

Comparación entre las propiedades de los RCDs y las de los suelos seleccionados

A comparison between the properties of CDW and selected aggregates

J.L. Justo^{1*}, P. Durand¹, J.D. Bauzá¹, L. Luque², M. Vázquez¹, V. Garrido², E. Ruiz² y E. Justo¹

Palabras clave

RCD;
ensayos de carga;
ensayos dinámicos
de carga;

Sumario

Este artículo presenta la investigación realizada sobre el uso de RCDs reciclados en zanjas para el abastecimiento de agua y alcantarillado, pero sus conclusiones se pueden extender al uso de RCDs en general. Diversas pruebas han sido realizadas en agregados y arenas de RCD, que se han comparado con pruebas análogas en áridos y arenas naturales. Las propiedades mecánicas de los RCDs ofrecen ventajas con respecto a las propiedades mecánicas de los agregados naturales y arenas. Sin embargo, el contenido de sulfatos solubles en agua puede ser demasiado grande en algunas regiones de España. Como han señalado por otros autores, los resultados de esta investigación muestran que el efecto combinado de hormigón y materiales cerámicos induce reacciones puzolánicas que aumentan la rigidez de los áridos reciclados mixtos. Pruebas de placa de carga estáticas y dinámicas permiten comprobar de estas conclusiones.

Keywords

CDW;
plate loading tests;
dynamic plate loading tests;

Abstract

This paper presents the research carried out on the use of recycled CDW in ditches for water supply and sewerage, but their conclusions may be extended to the use of CDW in general. Extensive tests have been performed in recycled CDW, natural aggregates and sands and compared. The mechanical properties of CDW offer advantages with respect to the mechanical properties of natural aggregates and sands. However, the content of water soluble sulphates may be too large in some regions of Spain. As stated by other authors, the results of this research show that the combined effect of concrete and ceramic materials induces pozzolanic reactions that increase the stiffness of the mixed recycled aggregates. Static and dynamic plate loading tests allow checking of these conclusions.

1. INTRODUCCIÓN

La Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo sobre los residuos establece que el primer objetivo de cualquier política de residuos debe ser reducir al mínimo los efectos negativos de la generación y gestión de residuos para la salud humana y el medio ambiente. El Consejo confirmó que la prevención de residuos debería constituir la primera prioridad de la gestión de residuos, y que la reutilización y el reciclaje de materiales es preferible a la recuperación energética de residuos, en la medida en que son las mejores opciones ecológicas.

La política de residuos debe tener también por objeto establecer principios fundamentales, como la obligación de manipular los residuos de manera que no tengan un impacto negativo en el medio ambiente o la salud humana, el principio de que quien contamina paga, y el requisito de que los costes de la eliminación de los residuos recaigan sobre el poseedor de dichos residuos, el anterior poseedor, o los propietarios del producto generador de los residuos. El

artículo 11 declara que en 2020, la preparación para la reutilización, el reciclado y otra valorización de materiales, incluidas las operaciones que utilizan residuos para sustituir otros materiales, de los residuos de construcción y demolición no peligrosos se aumentará hasta un mínimo del 70% en peso del relleno.

Como resultado de las políticas ambientales, en España cada día es más difícil encontrar tierras para la eliminación de demoliciones, y graveras y canteras para áridos. Como resultado, la reutilización de los residuos de construcción y demolición (RCD) se está convirtiendo en una necesidad apremiante. Estos materiales están compuestos principalmente de compuestos inertes, sino que también contienen materiales peligrosos como los metales y componentes químicos que pueden contaminar el medio ambiente. Por estas razones se necesita urgentemente investigación sobre la aplicabilidad y efecto de los materiales de RCD. Con el fin de evaluar el uso de los áridos y arenas de RCDs en el relleno de zanjas para abastecimiento de agua y alcantarillado, se formó una empresa conjunta entre la Universidad de Sevilla, la empresa de suministro de agua (EMASESA), una empresa geotécnica (VORSEVI), una empresa de construcción y una planta de RCDs en Sevilla. El reciclado de RCDs de esta planta se comparó con materiales de cantera seleccionados. Se llevaron a cabo extensos ensayos de laboratorio y ensayos estáticos y dinámicos de placa de

* Corresponding author: jjj@us.es

¹ Departamento de Estructuras de Edificación e Ingeniería del Terreno, Universidad de Sevilla, Sevilla, España.

² EMASESA, Escuelas Pías, Sevilla, España.

carga. El resultado de esta investigación, expuesta a continuación, es aplicable, no sólo a zanjas, sino, en general, a la utilización de materiales reciclados de RCD y a su comparación con material de cantera seleccionado.

2. TRAMOS DE ENSAYO

Se han dispuesto diversos tramos de ensayo en diversos emplazamientos de la provincia de Sevilla: La Motilla (Dos Hermanas), calle Arrayán, La Rinconada, calles Silos y Zacatín (Alcalá de Guadaíra), así como una prueba piloto en Málaga.

3. COMPOSICIÓN DE LOS RCDs

3.1. Zahorras de RCD

La tabla 1 muestra la composición de las zahorras de RCD de la planta de Aristerra. En la última fila se indican, además los últimos datos de la normativa establecida, que servirán para comprobar, posteriormente, en las distintas obras si cumplen o no dicha normativa.

Los siguientes resultados de ensayos se incluyen en la tabla 1:

1. Análisis granulométrico
2. Ensayo de Proctor Modificado
3. Ensayos de CBR al 100% del Proctor Modificado
4. I_c = Índice de colapso (NLT-254/99)
5. Sulfatos solubles en agua, expresados en SO_4 (UNE-EN 1744/1), contenido de yeso (NLT-115/99) y contenido de sales solubles (NLT-114/99)
6. Componentes de agregados gruesos reciclados (UNE-EN 933-11):
 - Hormigón, productos de hormigón, morteros. Unidades de albañilería de hormigón (Rc)
 - Áridos no tratados, piedra natural. Áridos tratados con conglomerantes hidráulicos (Ru)
 - Unidades de albañilería de arcillas, silicato de cálcico. Hormigón aireado no flotante (Rb)
 - Materiales bituminosos (Ra)
 - Vidrio (R_g)
 - Otros: Cohesivos; Varios: metales, madera no flotante, plástico y caucho; yeso (X)
 - El material flotante en volumen (no indicado en la Tabla) varió entre 0 y 2,7% (valor medio 1.1%)
 - Contenido de materia orgánica (UNE 103-204 +erratum)
 - I_L = Índice de Lajas (UNE-EN 933-3+A1)

La tabla 2 compara las medias de las zahorras de RCD correspondientes a la planta de Aristerra, las que figuran en los artículos de Vega et al. (2011), procedentes de tres plantas del País Vasco y las de Barbudo et al. (2012) de plantas andaluzas. En este último caso se han excluido los RCDs de diseño en los que se trataba de encontrar una composición determinada.

Las composiciones medias no varían excesivamente, pero en las plantas andaluzas de Barbudo et al. (2012), el contenido de material cerámico es más abundante a costa de los contenidos de hormigón y de material bituminoso.

Los RCDs de Aristerra tienen más finos que los de Vegas et al. (2011), una granulometría más extendida antes de la compactación, mayor densidad máxima y CBR y menor contenido de materia orgánica e índice de lajas. Pero la diferencia principal entre los RCDs del País Vasco y los andaluces está en el contenido de sulfatos solubles en agua, muy superior en los andaluces.

Hay que tener en cuenta que la componente media de yeso en los RCDs de Vega et al. (2011), expresados en SO_4 , es del 0,4%, mientras que en los de Barbudo et al. (2012) es del 0,8%. En los ensayos de los RCDs de Aristerra, no se ha contado por separado la componente de yeso.

Los tres ensayos relativos a los sulfatos están claramente relacionados entre sí (figuras 1 y 2), como ya indican también Vegas et al. (2011).

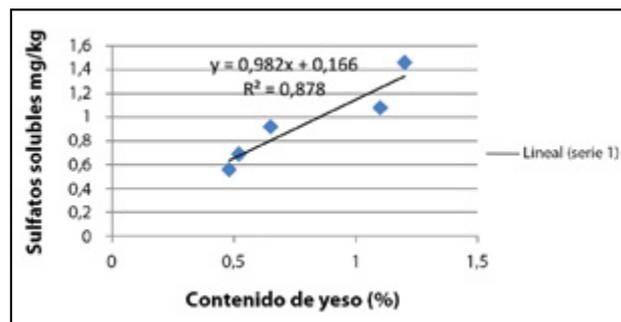


Figura 1. Regresión del contenido de sulfatos solubles en función del contenido de yeso en los RCDs de Aristerra.

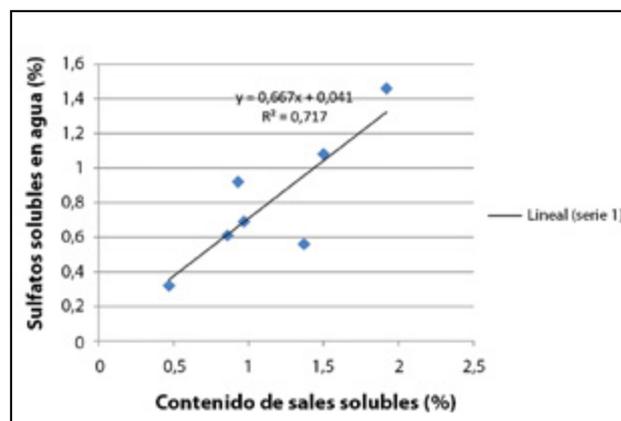


Figura 2. Regresión del contenido de sulfatos solubles en función del contenido de sales solubles.

Se comprueba, en la tabla 1, que eliminando la fracción bituminosa de los RCDs de Aristerra se consigue una disminución importante, pero no decisiva del contenido de materia orgánica.

Vegas et al. (2011) recomiendan limitar el contenido de sulfatos solubles en agua al 0,48 %, para evitar daños a las cimentaciones de hormigón adyacentes. Por otro lado, Barbudo et al. (2012) estudian el efecto del contenido de sulfatos en la contaminación del suelo por lixiviación. Según la normativa de la Unión Europea sobre vertederos el límite estaría en 2000 mg/l de sulfatos lixiviados, lo que a su vez se corresponde con el 2,076 % de sulfatos solubles en agua.

Las zahorras de RCD aportadas por Aristerra sólo en un caso cumplen la especificación de Vegas et al. (2011) para sulfatos solubles en agua. Relacionado con ello, con frecuencia no cumplen tampoco las especificaciones relativas a sales solubles, y a veces la de contenido de yesos. Es excesivo, a veces, el contenido de contaminantes ($R_g + X + FL$) o el de materiales bituminosos (R_a); sin embargo dados los mayores

Tabla 2. Comparación entre los valores medios de tres trabajos distintos

Origen	Granulometría			Proctor modificado		CBR 100 % PM	I _c 95 % PM %	Sulfatos solubles en agua %	Yeso %	Sales solubles %	
	T0,08 %	D _{max} mm	USCS	C _u	w _o %						ρ _{max} Mg/m ³
Aristerra	9,1 15,0*	34,5 23*	GW-GM GM*	83,7 69*	9,8	2,08	118	0,20	0,93	0,87	1,11
Vegas et al. 2011	3,3 11,7*	40 20*	GW SW-SM*	23 113*	6,5	2,00	99	0,19	0,29	0,52	0,52
Barbudo et al. 2012									1,07		

Tabla 2. Comparación entre los valores medios de tres trabajos distintos (Continuación)

Origen	Componentes							MO %	Plasticidad	HL %	IL %
	R _c %	R _u %	R _b %	R _a %	R _g %	X %	FL %				
Aristerra	55,9	17,2	13,8	12,2	0,10	0,22	0,9	0,56 0,44+	no	0	10,2 6,0*
Vegas et al. 2011	57	16,4	19,3	6,2	0,2	0,62	0	0,79	no	0,15	17
Barbudo et al. 2012	42,3	18,9	35,7	2,2	0,0	1,8	0,0				

* Después del Proctor

+ Eliminando la fracción bituminosa

En la planta de Aristerra, los valores de la resistividad (BS 1377-3: 1990) oscilan entre 848 y 1900 Ωm, con un valor medio de 1325 Ωm.

valores de densidad máxima y CBR, no parece que esto tenga excesiva importancia.

Vegas et al. (2011) han realizado algunos ensayos en los que la totalidad del RCD estaba formado por compuestos de asfalto (R_a) o cerámicos (R_b) o de compuestos de hormigón (R_c). El correspondiente Índice CBR era muy superior en el RCD de compuestos de hormigón (197,5) seguido del de compuestos cerámicos (151,5) y fue muy inferior en el de compuestos asfálticos (12,4).

Por el contrario, las zahorras de Aristerra cumplen con creces los porcentajes de sulfatos solubles requeridos para evitar daños medioambientales de Barbudo et al. (2012).

En la obra de La Rinconada se ha encontrado el contenido de sulfatos solubles en agua en las distintas fracciones o tipos de residuos, con los resultados que se indican en la tabla 3. El mayor contenido de sulfatos está en la componente cerámica, en otros (que incluye trozos de yeso) y en la de componentes de hormigón. El menor contenido está en los áridos no tratados y en los componentes bituminosos.

Tabla 3. Contenidos de sulfatos en las distintas fracciones y tipos de residuos (La Rinconada)

Tipo de material	Sulfatos solubles en agua (%)		
	<4mm	4-16 mm	>16 mm
< 4mm	1,32		
R _c		0,61	0,63
R _b		1,03	1,06
R _a		0,21	
R _u		0,34	0,30
X		0,76	

Una explicación sobre el alto contenido en sulfatos solubles puede estar en el alto contenido de sulfatos solubles que tiene el propio hormigón. Como se demuestra con los datos parciales que se indican a continuación.

En un ensayo sobre los restos de una probeta de hormigón realizado por Elabora, el contenido de sulfatos ha sido de 6100 mg/kg, ataque medio según la EHE. Téngase en cuenta el elevado contenido de los componentes de hormigón dentro de los RCDs que exigen muchas normas.

La propia EHE prescribe que el contenido de sulfatos del cemento debe ser inferior al 4%.

En un hormigón en masa de densidad 2200 kg/m³ y con 250 kg de cemento por metro cúbico, con un contenido de sulfatos del 4%, el porcentaje de sulfatos en el hormigón sería de: $250 \cdot 4 / 2200 = 0,45\%$.

Si además tenemos en cuenta que a los áridos se les permite hasta un 0,8% de SO₃, equivalente a un 0,97% de SO₄, está claro que la proporción de sulfatos solubles en agua podría ser superior al 1,2 %.

3. 2. Arenas de RCD

La tabla 4 muestra la composición de las arenas de RCD de la planta de Aristerra.

Comparando con las zahorras vemos que las arenas tienen lógicamente mayor contenido de finos, menor coeficiente de uniformidad, humedad óptima algo superior, densidad máxima ligeramente inferior, menor índice CBR, menor índice de colapso y muy inferior contenido de sulfatos, yeso y sales solubles, aunque sólo en un caso se cumple el límite de Vegas et al. (2011). Aumenta el contenido de compuestos de hormigón, se anula el de compuestos cerámicos y disminuye fuertemente el de compuestos asfálticos, anulándose los contenidos de "otros" y de materiales flotantes.

4. ENSAYOS DE CARGA ESTÁTICOS Y DINÁMICOS

El ensayo de carga estático (NLT-357/98) es tal vez la prueba más adecuada para controlar la compactación de un suelo. Este ensayo es algo lento y costoso, por lo que se

Tabla 4. Arenas de RCD

Muestra	Granulometría			Proctor modificado			CBR 100 % PM	I_c 95% PM %	Sulfatos solubles en agua %	Yeso %	Sales solubles %
	T0,08 %	D_{max} mm	USCS	C_u	w_o %	ρ_{max} Mg/m ³					
Cemosa	21,1	12,5	SM						0,04		0,39
Vorsevi 16147/12	16,9	16	SM		12,8 SP	1870 SP					
La Motilla 4344	11,9	20	SW-SM	25,7	10	2090	104	0,09	0,54	0,41	0,61
Arrayán	21 24,8*	16 16*	SM SM*	6,0 32*	10,5	2030	76	0,07	0,91	0,68	1,25
La Rinconada	25,5 26,7*	16 16*	SM SM*	30,4 31*	11,5	2060	91,1	0,09	0,56 0,62*	0,43	0,55
Zacatín	15,4	16	SM	31,2	9,6	2110	112,3	0,20	0,75	0,60	2,44
Media 4 obras	18,5 27,6*	17 16*	SM SM*	23,3 32*	10,4MP	2070 MP	95,9	0,11	0,69	0,53	1,21
Media general	18,7 27,6*	16,1 16*	SM SM*	23,3 32*	10,4MP	2060 MP	95,9	0,08	0,53	0,51	0,70

Tabla 4. Arenas de RCD (Continuación)

Muestra	Componentes							MO %	Abs. %	ρ_a Mg/m ³	IL %
	R_c %	R_u %	R_b %	R_s %	R_g %	X %	FL %				
Cemosa					21,1			1,1			
Vorsevi 16147/12	79,8	20,2	0	0	16,9	0	0	0,58			
La Motilla 4344	80	14,6	5,5	0	11,9	0	0	0,25	8	2800	8
Arrayán	80	12,3	5,6	2,1	21 25*	0	0	0,21	8,3	2790	12 9*
La Rinconada	79,6	18,2	2,3	0	25,5 27*	0	0	0,04	7,8	2770	12
Zacatín	82,4	7,1	1,4	9,1	15,4	0	0	0,72	2,5	2620	
Media 4 obras	80,5	13,1	3,7	2,8	18,5 28*	0	0	0,31	6,8	2748	10,7 9*
Media general	80,4	14,5	3,0	2,2	18,7 28*	0	0	0,49	6,8	2748	10,7 9*

* Después del Proctor

Hinchariento libre nulo

NP

Resistividad entre 702 y 1170 Ω m, con un valor medio de 849 Ω m.

han realizado ensayos de carga dinámicos, que se han correlacionado con los estáticos.

5. RESUMEN DE LAS SEIS OBRAS

5.1. Introducción

Se han utilizado dos equipos de compactación: una bandeja vibrante Paclite TR 670 de 68 kg y un rodillo vibratorio BELLE BRW 650 de 675 kg.

Se pueden hacer los comentarios que se incluyen en los apartados que siguen.

5.2. Fondo de la excavación

En casi todos los casos la compactación ha sido deficiente, debido a la presencia de lluvias durante su ejecución.

La tabla 5 indica los grados de compactación conseguidos en las seis obras.

El ensayo de carga realizado en la prueba piloto cumple las especificaciones del PG3 para cimientos de suelos no seleccionados:

$$E_{v2} > 30 \text{ MPa}$$

$$E_{v2} / E_{v1} < 2,2$$

5.3. Material de relleno

5.3.1. Arena reciclada

Cumple todas las especificaciones, excepto las indicadas, en rojo en la tabla 6.

Las elevadas humedades han podido contribuir a las bajas densidades obtenidas

Tabla 5. Grado de compactación del fondo de la excavación en las seis obras

Obra	Compactador	Compactación	w %	Compactación media	E_{v1} MPa	E_{v2} MPa	E_{v2} / E_{v1}
Prueba piloto	Rodillo vibratorio	5 pasadas (ida y vuelta)	+9,45	94,6 % PM	19,5	35,2	1,8
		7 pasadas	+3,6	96,4 % PM			
Calle Arrayán	Placa vibrante		+13,5	73 % PM			
La Motilla	Placa vibrante		+7%	85% PN			
3 de abril	Placa vibrante		+6,7%	86% PN			
Zacatín	Placa vibrante		-0,4%	96% PM			
			0,9%	97% PM			
c/ Silos, Alcalá de Guadaíra	Rodillo vibratorio		+0,7%	92%PM			

E_{v1} = módulo de deformación en carga

E_{v2} = módulo de deformación en recarga

Tabla 6. Resultados en las arenas de RCD

Obra	Sulfatos solubles en agua %	Sales solubles %	Yeso %	CBR para 100% PM	w %	Compactación media
Calle Arrayán	0,91	1,25	0,68	76	+4%	71% PM
La Motilla	0,54	0,61	0,41	104	+8%	77,5% PM
3 de abril	0,62	0,55	0,43	91	+2,8%	87% PM
Zacatín	0,75	2,44	0,60	112	+2,4%	83% PM
Especificaciones	≤ 0,48	≤ 1	≤ 0,8			95% PM

Tabla 7. Incumplimiento en las especificaciones para zahorra reciclada

Obra	Sulfatos solubles en agua %	Sales solubles %	Yeso %	Contaminantes ($R_g + X + FL$) %	R_a %	I_c %	Índice de lajas* %	CBR para 100% PM
Prueba piloto	1,08	1,5		3,3	13,9	0,67	9/6	130,7
Calle Arrayán	1,46	1,9	1,2	2,1	20,9	0,1	12/9	93,7
La Motilla	0,69	0,97	0,52	0	3,9	0,05	8	152
3 de abril	0,92	0,93	0,65		10,7		12	130
Zacatín	0,56	1,37	0,48	0	12,7	0,184	13/16	146,4
Especificaciones	≤ 0,48	< 1	< 0,8	< 1	≤ 15	< 0,5	< 10	

* Antes y después del ensayo de Proctor Modificado

Tabla 8. Grado de compactación en zahorra reciclada

Obra	Compactador	w %	Compactación media
Calle Arrayán	Placa vibrante	Cerca de la óptima	89-96% PM
La Motilla	Placa vibrante	Ligeramente por encima	97
3 de abril	Placa vibrante	+2%	95
Zacatín	Placa vibrante	+1,9%	97
Media	Placa vibrante	Ligeramente por encima de la óptima	95%PM

5.3.2. Zahorra reciclada

La tabla 7 señala en rojo los incumplimientos en las especificaciones de las zahorras recicladas utilizadas en las cuatro obras.

Se ha compactado en capas de 20 cm.

La tabla 8 indica el grado de compactación conseguido en calle Arrayán, La Motilla, 3 de abril y Zacatín.

Vemos que, con excepción de la parte inferior del relleno de la calle Arrayán, en todos los demás casos la compactación es adecuada.

5.3.3. Arena tradicional

Se han hecho ensayos en La Motilla, Zacatín y Alcalá, que se resumen en la tabla 9.

Tabla 9. Arena tradicional

Muestra	Granulometría				Proctor modificado		CBR 100 % PM	I_c 95% PM %	Sales solubles %	MO %	Compactación isótopos		
	T0,08 %	D_{max} mm	USCS	C_u	w_o %	ρ_{max} kg/m ³					w_o %	ρ kg/m ³	c %
La Motilla	6,7	25	SW-SM	10,8	6,1	2010	35,5	0,151	0,29	0,38	10,5	2665	83
Zacatín	22,0	20	SM	28,8	11,2	1950	70,9	0,343	0,36	0,76	12,7	1664	86
Alcalá	21	20	SM	10,2	9,8	1980	10,1	0,085	0,29	0,13	8,0	1541	78
Media	16,6	22	SM	16,6	9,0	1980	38,8	0,193	0,31	0,42	10,4	1957	82

Tabla 10. Suelo seleccionado

Muestra	Compactador	Pasadas	Granulometría				Proctor modificado		CBR 100 % PM	I_c 95% PM %	Sales solubles %	MO %	Compactación isótopos		
			T0,08 %	D_{max} mm	USCS	C_u	w_o %	ρ_{max} kg/m ³					w_o %	ρ kg/m ³	c %
La Motilla recompactado			9,8	40	GP-GM	140	9,2	2010	98,4	0,16	0,30	0,13	10,6	1930	96
													8,1	1825	91
													9,7	1927	96
Prueba piloto	Rodillo	5											12,0	1889	96
		6	5,2	25	SP-SM	12	12,8	1970	39,3	0,08	0,15	0,08	10,0	1913	97
		4												12,1	1883
		5											11,7	1882	96
Zacatín	Placa		22,0	20	SM	28,8	11,2	1950	70,9	0,343	0,36	0,76	12,7	1664	86
Alcalá	Rodillo						7,3	2010	54,8	0,149			8,9	1968	98
													5,3	1883	94
Media			12,3	28,3	SM-SP	60,3	10,1	1985	65,9	0,183	0,27	0,32	10,1	1876	95

Tabla 11. Comparación según tipo de compactador en la zorra de RCDs. Valores medios de los ensayos de carga inmediatamente después de la Prueba piloto

Compactador	Compactación	w %	Compactación media	E_{v1} MPa	E_{v2} MPa	E_{v2} / E_{v1}	E_{vd}
Rodillo vibratorio	5 o más	+2%	95% PM	35,4	117,1	3,3	39
Placa vibrante	3 pasadas	<-2%	95% PM	60,9	166,9	2,7	49

E_{vd} = módulo de deformación dinámico

El tamaño máximo de las arenas naturales es más alto, el coeficiente de uniformidad más bajo, la densidad máxima menor, el CBR muy inferior, el índice de colapso más alto, el contenido en sales solubles muy inferior.

Dicho material satisface las condiciones para suelo tolerable en el PG3.

Los ensayos realizados cumplen todas las especificaciones.

El control de compactación ha arrojado valores bajos, con un grado de compactación medio del 82%. En La Motilla y Zacatín la humedad ha estado entre un 1,5 y un 4,4% por encima de la óptima; por el contrario en Alcalá la humedad ha estado por debajo de la óptima.

5.3.4. Suelo seleccionado (albero)

Se han utilizado suelos seleccionados que cumplen las especificaciones de EMASESA para material a utilizar en áreas urbanas. Las características principales de los suelos empleados se resumen en la tabla 10:

Material no plástico. Hinchamiento libre nulo

Dichos materiales satisfacen las condiciones para suelo tolerable en el PG3. Cumplen todas las especificaciones.

Con la excepción de Zacatín, el control de compactación ha arrojado valores admisibles, con un grado de compactación entre el 91 y el 98%. La humedad de compactación está próxima a la óptima.

6. ENSAYOS SOBRE LA INFLUENCIA DEL TIPO DE COMPACTADOR

6.1. Zorra de RCD

La tabla 11 compara el rodillo vibratorio con la placa vibrante en zorras de RCD en la Prueba Piloto.

Se observa mejor compactación y mayor homogeneización con más pasadas.

El número de pasadas para alcanzar la compactación de referencia es menor con placa vibrante, y los módulos en ensayos de carga de 1,4 a 1,7 veces superiores. La relación de módulos es menor con bandeja vibrante.

Tabla 12. Comparación según tipo de compactador en la zahorra de RCDs. Valores medios de los ensayos de carga inmediatamente después de la prueba, en el conjunto de todas las obras

Compactador	w %	Compactación media	E_{v1} MPa	E_{v2} MPa	E_{v2} / E_{v1}	E_{vd}
Rodillo vibratorio	+2%	95% PM	35,5	117,1	3,3	39,0
Bandeja vibrante	Ligeramente por encima de la óptima	95% PM	60,2	165,9	2,8	43,8

Tabla 13. Comparación según tipo de compactador en suelo seleccionado. Valores medios de los ensayos para la Prueba de Carga

Compactador	Compactación	w %	Compactación media	E_{v1} MPa	E_{v2} MPa	E_{v2} / E_{v1}	E_{vd}
Rodillo vibratorio	5-6	2%	96,2% PM	30,9	91,8	3,0	30,0
Bandeja vibrante	4 pasadas	<-2%	95,7% PM	49,0	165,3	3,4	35,3

Tabla 14. Comparación según tipo de compactador en suelo seleccionado. Valores medios de los ensayos de carga inmediatamente después de la prueba, en el conjunto de todas las obras

Compactador	w %	Compactación media	E_{v1} MPa	E_{v2} MPa	E_{v2} / E_{v1}	E_{vd}
Rodillo vibratorio	+2%	96,2% PM	31,1	103,6	3,3	36,1
Bandeja vibrante	óptima	95% PM	47,0	132,3	2,8	34,7

La tabla 12 representa lo mismo, para el conjunto de todas las obras

Igualmente, para el conjunto de las obras, la media de los módulos es de 1,4 a 1,7 veces mayor con bandeja vibrante, y la relación de módulos menor.

6.2. Suelo seleccionado

La tabla 13 compara el rodillo vibratorio con la placa vibrante en suelo seleccionado.

Una vez más se comprueba la mayor eficacia de la bandeja sobre el rodillo.

Los resultados con el suelo seleccionado siguen la misma tónica que con RCDs, pero los módulos son muy inferiores.

La tabla 14 representa los mismos parámetros para el conjunto de todas las obras.

Una vez más se comprueba la mayor eficacia de la bandeja sobre el rodillo.

Los resultados con el suelo seleccionado siguen la misma tónica que con RCDs, pero los módulos son muy inferiores.

7. VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA CON EL TIEMPO

7.1. Zahorras de RCD

La tabla 15 compara la variación de la resistencia con el tiempo y el tipo de compactador en zahorras de RCD en la Prueba Piloto.

Tabla 15. Influencia del tiempo y del tipo de compactador en zahorra de RCDs en la Prueba Piloto

Tiempo	Bandeja vibrante			Rodillo		
	E_{v1} MPa	E_{v2} MPa	E_{vd} MPa	E_{v1} MPa	E_{v2} MPa	E_{vd} MPa
Tras ejecución	60,9	166,9	49,0	35,5	117,1	39,0
A los 15 días	152,6	323,1	72,8	71,4	164,1	59,5
A los 30 días	202,5	390,1	78,0	75,8	192,3	63,0

Se observa el fuerte incremento del módulo con el tiempo tras la ejecución y la mayor eficacia de la bandeja vibrante.

7.2. Suelo seleccionado

La tabla 16 compara la variación de la resistencia con el tiempo y el tipo de compactador en suelo seleccionado.

Tabla 16. Influencia del tiempo y del tipo de compactador en suelo seleccionado

Tiempo	Bandeja vibrante			Rodillo		
	E_{v1} MPa	E_{v2} MPa	E_{vd} MPa	E_{v1} MPa	E_{v2} MPa	E_{vd} MPa
Tras ejecución	49,0	160,3	35,3	31,0	91,8	30,0
A los 15 días	89,1	219,6	83,0	38,7	123,7	41,5
A los 30 días	76,7	170,4	88,0	32,6	130,5	44,3

Se observa también un cierto incremento del módulo con el tiempo, pero menos pronunciado que en los RCDs. Podría achacarse al secado de la capa. Asimismo los módulos son muy inferiores a los obtenidos con los RCDs.

8. ENSAYOS DE CARGA

8.1. Forma de las curvas de presión-deformación obtenidas en los ensayos de carga

En general todas las curvas tienen una forma que se puede asimilar a lineal, con excepción de los siguientes ensayos:

1. Un ensayo de carga realizado en el fondo de la excavación.
2. Dos ensayos de carga con RCDs, compactados con rodillo y en los que la carga se aplicó al terminar la compactación.

En estos tres casos las curvas dibujan, en primer lugar una línea recta hasta 0,35 MPa. A partir de este punto se produce

un incremento del módulo hasta 0,5 MPa. Como 0,35 MPa corresponde al 70% de la carga máxima, quiere decir que los valores del módulo del ciclo de carga que da la norma NLT-357/98 corresponden al módulo inicial del ensayo.

Las curvas de recarga se pueden asimilar razonablemente a una línea recta.

8.2. Relación entre los ensayos de carga

La tabla 17 muestra la relación entre todos los valores medios.

Tabla 17. Valores medios

Material	Compactador	E_{v1} MPa	E_{v2} MPa	E_{vd} MPa
RCD	Bandeja	112,3	252,5	57,9
	Rodillo	60,9	157,8	53,8
Material seleccionado	Bandeja	62,9	160,2	57,3
	Rodillo	34,1	115,4	38,6

Se demuestra la mejor eficacia de la bandeja vibrante y se obtienen mayores módulos en los RCDs que con el material seleccionado.

La figura 3 muestra la regresión entre E_{v2} y E_{vd} .

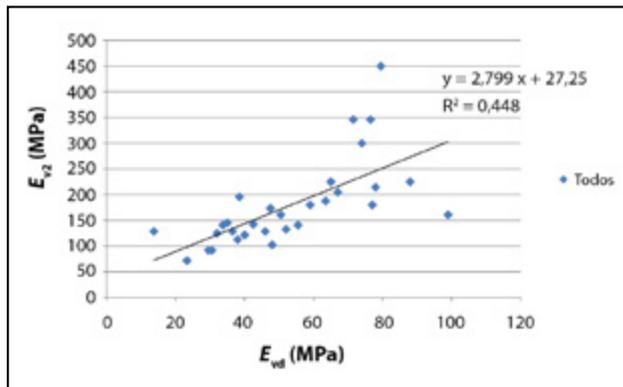


Figura 3. Regresión entre E_{v2} y E_{vd} .

La figura 4 muestra las regresiones por separado para los RCDs y el suelo seleccionado.

Estas regresiones mejoran, para los RCDs si consideramos dos sectores de recta en lugar de una sola curva (figura 5).

El punto de coordenadas $E_{vd} = 63,72$ MPa, $E_{v2} = 184,72$ MPa es el de intersección de las dos rectas.

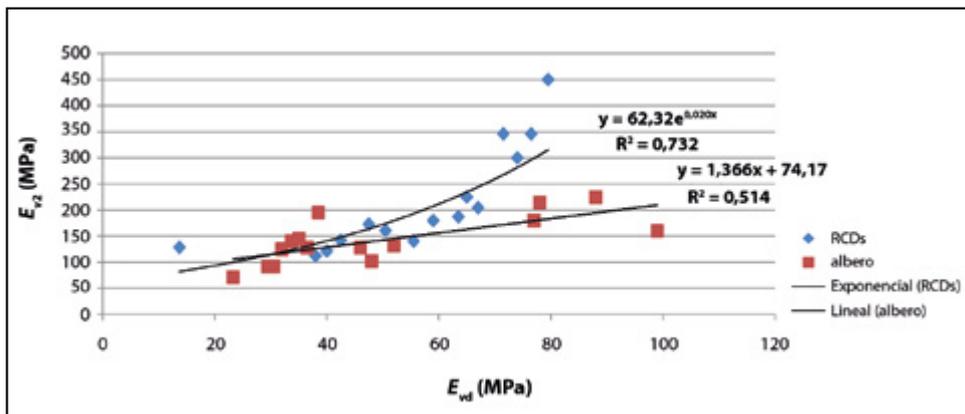


Figura 4. Regresión entre E_{v2} y E_{vd} por separado, para RCDs y el suelo seleccionado.

Para el módulo de carga, las correspondientes regresiones se muestran en las figuras 6 y 7.

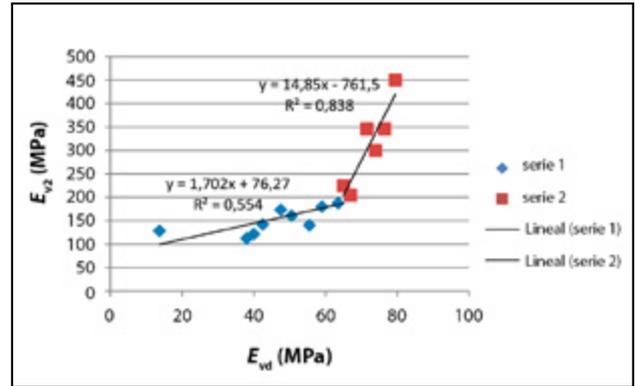


Figura 5. Regresión entre E_{v1} y E_{vd} , para zahorras de RCD, considerando dos sectores de recta.

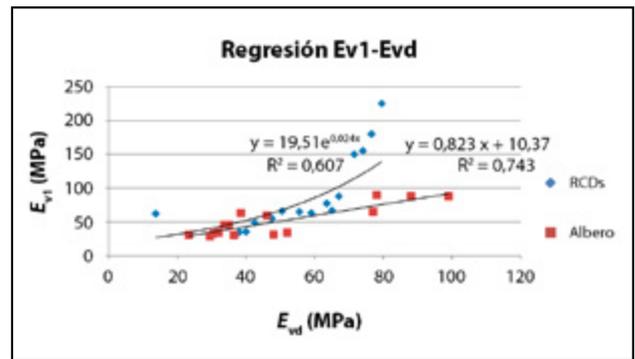


Figura 6. Regresión entre E_{v1} y E_{vd} , por separado, para RCDs y suelo seleccionado.

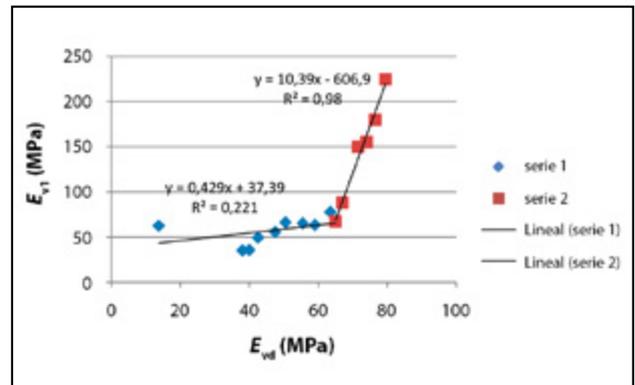


Figura 7. Regresión entre E_{v2} y E_{vd} , para zahorras de RCD, considerando dos sectores de recta.

Tabla 18. Regresiones para obtener E_{v1} y E_{v2} en función de E_{vd}

E_{vd}	Incógnita	Regresión y coeficiente de correlación					
		Todos		RCDs		Material seleccionado	
			R		R		R
$\leq 64,7$	E_{v1}			$E_{v1} = 0,429E_{vd} + 37,39$	0,470		
$> 64,7$				$E_{v1} = 10,4E_{vd} - 606,9$	0,990	$E_{v1} = 0,823E_{vd} + 10,37$	0,862
$\leq 63,7$	E_{v2}			$E_{v2} = 1,702E_{vd} + 76,27$	0,744		
$> 63,7$		$E_{v2} = 2,799E_{vd} + 27,25$	0,669	$E_{v1} = 14,9E_{vd} - 761,5$	0,915	$E_{v2} = 1,366E_{vd} + 74,2$	0,717

El punto de coordenadas $E_{vd} = 64,68$ MPa, $E_{v1} = 65,14$ MPa es el de intersección de las dos rectas.

La tabla 18 resume todas las regresiones.

Vemos que las regresiones tienen un coeficiente de correlación razonable si se hallan por separado para material seleccionado y RCDs. El resultado del ensayo de carga dinámico de Zacatín disminuye mucho el coeficiente de correlación para la estimación de E_{v1} para valores bajos de E_{vd} .

9. CONCLUSIONES

El estudio realizado ha puesto de relieve las excelentes condiciones resistentes de los RCDs en general. Incluso RCDs con un contenido de material asfáltico del 20,9% tienen un CBR para el 100% del Proctor Modificado de 94. Es de destacar la influencia del efecto puzolánico que provoca un incremento importante del módulo de deformación con el tiempo. La compactación con bandeja parece ser mucho más eficaz que la compactación con rodillo vibrante.

Se han realizado ensayos con placa dinámica, mucho más baratos y económicos, que se han relacionado con los estáticos con coeficientes de correlación aceptables.

Sólo aparece un grave inconveniente: su elevado contenido de sulfatos solubles en agua, que parece ser más importante en los RCDs de Andalucía. Según Vegas et al. (2011) el límite de sulfatos solubles en agua debería ser del 0,48% (4800 mg/kg), para evitar daños a cimentaciones vecinas construidas con hormigones no resistentes a los sulfatos. Por el contrario el límite para evitar daños medioambientales en el terreno por lixiviación puede ascender hasta el 2,076% (20760 mg/kg), cantidad esta que cumplen todas las muestras de Aristerra. Sería interesante investigar si el límite sugerido por Vegas et al. (2011) se puede subir, ya que esto incrementaría las posibilidades de uso de los RCDs. En cualquier caso habría que entender que esta limitación de 0,48 % (4800 mg/kg) de sulfatos solubles sólo afecta al uso de RCDs en la proximidad de construcciones de hormigón enterradas. Los porcentajes admisibles en terraplenes de carreteras son, en general muy superiores.

10. BIBLIOGRAFÍA

Barbudo, A., Galvín, A.P., Agrela, F., Ayuso, J. y Jiménez, J.R. (2012). *Correlation analysis between sulphate content and leaching of sulphates in recycled aggregates from construction and demolition wastes*. Waste Management; 32: 1229-1235.

BS 1377-3: (1990). *Methods of test for soils for civil engineering purposes. Chemical and electro-chemical tests*. British Standards Institution, London.

Directiva 2008/98/CE Del Parlamento Europeo y del Consejo de 19 de noviembre de 2008 sobre los residuos y por la que se derogan determinadas Directivas. En Diario Oficial de la Unión Europea 22.11.2008: L312/3-L312/30.

NLT-114/99. *Determinación del contenido en sales solubles de los suelos*. Normas del Laboratorio del Transporte y Mecánica del Suelo, 1999, Madrid.

NLT-115/99. *Contenido de yeso en suelos*. Normas del Laboratorio del Transporte y Mecánica del Suelo, 1999, Madrid.

NLT-254/99. *Ensayo de colapso en suelos*. Normas del Laboratorio del Transporte y Mecánica del Suelo, 1999, Madrid.

NLT-357/98. *Ensayo de carga con placa*. Normas del Laboratorio del Transporte y Mecánica del Suelo, 1998, Madrid.

UNE 103204 + Erratum: (1993). *Contenido de material orgánica en suelos*. Aenor, Madrid.

UNE-EN 933-3: (2012). *Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos*. Parte 3: Determinación de la forma de las partículas. Índice de lajas. Aenor; 2004, Madrid.

UNE-EN 933-11:2009/AC: (2010). *Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos*. Parte 11: Ensayo de clasificación de los componentes de los áridos gruesos reciclados. Aenor. (2007). Madrid.

UNE-EN 1097-6:(2014). *Ensayos para determinar las propiedades físicas y mecánicas de los áridos*. Parte 6: Determinación de la densidad de partículas y la absorción de agua. Aenor, Madrid.

UNE-EN 1744-1: (2010). *Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos*. Part I: Análisis químico. AENOR, Madrid.

UNE 103807-2: (2008). *Ensayos de carga vertical de suelos mediante placa dinámica*. Parte 2: Placa rígida, diámetro $2r=300$ mm, Método 2.

Vegas, I., Ibáñez, J.A., Lisbona, A., Sáez de Cortázar, A. y Frías, M. (2011). *Pre-normative research on the use of mixed recycled aggregates in unbound road sections*. Construction and Building Materials; 25:2674-2682.