.

Respecto al diseño de las secciones equivalentes, se comprobó que las características plásticas de la zahorra mixta tipo II hacían inviable su contacto directo con las capas de aglomerado, debiéndose, por tanto, de ejecutar siempre bajo una capa de ZARM I o ZARHor.

Teniendo en cuenta esta limitación, las secciones consideradas a falta de su dimensionamiento a nivel de espesores fueron las recogidas en la Figura 4.



MB: Mezcla bituminosa; ZARHor: Zahorra artificial reciclada de hormigón; ZARM I y ZARM II: Zahorra artificial reciclada mixta Tipo I y Tipo II de RCD; SCR: Suelocemento reciclado de RCD; HCR: Hormigón seco compacto reciclado de RCD.

**Figura 4.** Tipos de secciones estructurales consideradas en el Catálogo de Firmes con áridos reciclados de RCD.



## 4. Criterios de diseño

### 4.1. Concepto de fallo, ley de fatiga y cálculo de solicitaciones de tráfico

Para el caso del diseño de pavimentos es necesario considerar los parámetros críticos de diseño que permitirán la validación o, en su caso, la necesidad de un rediseño de una sección de firme. Las normativas actuales, como la *Instrucción de Carreteras 6.1-IC* del Ministerio de Fomento o la *Instrucción para el Diseño de Firmes de la red de carreteras de Andalucía (ICAFIR)*, presentan junto con los posibles materiales a utilizar en las secciones de firme una serie de especificaciones complementarias de los mismos entre los que se encuentran las llamadas leyes de fatiga del material.

El fenómeno de la fatiga se puede describir como aquel que se manifiesta en una pérdida de resistencia de los materiales cuando son sometidos a cargas cíclicas con variación en el tiempo. Esta pérdida de resistencia se va a manifestar a largo plazo en un agotamiento de la capacidad resistente del material y en la aparición de fisuras y grietas que darán lugar al fallo de este material. Se trata pues de un fenómeno de importancia extrema en el dimensionamiento de pavimentos, en los que la aparición de la grieta va a significar el agotamiento del firme y la necesidad de su sustitución.

En este sentido es necesario realizar una clasificación entre los diferentes tipos o criterios de fallo a fatiga considerados y los puntos de evaluación de cada uno de ellos. De esta forma, se puede distinguir por un lado el fallo a fatiga del cimiento del firme y por otro lado el fallo de las capas de la estructura del firme. Ambas tipologías de fallo son independientes, deben de ser evaluadas de forma paralela y la validación final de la sección dependerá de la verificación de ambos criterios.

### 4.2. Leyes de fatiga y cálculo de solicitaciones de tráfico

Para el dimensionamiento y validación de las secciones constructivas del catálogo de firmes y unidades de obra con áridos reciclados de RCD se utilizaron las leyes de fatiga contempladas por las normativas ya citadas. Estas leyes son expresiones matemáticas en las que se relaciona el número admisible de aplicaciones de carga ( $N$ ) hasta el fallo a fatiga, con el valor en un punto concreto del estado tensional o deformacional del material que se esté estudiando debido a la aplicación de un solo ciclo de carga.

En el caso de la explanada o cimiento del firme el parámetro crítico que determina el fallo es la deformación vertical unitaria,  $\mathcal{E}_c$ , en la superficie superior de la capa. La expresión usada para el Catálogo de firmes y unidades de obra con áridos de RCD fue la presentada en ICAFIR:

$$\mathcal{E}_c = 2,16 \cdot 10^{-2} \cdot N^{-0,28}$$

Para el caso del resto de capas que estructuran el firme, el análisis del fallo viene dado en función de la naturaleza del material. En el caso de materiales tratados con cemento el parámetro crítico es la máxima tensión de tracción en la superficie inferior de la capa  $\sigma_r$ .

En cambio para el caso de las mezclas bituminosas el parámetro crítico será la máxima deformación de tracción evaluada en la cara inferior de la capa  $\mathcal{E}_r$ .

La ley de fatiga considerada en los cálculos del catálogo para el caso de todas las mezclas bituminosas fue de nuevo la recomendada por ICAFIR:

$$\mathcal{E}_r = 6,920 \cdot 10^{-3} \cdot N^{0,27243}$$

Al contrario del caso de las mezclas bituminosas, en los materiales tratados con cemento la expresión de la ley de fatiga considerada cambia en función del tipo de material, usándose para la realización del catálogo las expresiones incluidas en la Tabla 5.

Material	Ley de fatiga
Suelocemento SC-3	$\sigma_r$ (MPa)=0,43.(1-0,065.logN)
Suelocemento SC-4	$\sigma_r$ (MPa)=0,72.(1-0,065.logN)
Gravacemento	$\sigma_r$ (MPa)=1,03.(1-0,065.logN)

Tabla 5. Leyes de fatiga consideradas para la evaluación de las capas tratadas con cemento.

### 4.3. Cálculo de solicitaciones de tráfico

Estrechamente ligado al fenómeno de la fatiga se encuentra el cálculo de las solicitaciones de tráfico. Como se menciona previamente, la fatiga de un material aparece tras una serie de ciclos de carga los cuales, para el caso de los firmes de carreteras, equivaldrían al número de vehículos que discurren por una vía durante toda su vida útil. En el dimensionamiento de los mismos y para la aplicación de las leyes de fatiga correspondientes a cada material es necesario establecer el tráfico de proyecto para el que se calcula la sección de firme considerada.

La expresión empleada para el diseño de las secciones del catálogo de cara a evaluar el cálculo del tráfico de proyecto fue la recomendada por ICAFIR:

$$TP = IMD_{PA} \cdot CE \cdot 365 \cdot F \cdot Y_r$$

Donde:

- $IMD_{PA}$  es la intensidad media diaria de vehículos pesados en el carril de proyecto,
- $CE$  es el coeficiente de equivalencia de los vehículos pesados en número de aplicaciones del eje equivalente de 13 t,
- $F$  es el factor de crecimiento del tráfico de vehículos pesados, y
- $Y_r$  es el coeficiente de seguridad por mayoración de cargas.

Respecto a la determinación de las categorías de tráfico establecidas, éstas se basaron en la Instrucción de Carreteras 6.1-IC y en ICAFIR.



Árido reciclado equivalente	Modelo de comportamiento utilizado	Módulo de elasticidad (MPa)	Coefficiente de Poisson
ZARHor	Elástico lineal	500	0,35
ZARM I	Elástico lineal	180 - 400	0,35
ZARM II	Elástico lineal	180 - 300	0,35
SCR	Elástico lineal	8.000	0,25
HCR	Elástico lineal	13.000	0,25

**Tabla 6.** Parámetros y modelo de comportamiento utilizados en el modelo de elementos finitos.

## 5. Implementación computacional

El primer paso en la implementación computacional del modelo fue la definición de los diferentes materiales utilizados en el diseño de las secciones de firme reciclado del catálogo. En este sentido fue necesario considerar un modelo de comportamiento y los parámetros descriptivos de dicho modelo. Siguiendo las consideraciones de algunas normativas como ICAFIR, se optó por un modelo elástico lineal en el que los materiales quedaran definidos por su módulo elástico y su coeficiente de Poisson.

De cara a la definición de los parámetros en los materiales reciclados se utilizaron los valores del módulo de deformación y del coeficiente de Poisson obtenidos durante la fase de caracterización en laboratorio y que quedaron recogidos en la Tabla 4.

Complementariamente se tuvo en cuenta el criterio de limitación de módulos elásticos en función de la capa subyacente que presentan algunas de las metodologías y normativas de diseño de firmes. Concretamente se usó el criterio presentado en ICAFIR por el cual de cara a la asignación de módulos elásticos en capas granulares se debe de tener en cuenta el módulo de la capa subyacente a través del uso de un coeficiente de paso, de forma que se cumpla la siguiente relación:

$$E_i = c_i \cdot E_{i-1}$$

Donde:

- $E_i$  es el módulo del material en la tongada  $i$ .
- $E_{i-1}$  es el módulo del material en la tongada  $i-1$ .
- $c_i$  es el coeficiente de paso que se toma de acuerdo a los criterios de ICAFIR.

Una vez considerado este criterio y a partir de los ensayos de caracterización de los materiales reciclados realizado en la primera fase del estudio, los valores empleados en las distintas secciones diseñadas con firme reciclado fueron los que se pueden comprobar en la Tabla 6.

Para el resto de materiales como es el caso de las mezclas bituminosas o el suelocemento se utilizaron los valores calibrados que presenta la Instrucción de firmes de Andalucía.

Finalmente en la definición de la explanada, y siguiendo el mismo criterio utilizado durante todo el procedimiento de cálculo, se tomaron los valores que por defecto ICAFIR ofrece para la explanada, categorizando las mismas en tres categorías, baja, media y alta, con un módulo elástico de 60, 100 y 160 MPa respectivamente y un valor del coeficiente de Poisson de 0,35.

Una vez obtenido el procedimiento de cálculo se procedió a la comprobación de la sección de firme considerada desde el punto de vista estructural. Para ello se siguieron los criterios de comprobación que se presentan tanto en la Instrucción de Firmes del Ministerio de Fomento como en la Instrucción de firmes de Andalucía y que están estrechamente ligados a las leyes de fatiga como se comentó en puntos anteriores.

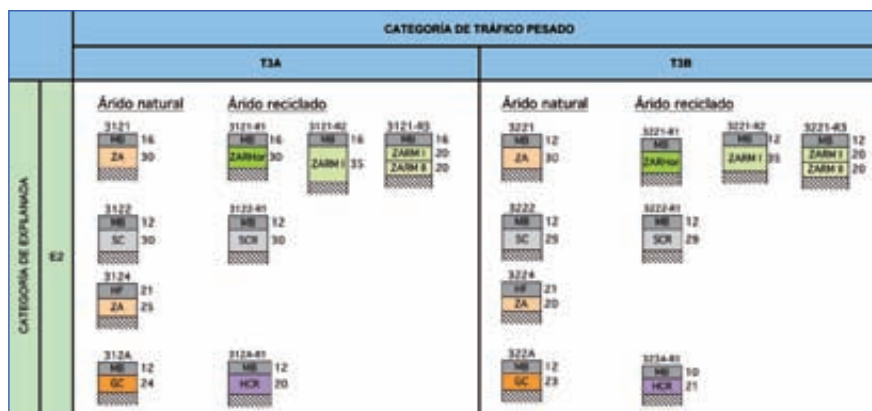
Estos criterios exigen la comprobación del valor máximo de la deformación vertical unitaria del cimientofirme o explanada y de la deformación radial unitaria en la capa base de mezcla bituminosa para ser incluidos en sus leyes de fatiga correspondientes y así evaluar el número máximo de ciclos de carga o número de ejes equivalentes en los que se producirá el fallo por fatiga.

La comparación de dichos valores con los procedentes del cálculo de tráfico de proyecto permite establecer la validez o no de la sección considerada, y los espesores propuestos en las distintas secciones.

Un ejemplo de opciones de sección de firme de carreteras con áridos de RCD se representa en la Figura 5.

## Firmes de caminos rurales

El volumen de tráfico en este tipo de vías es muy reducido y va a depender sobre todo de la superficie y número de explotaciones a



MB: Mezcla bituminosa; ZA: Zahorra artificial; SC: Suelocemento; HM: Hormigón magro; GC: Gravacemento; HF: Hormigón de firme; ZARHor: Zahorra artificial reciclada de hormigón; ZARM I: Zahorra artificial reciclada mixta Tipo I de RCD; ZARM II: Zahorra artificial reciclada mixta Tipo II de RCD; HCR: Hormigón seco compactado reciclado de RCD; SCR: Suelocemento reciclado de RCD.

**Figura 5.** Secciones de firme para categoría de tráfico pesado T3A y T3B y explanada E2, con materiales naturales y sus equivalentes con reciclados.

las que da servicio, y al tipo de agricultura de la zona (extensiva o intensiva). Los aforos realizados dan valores siempre inferiores a 25 vehículos pesados/día, integrándose dentro de la categoría de tráfico pesado T42 de la *Instrucción 6.1 IC Secciones de Firme*.

		CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO									
		T421			T422			T423			
CATEGORÍA DE EXPLANADA	E1	42111 ZA 25 ZN 20	42112 ZARHor 25 ZARM I 20	42114 ZARM II 30	42211 ZA 20 ZN 20	42213 ZARHor 20 ZARM I 20	42214 ZARHor 20 ZARM II 25	42215 ZARM I 25 ZARM II 25	42311 ZA 20 ZN 15	42313 ZARHor 20 ZARM I 15	42314 ZARM II 25 ZARM I 20
	E2	42121 ZA 25 ZN 15	42123 ZARHor 25 ZARM I 15	42124 ZARM II 25	42221 ZA 25	42223 ZARHor 25	42224 ZARM I 20 ZARM II 20	42321 ZA 25	42322 ZA 15 ZN 15	42323 ZARHor 25	42324 ZARM I 20
	E3	42131 ZA 25	42132 ZARHor 25	42133 ZARM I 30	42231 ZA 20	42232 ZARHor 20	42233 ZARM I 25	42331 ZA 20	42332 ZARHor 20	42333 ZARM I 25	

ZA: Zahorra artificial; ZN: Zahorra Natural; ZARHor: Zahorra artificial reciclada de hormigón; ZARM I: Zahorra artificial reciclada mixta Tipo I de RCD; ZARM II: Zahorra artificial reciclada mixta Tipo II de RCD.

Figura 6. Secciones de firme para caminos rurales.

Las secciones tipo del catálogo para estas vías se han diseñado teniendo en cuenta las recomendaciones recogidas en el *Manual de Aspectos Constructivos de Caminos Naturales* del Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente, así como la experiencia en la construcción de este tipo de viarios.

Dicho manual ofrece una tabla con el espesor de las distintas capas de los diferentes materiales de aportación a emplear en la ejecución de estos caminos en función de la categoría de explanada y del tipo de camino. Asimismo mediante el ábaco de Peltier se ha determinado el espesor total de firme necesario para el tráfico esperado.

A la hora de introducir el material reciclado de RCD en las secciones tipo, se ha incrementado el espesor de la capa en cuestión en 5 cm cuando las propiedades resistentes resultaron inferiores a las de los áridos naturales. Las secciones resultantes se han validado mediante un modelo elástico multicapa con el que se han obtenido deformaciones y esfuerzos en las distintas capas de la sección. Aplicando los mismos criterios de fallo usados en el cálculo de firmes de carreteras, se ha comprobado la validez de estas secciones equivalentes.

En la Figura 6 se muestran a título de ejemplo secciones de firme habituales para caminos rurales.

que vendrá dado por los materiales disponibles; y para el caso de este catálogo, para los materiales procedentes de RCD.

De acuerdo con las *Recomendaciones de diseño para vías ciclistas* se establecen dos tipos de explanadas:

- Explanada E-1, baja, con un módulo elástico equivalente  $E$  mayor de 45 MPa.
- Explanada E-2, media, con un módulo elástico equivalente  $E$  mayor de 75 MPa.

Aunque las cargas transmitidas por la bicicleta son prácticamente despreciables, es importante dotar de capacidad de soporte al cimiento del firme para garantizar la durabilidad de estas estructuras.

Los firmes de vías ciclistas se agrupan en el catálogo, siguiendo las *Recomendaciones de diseño para vías ciclistas* y según la rigidez de su estructura, en:

- flexibles, compuestos por capas granulares y mezclas bituminosas;

### Firmes de vías ciclistas

Las soluciones del catálogo de unidades de obra para vías ciclistas están fundamentadas en las *Recomendaciones de diseño para vías ciclistas* de la Consejería de Fomento y Vivienda de la Junta de Andalucía.

En este caso la definición del tipo de tráfico pesado se elimina. Así, la estructura de una vía ciclista se configura en función de la tipología de pavimento que se proponga emplear y el tipo de explanada conseguido,

		ESQUEMA DE FIRMES PROPUESTOS							
		FLEXIBLES			SEMIRRIGIDOS			RIGIDOS	
		FL-1	FL-2	FL-3	SR-1	SR-2	SR-3	R-1	R-2
CATEGORÍA DE EXPLANADA	E1, BAJA	MB 5 ZA 30	TS ZA 30	ZA 30	MB 5 SC 25	TS SC 25	SC 25	HF 14 ZA 20	BA 10 HF 10 ZA 20
	E2, MEDIA	MB 5 ZARHor/ZARM I 30	TS ZARHor/ZARM I 30	ZARHor/ZARM I 30	MB 5 SCR 25	TS SCR 25	SCR 25	HF 14 ZARHor/ZARM I 20	BA 10 HF 10 ZARHor/ZARM I 20
		MB 5 ZA 20	TS ZA 20	ZA 20	MB 5 SC 20	TS SC 20	SC 20	HF 10 ZA 15	BA 6 HF 6 ZA 15
		MB 5 ZARHor/ZARM I 20	TS ZARHor/ZARM I 20	ZARHor/ZARM I 20	MB 5 SCR 20	TS SCR 20	SCR 20	HF 10 ZARHor/ZARM I 15	BA 6 HF 6 ZARHor/ZARM I 15
								HF 14	BA 6 HF 6 SCR 10

MB: Mezcla bituminosa; ZA: Zahorra artificial; SC: Suelocemento; HM: Hormigón magro; GC: Gravacemento; HF: Hormigón de firme; ZARHor: Zahorra artificial reciclada de hormigón; ZARM I: Zahorra artificial reciclada mixta Tipo I de RCD; ZARM II: Zahorra artificial reciclada mixta Tipo II de RCD; HCR: Hormigón seco compactado reciclado de RCD; SCR: Suelocemento reciclado de RCD; TS: tratamiento superficial; BA: baldosa/adoquín

Figura 7. Secciones de firme propuestas para vía ciclista.

		TIPO DE TRÁFICO								
		PEATONAL RESTRINGIDO			USO COMBINADO (PEATONAL+TRÁFICO LIGERO)					
CAPA SUPERIOR		ADOQUIN ARENA	ADOQUIN MORTERO	BALDOSA MORTERO	ADOQUIN MORTERO	BALDOSA MORTERO	ADOQUIN ARENA	ADOQUIN MORTERO	BALDOSA MORTERO	
CAPAS INFERIORES SOBRE EXPLANADA BAJA E <sub>v2</sub> > 45 MPa	Firme Rígido		Firme Semirígido		Firme Flexible		Firme Rígido		Firme Semirígido	
	HMR 10 HCR 10	HMR 10 ZARHor 15	HCR 15	ZARM I 25	HF 15 HCR 15	HF 15 ZARHor 20	HCR 25	HF 15 SCR 25	HF 15 ZARM I 25	HCR 25
	HMR 10 SCR 20	HMR 10 ZARM I 15	SCR 25	ZARHor 25						

SCR: Suelocemento reciclado de RCD; HMR: Hormigón magro reciclado; HF: Hormigón de firme; ZARHor: Zahorra artificial reciclada de hormigón; ZARM I: Zahorra artificial reciclada mixta Tipo I de RCD; HCR: Hormigón seco compactado reciclado de RCD.

Figura 8. Secciones tipo en vías peatonales.

- rígidos, compuestos de hormigón, baldosas o adoquines; y
- semirígidos, donde combinan parcialmente las características (suelocemento y productos bituminosos).

Un ejemplo de posibles secciones tipo a elegir para firmes de vías ciclistas se incluye en la Figura 7.

### Acerados y vías peatonales

En este apartado del catálogo se incluyen recomendaciones para la pavimentación de vías urbanas usando material de RCD en algunas de sus capas. En este caso tiene importancia primordial la funcionalidad y morfología del pavimento, más que sus características resistentes, así como tener en cuenta su mantenibilidad y la facilidad requerida para realizar reparaciones ocasionales de los servicios subterráneos.

esta guía se contempla el uso del árido reciclado únicamente en las capas inferiores o estructurales, las que pueden combinarse con los habituales adoquines o baldosas en las capas superiores.

En la Figura 8 se presenta un ejemplo de secciones tipo para este tipo de vías.

### Rellenos drenantes y zanjas urbanas

El uso de áridos de RCD en rellenos drenantes se supedita al cumplimiento de las prescripciones del PG-3 en su artículo 421 para los materiales que van a servir de drenaje en rellenos localizados.

Para el relleno de zanjas urbanas los materiales deben ser conformes con las normas nacionales, las ordenanzas municipales o los procedimientos de instalación elaborados por el fabricante de la conducción a enterrar.

		SECCIONES TIPO DE ZANJAS EN ÁMBITO URBANO																						
		TUBERÍAS FLEXIBLES				TUBERÍAS RÍGIDAS																		
ZONA DE ZANJA	BAJO ZONA PEATONAL	SCR	ZARHor	ZARM I	ZARM II	HCR	SR-SEL	SR-TOL																
	BAJO CALZADA	SCR	ZARHor	ZARM I	ZARM II	HMR	HMR	HCR																
		<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>POLÍMEROS</th> <th>FUNDICIÓN</th> <th>HORMIGÓN</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>RELLENO ZANJA</td> <td>ZARHor ZARM I ZARM II HMR HCR</td> <td>ZARHor ZARM I ZARM II HMR HCR</td> <td>ZARHor ZARM I ZARM II HMR HCR</td> </tr> <tr> <td>RELLENO TUBO</td> <td>ZARHor ZARM I ZARM II HMR HCR</td> <td>ZARHor ZARM I ZARM II HMR HCR</td> <td>ZARHor ZARM I ZARM II HMR HCR</td> </tr> <tr> <td>LECHO TUBO</td> <td>HMR HCR</td> <td>ZARHor ZARM I ZARM II HMR HCR</td> <td>ZARHor ZARM I ZARM II HMR HCR</td> </tr> </tbody> </table>								POLÍMEROS	FUNDICIÓN	HORMIGÓN	RELLENO ZANJA	ZARHor ZARM I ZARM II HMR HCR	ZARHor ZARM I ZARM II HMR HCR	ZARHor ZARM I ZARM II HMR HCR	RELLENO TUBO	ZARHor ZARM I ZARM II HMR HCR	ZARHor ZARM I ZARM II HMR HCR	ZARHor ZARM I ZARM II HMR HCR	LECHO TUBO	HMR HCR	ZARHor ZARM I ZARM II HMR HCR	ZARHor ZARM I ZARM II HMR HCR
	POLÍMEROS	FUNDICIÓN	HORMIGÓN																					
RELLENO ZANJA	ZARHor ZARM I ZARM II HMR HCR	ZARHor ZARM I ZARM II HMR HCR	ZARHor ZARM I ZARM II HMR HCR																					
RELLENO TUBO	ZARHor ZARM I ZARM II HMR HCR	ZARHor ZARM I ZARM II HMR HCR	ZARHor ZARM I ZARM II HMR HCR																					
LECHO TUBO	HMR HCR	ZARHor ZARM I ZARM II HMR HCR	ZARHor ZARM I ZARM II HMR HCR																					

MB: Mezcla bituminosa; ZA: Zahorra artificial; SC: Suelocemento; HM: Hormigón magro; GC: Gravacemento; HF: Hormigón de firme; ZARHor: Zahorra artificial reciclada de hormigón; ZARM I: Zahorra artificial reciclada mixta Tipo I de RCD; ZARM II: Zahorra artificial reciclada mixta Tipo II de RCD; HCR: Hormigón seco compactado reciclado de RCD; SCR: Suelocemento reciclado de RCD; AR: arena; SR-SEL: Suelo seleccionado reciclado de RCD; SR-TOL: Suelo tolerable reciclado de RCD; HMR: hormigón magro reciclado de RCD.

Figura 9. Sección tipo de zanjas en ámbito urbano.

En este caso particular existe la ventaja de que los áridos de RCD son originados principalmente en núcleos urbanos y gestionados en sus proximidades, por lo que sus posibilidades de uso deben ser muy altas.

En las diferentes normativas autonómicas se definen secciones tipo en vías peatonales. En

En el catálogo, con objeto de ser lo más general posible, se han aplicado las hipótesis y criterios de proyecto definidos en la norma UNE-EN 1610.

Un ejemplo de secciones tipo de zanjas en ámbito urbano es el de la Figura 9.

## Conclusiones

Los áridos de RCD no son áridos naturales y presentan diferencias en sus características físicas, químicas y mecánicas, lo que no debe suponer un inconveniente siempre y cuando la unidad de obra en la que se utilicen presente las mismas características funcionales y estructurales que la diseñada con áridos naturales.

Para esto es necesario garantizar la calidad y homogeneidad de los áridos reciclados, para lo que en Andalucía, AOPJA (Agencia de Obra Pública de la Junta de Andalucía) y AGRECA (Asociación de empresas gestoras de valorización de residuos de construcción y demolición de Andalucía) han promovido un distintivo de calidad voluntario que es la *certificación AGRECA*, además de la exigencia del marcado CE para los materiales sometidos a él (zahorras, árido para gravacemento, etc.).

Como indica el PEMAR 2016-2022:

*“La consolidación de las actividades de reciclado requiere el desarrollo de medidas que faciliten la reincorporación de los productos reciclados al mercado, tales como instrumentos técnicos para mejorar la recogida y los procesos de reciclado que aseguren una mejor calidad de los productos reciclados e instrumentos normativos que eliminen trabas a estos productos”.*

En este sentido la AOPJA ha apostado por avanzar en la elaboración de normativas/recomendaciones técnicas que supongan una contribución efectiva a la promoción y utilización de los áridos reciclados en las obras de construcción. Así, este catálogo de firmes y unidades de obra con áridos reciclados de residuos de construcción y demolición se pretende que constituya una herramienta de utilidad para sus proyectos, al contemplar cinco ámbitos distintos de aplicación, diez fichas modelo con características exigibles a los materiales reciclados de RCD, y nuevas secciones constructivas con estos materiales tanto para explanadas como para firmes.

Este catálogo se encuentra disponible en [www.aopandalucia.es](http://www.aopandalucia.es).

## Agradecimientos

Los autores agradecen a FEDER-Unión Europea el apoyo financiero recibido a través del Proyecto *Aplicaciones de los áridos reciclados*

*de residuos de construcción y demolición (RCD) para la construcción sostenible de infraestructuras viarias en Andalucía Central* del Programa Operativo FEDER de Andalucía 2007-2013.

## Bibliografía

- I. Agencia de Obra Pública de la Junta de Andalucía - Universidad de Córdoba. “Catálogo de firmes y unidades de obra con áridos reciclados de residuos de construcción y demolición”. Córdoba, 2016.
- II. Agencia de Obra Pública de la Junta de Andalucía. “Recomendaciones para la redacción de Pliegos de especificaciones técnicas para el uso de materiales reciclados de residuos de construcción y demolición (RCD)”. Sevilla, 2017.
- III. Consejería de Obras Públicas y Transportes de la Junta de Andalucía. “Instrucción para el Diseño de Firmes de la Red de Carreteras de Andalucía (ICAFIR)”. Sevilla, 2007.
- IV. Ministerio de Fomento. Orden FOM/3460/2033. “Norma 6.1 IC Secciones de Firme de la Instrucción de Carreteras”. Madrid, 2003.
- V. Ministerio de Fomento. “Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes, PG-3”, 2015.
- VI. J. Solís-Guzmán, M. Marrero, D. Guisado. “Modelo de cuantificación y presupuestación en la gestión de residuos de construcción y demolición. Aplicación a viales”. Revista Carreteras n.º 195, 2014.
- VII. Ansys Inc., “Theory Reference for the Mechanical APDL and Mechanical Applications”. Canonsburg, PA (USA), 2009.
- VIII. Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente. “Manual de Aspectos Constructivos de Caminos Naturales”.
- IX. M. Salas, P. Cembreros, N. Redondo. “Empleo de áridos reciclados RCD’s. Normativa técnica andaluza y certificación de materiales”. Revista Carreteras, N.º 187, 2013 .
- X. Ángel Sampedro. “Empleo de residuos en carreteras. Panorámica actual”. Revista Carreteras n.º 187, 2013.
- XI. Consejería de Fomento y Vivienda de la Junta de Andalucía. “Recomendaciones de diseño para vías ciclistas”.
- XII. CEMOSA, “Software de dimensionamiento de pavimentos bituminosos REPARA Firmes. Manual de uso”. Proyecto REPARA 2.0, 2017. ■