



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

Evaluación del uso de mezclas de suelos cohesivos
con la fracción fina de residuos de construcción y
demolición

Cohesive soil mixture use evaluation with the fine
fraction of construction and demolition waste

Autor

Joaquín Bellera Campodarve

Director

Pedro Luis López Julián

Escuela Universitaria Politécnica La Almunia
2019



**Escuela Universitaria
Politécnica - La Almunia**
Centro adscrito
Universidad Zaragoza

**ESCUELA UNIVERSITARIA POLITÉCNICA
DE LA ALMUNIA DE DOÑA GODINA (ZARAGOZA)**

MEMORIA

Evaluación del uso de mezclas de suelos
cohesivos con la fracción fina de residuos
de construcción y demolición

Cohesive soil mixture use evaluation with
the fine fraction of construction and
demolition waste

423. 19. 70

Autor: Joaquín Bellera Campodarve

Director: Pedro Luis López Julián

Fecha: 5 de junio de 2019

ÍNDICE DE CONTENIDO

1.	RESUMEN	1
2.	ABSTRACT	3
3.	INTRODUCCIÓN	5
4.	ESTADO DEL ARTE	7
4.1.	INTRODUCCIÓN	7
4.2.	ÁRIDO RECICLADO DE RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN	8
4.2.1.	<i>Procedencia</i>	8
4.2.2.	<i>Propiedades del árido reciclado</i>	12
4.2.3.	<i>Producción del árido reciclado</i>	21
4.2.4.	<i>Valorización</i>	26
4.2.5.	<i>Marco normativo</i>	34
4.3.	SUELOS COHESIVOS	40
4.3.1.	<i>Caracterización</i>	41
4.3.2.	<i>Identificación y análisis</i>	53
4.3.3.	<i>Compactación</i>	55
4.3.4.	<i>Compactadores de suelos plásticos</i>	60
4.3.5.	<i>Estabilización</i>	67
4.4.	CONCLUSIONES GENERALES SOBRE EL ÁRIDO RECICLADO Y LOS SUELOS COHESIVOS	76
4.4.1.	<i>Conclusiones sobre el árido reciclado de residuos de construcción y demolición</i>	76
4.4.2.	<i>Conclusiones sobre los suelos cohesivos y su compactación</i>	78
5.	MATERIALES Y PROCEDIMIENTOS	81
5.1.	INTRODUCCIÓN	81
5.2.	MATERIALES	81
5.2.1.	<i>Lutitas</i>	81
5.2.2.	<i>Árido reciclado</i>	83
5.3.	MEZCLAS LUTITA - ÁRIDO RECICLADO	87
5.3.1.	<i>Procedimiento seguido en la elaboración de las mezclas</i>	88
6.	PROGRAMA EXPERIMENTAL	95
6.1.	INTRODUCCIÓN	95
6.2.	ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN	95
6.2.1.	<i>Análisis granulométrico</i>	96
6.2.2.	<i>Densidad real</i>	97

6.2.3.	<i>Absorción de agua</i>	97
6.2.4.	<i>Límites de Atterberg</i>	97
6.2.5.	<i>Ensayos de compactación Proctor</i>	98
6.2.6.	<i>Rotura a compresión simple</i>	99
6.2.7.	<i>Índice C.B.R.</i>	101
7.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	103
7.1.	INTRODUCCIÓN	103
7.2.	ESTUDIO DE LAS MUESTRAS	104
7.2.1.	<i>Aspecto visual</i>	104
7.2.2.	<i>Análisis granulométrico</i>	107
7.2.3.	<i>Densidad real</i>	111
7.2.4.	<i>Absorción de agua</i>	112
7.2.5.	<i>Límites de Atterberg</i>	113
7.2.6.	<i>Ensayos de compactación Proctor</i>	115
7.2.7.	<i>Rotura a compresión simple</i>	124
7.2.8.	<i>Índice C.B.R.</i>	126
8.	EVALUACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA	129
8.1.	INTRODUCCIÓN	129
8.2.	VALORACIÓN TÉCNICA	129
8.2.1.	<i>Resultados</i>	130
8.2.2.	<i>Discusión</i>	132
8.3.	VALORACIÓN ECONÓMICA	135
8.3.1.	<i>Resultados</i>	136
8.3.2.	<i>Discusión</i>	142
9.	CONCLUSIONES	145
10.	FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	151
11.	LISTADO DE FIGURAS, FOTOGRAFÍAS Y TABLAS	155
11.1.	LISTA DE FIGURAS	155
11.2.	LISTA DE FOTOGRAFÍAS	158
11.3.	LISTA DE TABLAS	160
12.	BIBLIOGRAFÍA	163

1. RESUMEN

El carácter cohesivo de un suelo debe quedar debidamente definido para estimar su potencial reutilización en obra civil. En el caso del suelo tratado en esta investigación, correspondiente a lutitas terciarias (geotécnicamente suelos de tipo CL sin problemas específicos de contenidos elevados en materia orgánica o sales solubles, ni riesgo de expansividad ni colapsabilidad), el principal problema radica en la puesta en obra de estos materiales. Lo que lleva a plantear alternativas específicas de compactación, estabilizar o, en última instancia, sustituir el suelo por otro de mejores prestaciones. Por tanto, se precisa también de un control técnico más exhaustivo de lo habitual.

La adición a las lutitas, a modo de estabilización, de residuos de construcción y demolición (RCD) de hormigón en su fracción arenosa, en diferentes proporciones de mezcla, ha permitido comprobar una mejora en la compactabilidad de las mezclas. La situación óptima se ha observado para una dosificación 3:1, es decir, tres partes de lutita y una parte de RCD, en la cual se ha obtenido el valor más elevado de densidad seca máxima tanto en el ensayo Proctor Normal como Modificado. El resultado obtenido en el ensayo de compactación Proctor Modificado ($2,14 \text{ t/m}^3$ con una humedad óptima del 10%) le confiere, en estos términos, un comportamiento similar a la zahorra.

Los resultados numéricos se ven acompañados por las observaciones realizadas durante los ensayos en laboratorio, en los cuales se evidencia que la adición de RCD a la lutita permite una compactación más eficaz, mostrando las mezclas una reducción evidente en el comportamiento cohesivo para un rango de humedades considerable. Lo que a priori permite una colocación en obra con maquinaria convencional y sin controles técnicos específicos, lo que confiere una ventaja respecto de otros métodos de mejora.

Además de ventajas económicas, el tratamiento propuesto lleva asociadas una serie de ventajas ambientales evidentes, entre las que destacan tanto la reducción de residuos en obra (volúmenes de suelo excavados, pero no reutilizados) como la potencialidad de la fracción fina de los RCD como subproducto.



2. ABSTRACT

The cohesive character of a soil must be well defined to estimate its potential reuse in civil works. In the case of the soil dealt with in this paper, made up by tertiary shales (geotechnically speaking they are CL type soils without specific problems of high contents in organic matter or soluble salts, or risk of expansiveness or collapsibility), the main problem of these materials lies in their implementation in construction, which leads to the proposal of specific alternatives of compaction, stabilization or, eventually, the replacement of the soil with a different one with a better performance. Therefore, a more detailed technical control than usual is also required.

The addition of sandy construction and demolition waste (CDW) of concrete, in different mixture proportions, has allowed to verify an improvement in the compactability of the mixtures. The optimum situation has been observed for a 3:1 dosage, that is, three parts of shale and one part of CDW, in which the highest value of maximum dry density has been obtained in both the Normal and Modified Proctor test. The result obtained in the Modified Proctor compaction test (2.14 t/m^3 with an optimum humidity of 10%) gives it, in these terms, a similar behaviour to aggregate.

The numerical results are backed up by observations made during the laboratory tests, in which it is evident that the addition of CDW to the shale allows an easier compaction, showing an evident reduction of the mixtures cohesive behaviour for a significant range of humidity. In advance, all of this allows laying with conventional machinery and without specific technical controls, which confers an advantage over other methods of improvement.

This improvement of lutitic material entails economic benefits in addition to obvious environmental advantages by allowing both a reduction in construction waste (excavated, but not reused, soil volumes) and the conversion of CDW fine fraction to a by-product.



3. INTRODUCCIÓN

Las características técnicas de suelos limo-arcillosos (suelos cohesivos) presente en amplias zonas de la geografía española con problemas de plasticidad (ver Figura 3.1), que son, por lo general, caracterizados como "suelos marginales" (PG-3; Ministerio de Fomento, 2000), hacen complicada la realización de determinadas estructuras constructivas, especialmente aquéllas en las que se requiere compactar el suelo. Esto es debido a que estos materiales presentan un comportamiento plástico en condiciones de humedad que dificulta su compactación (Fuentes Blanco, 2016).

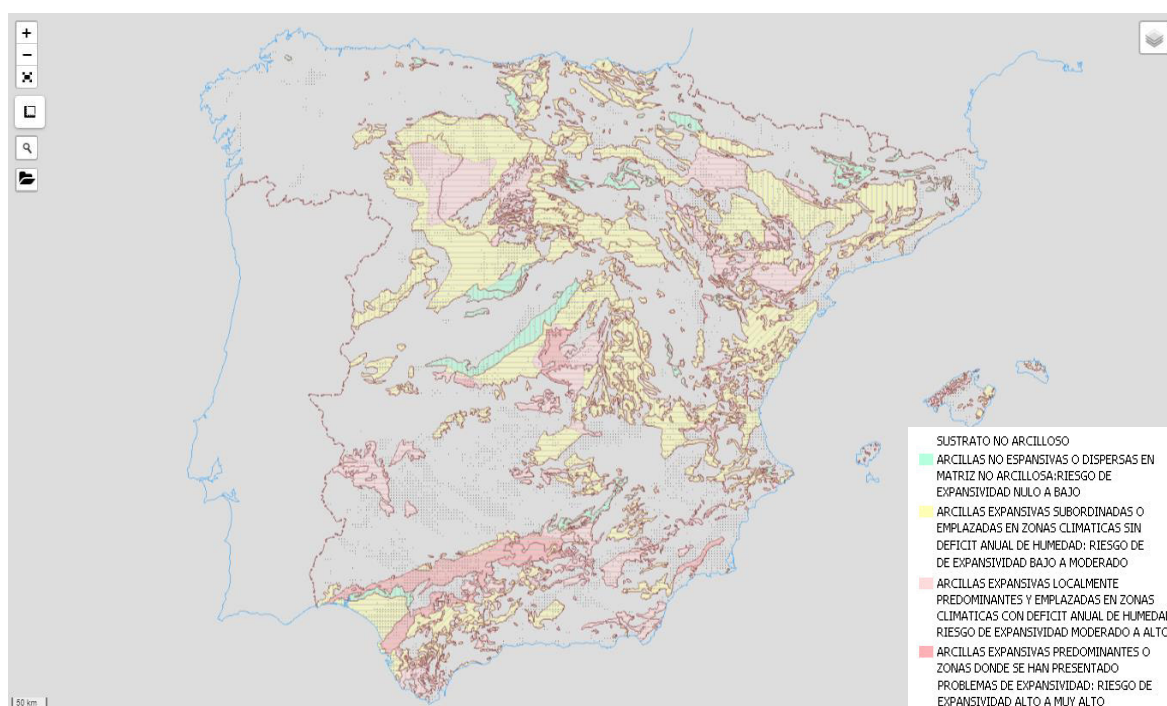


Figura 3.1. Cartografía geológica de España: Expansividad de arcilla (IGME, 2015)

Si bien, en 2015 mediante ensayos de caracterización geotécnica realizados en el laboratorio de materiales de la Escuela Universitaria Politécnica de La Almunia, se identificó una mejora en la compactabilidad de un material lutítico (suelo limo-arcilloso) presente en amplias zonas de la provincia de Zaragoza, mediante la mezcla con la fracción arena de un residuo procedente de molienda de hormigón, los resultados que se obtuvieron quedaron bajo una susceptible veracidad, dado que cada tipología de ensayo se ejecutó sin repeticiones. Es por ello, que en el presente Trabajo Fin de Grado se van a cotejar y ampliar los ensayos realizados en 2015. Se pretende, además, analizar cuantitativamente el comportamiento reológico de las mezclas, es decir, el estudio de la resistencia de los suelos obtenidos en las mezclas como la amplitud del

campo de comportamiento elástico y plástico de las mismas, mediante ensayos de deformación C.B.R., rotura a compresión simple y Límites de Atterberg.

Por otro lado, en base a los ensayos realizados en la Escuela Universitaria Politécnica de La Almunia, son algunos los textos que hablan de que la mejora del material limoso conllevaría, además de beneficios ambientales evidentes, al permitir una reducción de residuos en obra, una potencialidad técnica y económica. Dicha potencialidad jamás ha sido valorada, pasando por tanto a ser objeto del presente trabajo el análisis de la misma.

4. ESTADO DEL ARTE

4.1. INTRODUCCIÓN

Los suelos cohesivos en general no se suelen considerar geotécnicamente aptos para su reutilización en obras civiles, dado que su principal problema radica en la dificultad para ser compactados. Así, cuando en obra aparecen suelos de composición predominantemente arcillosa o limosa, las normativas sólo permiten su reutilización en situaciones constructivas muy limitadas y, en muchos casos, bajo un tratamiento previo que mejore sus cualidades geotécnicas. La mejora de estos suelos, está bien desarrollada desde hace tiempo para poder reutilizar materiales cohesivos de todo tipo, incluyendo aquéllos que presentan expansividad y/o colapsabilidad. Para dicha mejora los pliegos de prescripciones técnicas contemplan lo que en la normativa se define como suelo estabilizado in situ.

No obstante, entre las mejoras desarrolladas no se contempla la mejora en la compactabilidad de un material cohesivo mediante la mezcla con residuos de construcción y demolición (en adelante, RCDs). Dicha opción de mejora fue llevada, por primera y única vez, a una investigación experimental en 2015 en el laboratorio de la Escuela Universitaria Politécnica de La Almunia (en adelante, EUPLA), la cual arrojó resultados favorables en ciertas proporciones de combinación de los componentes.

Es consecuencia de lo expuesto con anterioridad, que en este capítulo se vayan a abordar las principales características tanto de los áridos reciclados como de los suelos cohesivos; profundizando en la compactación de estos últimos. Dividiéndose para ello el capítulo en dos grandes apartados en los que se recogen las principales consideraciones de trabajos de investigación y normativa existente.

El primer bloque, es una recopilación bibliográfica sobre los áridos reciclados procedentes de RCDs, desde los procesos de obtención, sus propiedades connaturales y ámbito de aplicación, y la normativa aplicable en España. El segundo bloque por su parte, se compone de un análisis de las principales soluciones contempladas para la compactación de la fracción cohesiva de los suelos, así como la normativa que las regula en España.

4.2. ÁRIDO RECICLADO DE RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN

Dado que en este TFG se plantea el uso de la fracción fina procedente del machaqueo de piezas prefabricadas de hormigón (Salesa Bordanaba, 2014), y sus conclusiones se pueden aplicar al uso de residuos resultantes del machaqueo de hormigón procedente de la demolición de obras civiles o de edificación, serán en estos tipos de RCDs en los que se centrarán los esfuerzos. Como conclusión a este apartado se estudiará el marco legal básico a nivel nacional aplicable a los RCDs y las especificaciones técnicas que se refieren a la utilización de estos materiales en obra civil.

4.2.1. *Procedencia*

4.2.1.1. *Origen*

Según la Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados, con las modificaciones introducidas en la Ley 5/2013, se define como residuo "cualquier sustancia u objeto que su poseedor deseche o tenga la intención o la obligación de desechar". Más específicamente, 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, residuo de construcción y demolición (en adelante, RCD) es cualquier sustancia u objeto que, cumpliendo la definición de "residuo" se genera en una obra de construcción y demolición" (CEDEX, 2014). No obstante, el ámbito de aplicación del Real Decreto 105/2008 exceptúa como RCD los siguientes:

- Las tierras y piedras no contaminadas por sustancias peligrosas reutilizadas en la misma obra, en una obra distinta o en una actividad de restauración, acondicionamiento o relleno, siempre y cuando pueda acreditarse de forma fehaciente su destino a reutilización.
- Los residuos regulados por el RD 975/2009 con las modificaciones introducidas por la Directiva 2006/21/CE (Real Decreto 777/2012), del Parlamento Europeo y del Consejo, de 15 de marzo, sobre la gestión de los residuos de industrias extractivas.
- Los lodos de dragado no peligrosos reubicados en el interior de las aguas superficiales derivados de las actividades de gestión de las aguas y de las vías

navegables, de prevención de las inundaciones o de mitigación de los efectos de las inundaciones o las sequías, reguladas por el Texto Refundido de la Ley de Aguas, por la Ley 48/2003, de 26 de noviembre, de régimen económico y de prestación de servicios de los puertos de interés general, y por los tratados internacionales de los que España sea parte.

4.2.1.2. Volumen y Distribución

En su mayor parte el volumen de RCDs procede de derribos de edificios o rechazos de los materiales de construcción de nueva obra, lo que habitualmente se conoce como "escombros". Los escombros de hormigón, sin embargo, proceden mayoritariamente de las demoliciones de obra civil.

Todo ello queda reflejado en el Plan Estatal Marco de Residuos (en adelante, PEMAR) 2016-2022. No obstante, en él también se indica que según las estadísticas del Instituto Nacional de Estadística (en adelante, INE), relativas a residuos, en el período 2007-2012 se redujeron fuertemente la generación de RCD en nuestro país; se pasaron de unos 42 millones de toneladas en el año 2007 a algo menos de 28 millones de toneladas de RCD en 2012.

Al contrario de lo que ocurría en las previsiones contempladas en el anterior Plan Nacional Integrado de Residuos (PNIR) para el periodo 2008-2015, la tendencia del sector de la construcción en esa etapa fue claramente descendente, aunque actualmente pueden percibirse signos de recuperación. Es un hecho relevante que, por ejemplo, de 2012 a 2015 los RCDs generados crecieran aproximadamente en un 30%. Los últimos datos públicos del INE sobre la generación y gestión de los RCD, los relativos al año 2012, son los que se exponen en la Tabla 4.1.

	Residuos Generados (t)	Residuos destinados a Valorización material (t)	Residuos destinados a Operaciones de relleno (t)	Residuos destinados a Incineración (t)	Residuos depositados en vertedero (t)
No Peligrosos	27.637.698	19.007.146	4.328.999	0	4.301.553
Peligrosos	66.156	3.878	0	0	62.278
Totales	27.703.854	19.011.024	4.328.999	0	4.363.831

Tabla 4.1. Generación y gestión RCDs en 2012. Fuente: INE (PEMAR 2016-2022)

Según estos datos, aproximadamente el 16% de los residuos fueron llevados a gestores autorizados en forma de vertido. Por su parte, la Asociación Española de Reciclaje de Residuos de Construcción y Demolición (en adelante, RCDA), representante

mayoritario de plantas de reciclaje públicas y privadas en España, estima en sus últimos datos publicados (periodo 2011-2015) el porcentaje de entradas a vertedero con respecto del total de RCDs generados entorno al 24% de media.

Producción de RCD Nacional (t) (Estimación RCDA sobre Datos de las CCAA)							
España		2011	2012	2013	2014	2015	media periodo
Habitantes		46.736.257	46.766.403	46.593.236	46.455.123	46.410.149	46.592.234
Entradas a Centros de Tratamiento	t	11.284.475	8.798.171	8.825.523	10.274.483	11.065.681	10.049.667
Reciclaje/Valorización	t	10.033.939	7.782.142	7.313.560	8.656.032	9.717.333	8.700.601
Stock RCD	t	1.250.536	1.016.029	1.511.963	1.618.451	1.348.348	1.349.065
Aridos, Mat., Subproductos	t	8.426.219	6.515.858	6.033.064	7.248.028	8.086.506	7.261.935
Rechazos Vertedero	t	1.607.720	1.266.285	1.280.495	1.408.005	1.630.827	1.438.666
Reciclaje en Obra	t	0	16.850	49.127	141.716	164.257	74.390
Entradas Vertedero	t	5.060.708	3.595.545	3.691.430	4.464.219	5.263.331	4.415.047
Entradas directas	t	3.452.988	2.329.261	2.410.935	3.056.215	3.632.504	2.976.380
De Centros de Tratamiento	t	1.607.720	1.266.285	1.280.495	1.408.005	1.630.827	1.438.666
Total Producción RCD	t	14.737.463	11.144.282	11.285.585	13.472.414	14.862.442	13.100.437
	t/hab/año	0,315	0,238	0,242	0,290	0,320	0,281

Fuente: CCAA/elaboración propia RCDA Sin tierras de excavación

Tabla 4.2. Producción Nacional de RCDs 2011-2015 "oficial" CCAA (RCDA, 2017)

Otro hecho relevante es que los datos de producción que estima la RCDA según superficie construida del periodo 2011-2015, reflejan una producción media de 18.849.640 t (sin tierras de excavación). RCDA calcula los RCD "incontrolados" como la diferencia entre la producción calculada por la superficie construida y los datos oficiales de las CCAA. Estos representan el 30% de la producción total de RCD.

Producción de RCD Nacional (t) (RCD Controlados + RCD Incontrolados)							
España		2011	2012	2013	2014	2015	media periodo
Producción CONTROLADA	t	14.737.463	11.144.282	11.285.585	13.472.414	14.862.442	13.100.437
Producción INCONTROLADA	t	8.872.709	4.335.449	4.716.469	5.516.756	5.304.634	5.749.203
	%	37,6%	28,0%	29,5%	29,1%	26,3%	30,5%
Total Producción RCD	t	23.610.172	15.479.731	16.002.054	18.989.170	20.167.075	18.849.640
	t/hab/año	0,505	0,331	0,343	0,409	0,435	0,405

Fuente: Elaboración RCDA

Tabla 4.3. Producción Nacional de RCDs (RCD Controlados + RCD Incontrolados) (RCDA, 2017)

En cualquier caso, y aun partiendo de los datos de reciclaje más favorables, el vertido generado crea un impacto medioambiental negativo. Lo que hace necesaria una gestión que permita aprovechar el potencial que tienen como material secundario. La reducción en la generación de RCD en estos últimos años ha conllevado que las plantas de tratamiento no reciban residuos suficientes para continuar su actividad. Adicionalmente, los materiales tratados por estas instalaciones no tienen suficiente demanda, puesto que las Administraciones Públicas que eran las principales demandantes de este material han disminuido en gran medida su actividad.

En la práctica, los RCDs que son procesados para su reciclaje incluyen una variada serie de materiales, por lo general de naturaleza inerte, entre los que se encuentran

productos cerámicos, residuos de hormigón, material asfáltico y en menor medida otros componentes como madera, vidrio, plásticos, etc.

Como muestra orientativa para España, según indica el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (en adelante, CEDEX), la composición media de estos residuos es la que recoge la Figura 4.1.

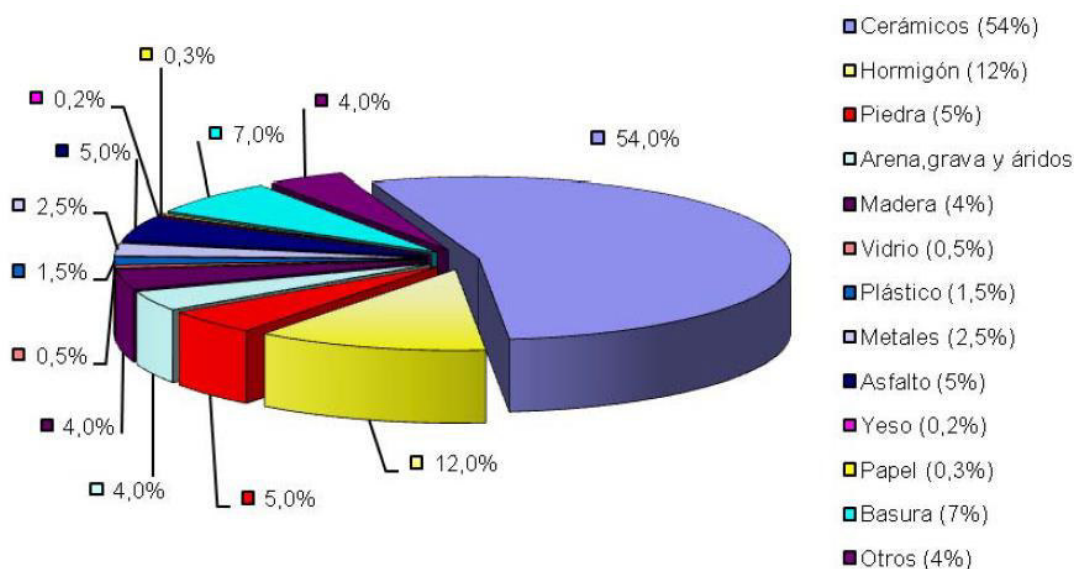


Figura 4.1. Composición de los RCDs (Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio de la Comunidad de Madrid, 2006)

Por su parte la Federación Española de Asociaciones de Empresas Gestoras de Residuos de Construcción y Demolición (en adelante, FEDERACIÓN RCDs), en su último Dossier de Producción publicado (periodo 2014-2017), estima la composición de los RCDs tratados por sus asociados en la siguiente configuración:

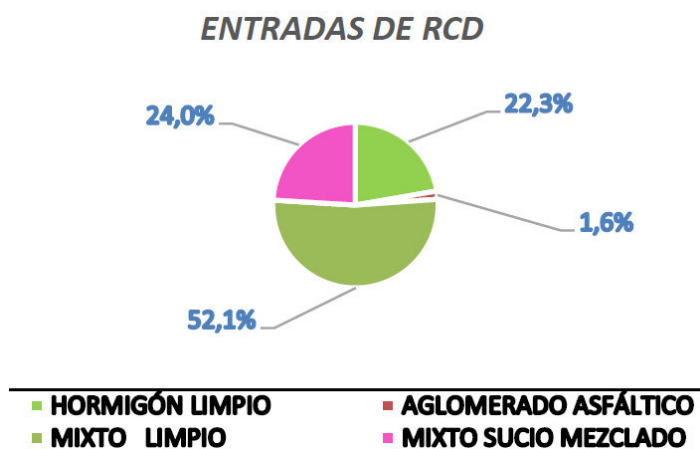


Figura 4.2. Composición de los RCDs (FEDERACIÓN RCDs, 2018)

4.2.2. Propiedades del árido reciclado

Se entienden como áridos reciclados a aquéllos resultantes del tratamiento de material inorgánico previamente utilizado en la construcción. Las características geotécnicas y químicas del árido, como podría ser una posible reactividad con los materiales naturales del árido reciclado, dependen de su procedencia, los procedimientos de procesado y, en último término de su composición, dado que el residuo puede contener una gran diversidad de materiales.

En el caso de los áridos que nos incumben, los reciclados procedentes de hormigón, presentan cierta heterogeneidad en sus propiedades, debida principalmente a las distintas características de los hormigones que llegan a la planta de reciclado, a los sistemas de trituración empleados y a la presencia de impurezas.

En general, la calidad del árido reciclado está claramente influida por la fracción considerada y el destino en su reutilización, puesto que en las fracciones finas aparece una disminución de la densidad, aumento de la absorción, mortero, impurezas, partículas ligeras, terrones de arcilla, así como mayor contenido de cloruros y de sulfatos.

4.2.2.1. Propiedades físicas

Granulometría

La granulometría depende del proceso de trituración del árido reciclado, siendo una de las propiedades más importantes. Por ejemplo, en hormigón reciclado tendrá gran influencia en la consistencia, docilidad, uniformidad y resistencia.

Tras el proceso de trituración, el árido es una mezcla de fracción gruesa o grava (≥ 4 mm) y finos o arena (< 4 mm). En el mejor de los casos, el porcentaje de árido grueso que se obtiene varía del 70% al 90% de la masa total del hormigón original (CEDEX, 2014).

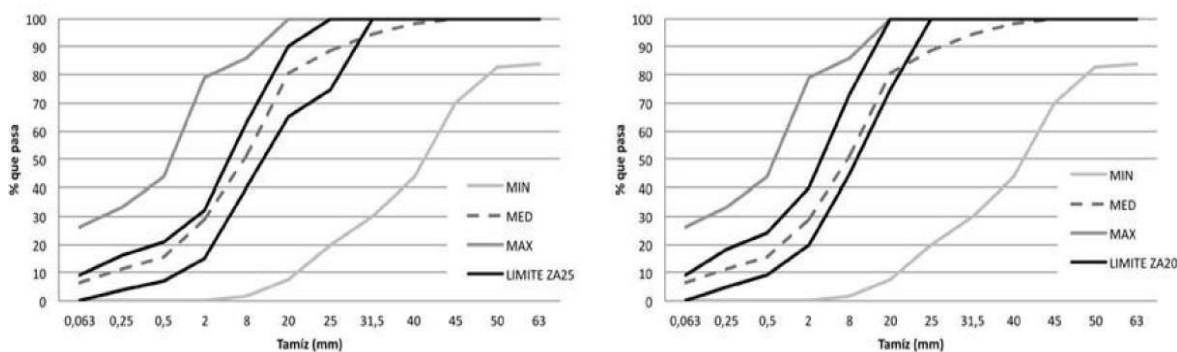


Figura 4.3. Curvas granulométricas máximas, mínimas y medias de muestras analizadas por la Asociación Española de Gestores de Residuos de Construcción y Demolición (GERD, 2011)

Cabe remarcar que la fracción gruesa posee una distribución granulométrica adecuada para casi todas las aplicaciones de material granular en construcciones, incluso en la producción de un nuevo hormigón, aunque suelen presentar un mayor porcentaje de desclasificados inferiores (porcentaje sobre “d” menor que el 10%) (GERD, 2011).

Por su parte, las características del árido reciclado fino son parecidas a las de arena de trituración, partículas angulosas y gran cantidad de polvo. El módulo de finura es superior a la mayoría de arenas de río, superando los límites establecidos para arenas naturales e inutilizables para la utilización de hormigones estructurales (Estrader Bofarull, 2015).

Se percibe que la mayor parte de las muestras analizadas la Asociación Española de Gestores de Residuos de Construcción y Demolición (en adelante, GERD) han presentado un contenido de finos (material que pasa en el tamiz 0,063 mm) no superior a 10% (Figura 4.4). El 85% de las muestras analizadas cumplen el límite máximo de 9% de finos exigidos por el Pliego de *Prescripciones Técnicas Generales para obras de carreteras y puentes* (en adelante, PG-3) para los husos granulométricos ZA25 y ZA20.

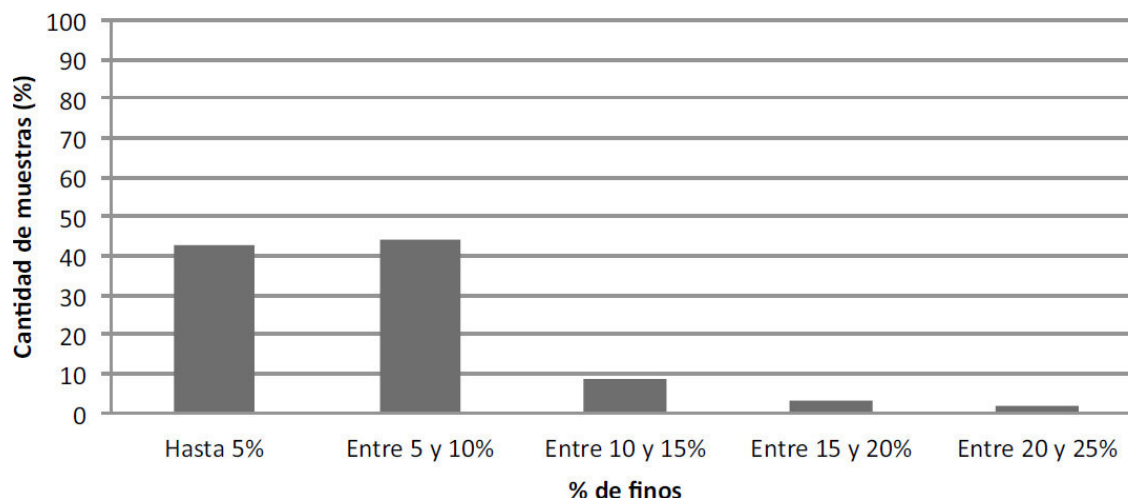


Figura 4 .4. Cantidad de muestras analizadas la GERD en función del contenido de material fino que pasa en el tamiz 0,063 mm (GERD, 2011)

Sin embargo, algunas configuraciones determinadas de los procesos de reciclaje muestran una tendencia a generar un exceso de finos, que debe ser corregido en planta mediante procesos mecánicos específicos (pre cribado, lavado, soplado y otros).

Morfología

El coeficiente de forma del árido reciclado es similar al del árido natural, pudiendo presentar un porcentaje de lajas inferior. Si bien, el coeficiente de forma depende directamente de la efectividad de las estaciones de preparación: trituración, cribado-almacenamiento.

Se resalta, sin embargo, que la forma de los áridos reciclados españoles no es un limitador para su uso en la construcción civil. Prácticamente todas las muestras analizadas por la GERD presentan valores de índice de lajas inferiores al 35%, lo que indica la viabilidad del árido reciclado para uso en las aplicaciones prescritas en el PG-3.

La textura de los áridos reciclados suele ser rugosa y porosa, debido a la presencia de restos de cemento sin hidratar y mortero que queda adherido a los áridos. Los áridos reciclados tienen una mayor porosidad que los áridos naturales. El incremento estará entre el 1% y el 12,7% respecto a un árido natural (CEDEX, 2014).

Densidad

La densidad puede establecerse como un índice de la uniformidad del árido reciclado. Su densidad es muy similar a la del hormigón original y algo menor que la densidad del árido natural empleado para la producción de dicho hormigón, entre un 5-10% menor, aunque se considera un árido de densidad normal ($>2000 \text{ kg/m}^3$). Los valores más habituales varían entre $2,07\text{-}2,65 \text{ kg/dm}^3$ en el caso de la densidad real y entre $2,10\text{-}2,64 \text{ kg/dm}^3$ para la densidad saturada con superficie seca. En el caso de las arenas recicladas, el valor de su densidad es inferior a la de las gravas, por su mayor contenido de pasta de cemento adherida, estando la densidad real en la generalidad de los casos por debajo de $2,4 \text{ kg/dm}^3$, y de $2,5 \text{ kg/dm}^3$ la densidad saturada (CEDEX, 2013).

Como es lógico, y así ocurre en la mayoría de las propiedades, el proceso de trituración afectará la densidad del árido reciclado, así como las características del hormigón original.

Autor	Tamaño del AR	Densidad (kN/m ³)		Observaciones
		AN	AR	
Domingo, A. (Domingo et al., 2010)	4/10-10/20	26.2/26.5		
	4/8-8/20		23.4/23.4	
Poon, C.S.(Poon et al., 2007)	10/20	26.2/26.2	24.9/25.7	
Corinaldesi, V.(Valeria Corinaldesi & Moriconi, 2009)	6/12	25.7	24.5	Densidad saturada en superficie seca
González y Martínez (González-Fonteboa & Martínez-Abella, 2007)	4/12	26.4	23.5	
	10/25	26.4	23.7	
Gomes y De Brito (Gomes & Brito, 2009)	AG	25.7	25.3	Densidad saturada en superficie seca
Casuccio et al.(M. Casuccio et al., 2008)	AG	27	25.1	
Limbachiya et al.	5/10	26	24	Densidad saturada en superficie seca
	10/20	26	24.1	
Pérez Benedicto, J.A.	6/12	26.1	24.3	AR de RCD, saturada en superficie seca
	4/31.5	26.1	23.7	AR de hormigón, saturada en superficie seca
Hansen y Narud(Hansen & Narud, 1983)	4/8	25	23.5	Origen calizo, relaciones a/c de 0.7
	8/16	26.2	24.4	
	16/32	26.1	24.8	
Tavakoli y Soroushian(Tavakoli & Soroushian, 1996)	4.75/19	26.3	24.1/22.6	Origen calizo resistencias de 54 y 44 MPa
	4.75/25	26.9	24.5/23.7	
Soutsos, M. (Soutsos et al., 2012)	AG	26.7	22.7	

Tabla 4.4. Densidad de los Áridos Reciclados y Naturales (Salesa Bordanaba, 2014)

Absorción de agua

Es una de las propiedades más características de los áridos reciclados. Depende de la composición del hormigón original, el medio de absorción y de las condiciones de humedad en las que se encuentra el árido reciclado

Los valores más habituales se sitúan entre 4 y 9% (Sánchez De Juan y Alaejos, 2009). Los resultados de absorción de las arenas recicladas españolas caracterizadas (valores de 2,2 a 6,2%) se encuentran en el rango inferior en comparación con otros estudios internacionales. No obstante, el valor de la humedad crítica (valores de 4,2 a

9,9%) se considera más representativo que el coeficiente de absorción de la verdadera demanda de agua que originan las arenas recicladas (CEDEX, 2013).

En el caso de utilizar árido reciclado para elaborar hormigón, el árido reciclado presenta valores superiores respecto a un árido natural, siendo las fracciones más finas las que más absorción tienen. También la velocidad de absorción es mayor en los áridos reciclados que en los áridos naturales.

Autor	Tamaño del AR	Absorción %		Observaciones
		AN	AR	
Domingo, A. (Domingo et al., 2010)	4/10-10/20	1.42-0.98		
	4/8-8/20		6.08-5.19	
Poon, C.S.(Poon, Kou, & Lam, 2007)	10/20	1.1-1.1	4.3-3.5	
Corinaldesi, V.(Valeria Corinaldesi & Moriconi, 2009)	6/12	3.4	7	RCD
González y Martínez (González-Fonteboa & Martínez-Abella, 2007)	4/12	0.07	4.82	Escombros de hormigón y roca
	10/25	0.17	4.59	
Gomes y De Brito (Gomes & Brito, 2009)	AG	2.29	8.49	
Casuccio et al.(M. Casuccio, Torrijos, Giaccio, & Zerbino, 2008)	AG	0.5	3.8	Origen granítico
Limbachiya et al.	5/10	2.5	5.2	
	10/20	2.5	4.9	
Pérez Benedicto, J.A.	6/12	0.97	7.3	AR de RCD
	4/31.5	0.97	4.63	AR de hormigón
Hansen y Narud(Hansen & Narud, 1983)	4/8	3.7	8.5/8.7	Origen calizo, relaciones a/c de 0.4 y 0.7
	8/16	1.8	5/5.4	
	16/32	0.8	3.8/4	
Tavakoli y Soroushian(Tavakoli & Soroushian, 1996)	4.75/19	2.0	4.5/8.1	Origen calizo resistencias de 54 y 44 MPa
	4.75/25	1.1	3.6/6.6	
Padmini et al.(Padmini, Ramamurthy, & Mathews, 2009)	4.75/10	0.3	4.6/4.8/5	Origen granítico Resistencias de 34,48 y 55 MPa.
	4.75/20	0.3	3.7/4.1/4.9	
	4.75/40	0.3	2.2/2.5/2.8	
Soutsos, M. (Soutsos, Tang, & Millard, 2012)	AG	0.65	7.24	

Tabla 4.5. Absorción en el Árido Reciclado (Salesa Bordanaba, 2014)

Erosión

Las gravas recicladas presentan un desgaste en el ensayo de Los Ángeles comprendido entre 25-45%, por encima del que suele encontrarse en las gravas naturales. En cambio, los ensayos de friabilidad realizados sobre arenas recicladas dan valores entre el 15 y 31%, que también suelen encontrarse en las arenas naturales (CEDEX, 2013). Valores superiores a 50 indican áridos de baja calidad, inferiores a 20 corresponden a una resistencia al desgaste buena.

Por lo general un árido reciclado sufrirá un desgaste superior a uno natural, pues además de producirse una pérdida de peso del árido natural se eliminará la práctica totalidad del mortero adherido. No obstante, la calidad del hormigón de procedencia influye en el coeficiente de los Ángeles (Salesa Bordanaba, 2014).

Resistencia a la helada

Evalúa la resistencia a la helada de un árido, desde la realización de ciclos hielo-deshielo, a soluciones con sulfato sódico o magnésico. Por lo general el árido reciclado no tiene buen comportamiento a la frente a la helada, además dicha resistencia se ve mermada cuando la relación agua/cemento son superiores a 0,55. La mayoría de estudios al respecto arrojan valores entre el 2 y el 22%, lo cual hace necesario el empleo de aditivos anticongelantes para minimizar ésta problemática.

Cemento-Mortero adherido

La gran diferencia entre un árido reciclado y un árido natural, es sin duda, la presencia de mortero adherido. Las causas por las que el árido reciclado puede presentar mayor o menor cantidad de mortero adherido son varias.

Una de ellas es la relación agua/cemento, dado que cuanto más alta sea, menos cantidad de mortero adherido habrá, ya que su matriz es más débil. Para hormigón reciclado el mortero adherido afectará de forma negativa sus propiedades como en la retracción, fluencia, durabilidad, módulo de elasticidad, coeficiente de Los Ángeles, lo que provocará un aumento de la porosidad, menor densidad y aumento de la absorción, reduciendo así la durabilidad del nuevo hormigón (Estrader Bofarull, 2015).

Cuantas más fases de trituración se produzcan menor será la cantidad de mortero adherido. Estudios japoneses indican que mediante un proceso de trituración utilizando un molino de impactos, el árido grueso de hormigón resultante puede presentar del 35 al 40% de mortero adherido, mientras que llegando a una tercera etapa de trituración tan solo del 7% al 10% (GERD, 2011).

Según indica el CEDEX en su último Catálogo de residuos utilizables en construcción, en general, las arenas recicladas presentan bajos valores del índice equivalente de arena (valores de 29 a 88%, aunque en general por debajo del 70%). No obstante, los resultados indican que en la mayoría de los casos este hecho está relacionado directamente con su alto contenido de finos (valores de 3,3 a 11,4%, habitualmente superiores al 6%) y no con su procedencia arcillosa.

Las arenas recicladas presentan un elevado contenido de partículas ligeras, aunque por debajo del 2% en la mayoría de los casos, y son en general de mortero poroso (CEDEX, 2014).

Autor	Tamaño del AR	Mortero Adherido %	Observaciones
Moon, D.J..(Moon & Moon, 2002)		55/55.7	Probetas trituradas
		41.8/26.2	Estructura de hormigón
Domingo, A. (Domingo, Lázaro, Gayarre, Serrano, & López-Colina, 2010)	4/8	31.5	-
	8/20	18	
Sánchez y Alaejos (Sánchez de Juan & Alaejos, 2012)	4/8	43.7	-
	8/16	25.5	
Pérez-Benedicto, J.A.(J. A. Pérez Benedicto, 2011)	>4	61.7	-
Hansen y Naud (Hansen & Narud, 1983)	4/8	58/64/61	Relaciones a/c de 0.4/0.7/1.2
	8/16	38/39/39	
	16/32	35/28/25	
Katz (Katz, 2003)	2.36/9.5	16/15/13	AGR a edades de 1,3 y 28 días
	9.5/25	7/6/7	
Limbachiya et al.(Limbachiya, Leelawat, & Dhir, 2000)	5/10	11.5	Origen en planta de reciclado
	10/20	9.3	

Tabla 4.6. Mortero adherido en el Árido Reciclado (Salesa Bordanaba, 2014)

4.2.2.2. *Propiedades químicas*

Dado que más del 75% del total del hormigón lo constituye el árido, la composición química de los escombros de hormigón depende de la composición del árido utilizado en su producción. El resto serán componentes de hidratación del cemento, silicatos y aluminatos cálcicos hidratados o hidróxidos cálcicos. En función del árido utilizado (calizo o síliceo) se pueden distinguir las siguientes composiciones químicas:

Compuestos	Escombros silíceo (%)	Escombros calizo (%)
SiO ₂	45-60	4-5
Al ₂ O ₃	15-20	1-2
Fe ₂ O ₃	2-5	1-2
CaO	5-7	52-54
MgO	0,5-1,5	0,2-0,8

Tabla 4.7. Composición química de los escombros cerámicos (CEDEX, 2014)

Cloruros y Sulfatos

La caracterización química de los áridos reciclados potencialmente peligrosos que contienen iones cloruro (principalmente debidos a un ambiente salino) o sulfato (principalmente debidos a la presencia de yeso) es de vital importancia para evitar daños. No obstante, en investigaciones sobre degradación química por contaminación con cloruros o sulfatos de los áridos reciclados, no se observa ninguna degradación frente a la acción de los cloruros sobre las propiedades de hormigón no armado, debido a que no requiere acero de refuerzo al que puede afectar. Sin embargo, en presencia de sulfatos puede producirse algún hinchamiento causado por la formación de etringita lo que puede afectar su durabilidad (CEDEX, 2014).

Cabe decir que, si el árido reciclado procede de escombros de hormigón, lo habitual es que se obtengan resultados favorables al determinar el contenido de sulfatos, cumpliendo, en general, las especificaciones que establece la vigente *Instrucción Española del Hormigón Estructural EHE-08* (en adelante, EHE-08). En el caso de las arenas recicladas procedentes de hormigón, se obtienen elevados contenidos de sulfatos solubles en ácido en la mayoría de los casos, relacionados con la pasta de cemento adherida a las partículas. Sin embargo, los sulfatos presentes en la pasta de cemento del hormigón original, y consecuentemente en el árido reciclado obtenido, no van a producir problemas expansivos en el hormigón nuevo.

En ocasiones particulares, si el árido reciclado se obtiene de residuos procedentes de edificación, el valor del contenido de sulfatos puede ser muy elevado y en este caso perjudicial ya que en general está asociado a la presencia de contaminantes como el yeso. Ejemplo de ello es que los escombros de mampostería pueden utilizarse en terraplenes y obras de tierra con las adecuadas condiciones de homogeneidad y limpieza, siendo muy recomendable eliminar el yeso por la posibilidad de causar reacciones expansivas (CEDEX, 2014).

Contaminantes

Dos factores influyen en la presencia de contaminantes: el procesamiento y el origen del hormigón. Entre los principales posibles contaminantes en los áridos reciclados se pueden considerar: las arcillas y suelos en general; el betún, los polímeros y los filleres expansivos procedentes de los sellados de juntas, el yeso, los ladrillos, materiales orgánicos, metales, vidrio, áridos ligeros, partículas de hormigón dañadas en un incendio, diversas sustancias reactivas y hormigón de cemento aluminoso.

La presencia de contaminantes en los áridos reciclados debe evaluarse y limitarse para controlar los efectos sobre el producto a que vayan a ser destinados.

Por un lado, la gran heterogeneidad de los áridos reciclados y la incorporación de algunas impurezas, puede producir contaminación por lixiviados, especialmente si el árido reciclado se utiliza en aplicaciones diferentes al hormigón, como rellenos o carreteras, y cuando proceden de residuos de edificación, donde la concentración de impurezas es mayor. Sin embargo, los ensayos consultados de lixiviación sobre el árido reciclado, así como sobre el hormigón reciclado fabricado con él, resultan en todos los casos favorables, satisfaciendo las diferentes normativas (Etxeberria et al., 2007).

Por otro lado, el contenido de impureza perjudica las propiedades del nuevo material, pudiendo provocar: descenso de resistencia, ataque por sulfatos por impurezas de yeso, reacciones álcali-árido si existen impurezas de vidrio, etc. (Estrader Bofarull, 2015).

4.2.3. Producción del árido reciclado

El procesamiento de los RCDs se divide en dos fases, la primera consistente en la demolición de los materiales y la segunda en su tratamiento. A nivel esquemático, la siguiente figura muestra las distintas fases que componen el ciclo al que son sometidos los RCDs:

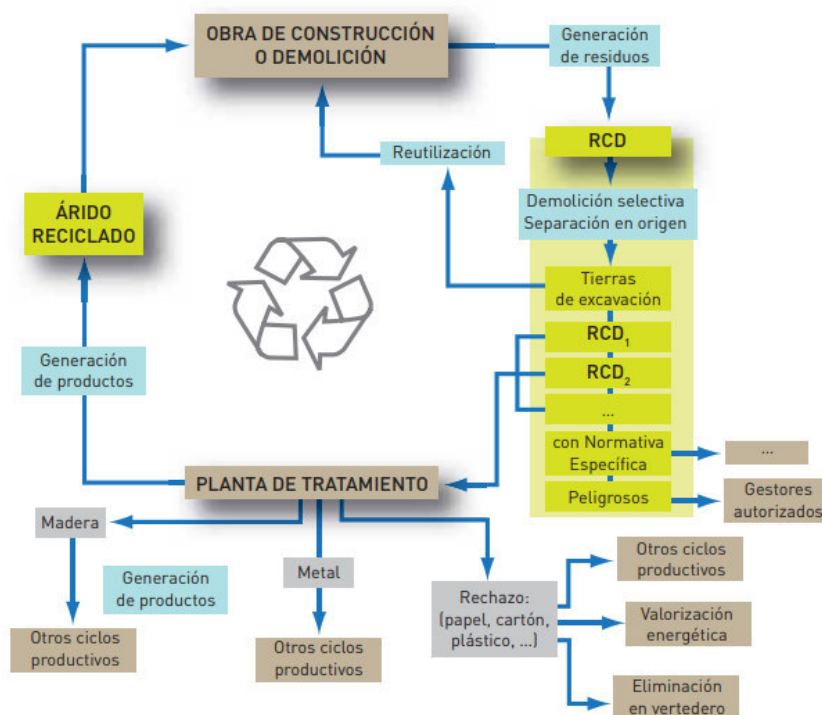


Figura 4.5. Ciclo cerrado de los RCDs (Ihobe, 2009)

4.2.3.1. Demolición

La demolición de estructuras de edificación o de obras civiles es el origen de la producción de áridos reciclados. Hay que prestar especial atención en los escombros que van a ser reciclados, puesto que conviene utilizar métodos de demolición que reduzcan in situ los escombros a tamaños que puedan ser tratados por el triturador primario de la planta de reciclaje (menores de 1200 mm en plantas fijas y de 400-700 mm para plantas móviles) (CEDEX, 2014).

Por otro lado, en la clasificación de los residuos durante la demolición, se debe evitar la contaminación de los residuos de hormigón con otros como madera, papel, cartón, yeso y plástico. Aunque inicialmente la clasificación encarece el proceso, después facilita la transformación en la planta de reciclado y garantiza una mayor calidad de los productos (Salesa Bordanaba, 2014).

4.2.3.2. Tratamiento del residuo

Después de la fase de demolición, selectiva o no, el árido es transportado bien a una planta de transferencia o a una de tratamiento.

Se entiende por plantas de transferencia a las instalaciones para el depósito temporal de residuos de la construcción que han de ser tratados o eliminados en

instalaciones localizadas a grandes distancias. Su cometido principal es abaratar costes de transporte, si bien en ocasiones se efectúa en ellas algún proceso menor de triaje y clasificación de las fracciones.

Por su parte, las plantas de tratamiento son instalaciones de tratamiento de RCD, cuyo objetivo es seleccionar, desclasificar y valorizar las diferentes fracciones que contienen estos residuos.

Tabla 4.8. Número de instalaciones operativas en 2013 (PEMAR 2016-2022)

COMUNIDAD AUTÓNOMA	Plantas de transferencia (nº)	Plantas de tratamiento fija (nº)	Plantas de tratamiento móvil (nº)	Vertederos (nº)
Andalucía	92	119	21	71
Aragón	18	6	1	5
Asturias	3	4	5	1
Baleares*	6	2	s/d	1
Canarias	0	23	s/d	7
Cantabria	12	4	12	2
Castilla-la Mancha	s/d	28	27	12
Castilla y León	0	45	0	3
Cataluña	12	50**	0	57
Ceuta	s/d	s/d	s/d	s/d
Comunidad Valenciana	s/d	s/d	s/d	s/d
Extremadura	16	21	1	0
Galicia	3	43	21	5
La Rioja	s/d	16	0	2
Madrid	10	14	0	4
Melilla	s/d	s/d	s/d	s/d
Murcia	2	4	32	19
Navarra	s/d	7	3	7
País Vasco	s/d	s/d	11	s/d
Total	174	386	134	196

s/d: sin datos

* 45 disponen de partes móviles.

La fase consistente en la producción de áridos reciclados a partir de los escombros de hormigón, se lleva a cabo en una planta de tratamiento, móvil o fija, donde se llevará a cabo su transformación. La principal diferencia entre plantas móviles o fijas, a parte de las evidentes en cuanto a su emplazamiento, radica en sus rendimientos de producción; pudiendo llegar hasta las 100 t/h las primeras, y entre 300 y 400 t/h las segundas (RILEM, 1994).

Las plantas de producción de áridos reciclados son bastante similares a las plantas de machaqueo de áridos naturales, puesto que incluyen machacadoras, cribas y dispositivos de transporte (cintas transportadoras, cangilones, etc.). Adicionalmente, disponen de equipos para la eliminación de contaminantes y electroimanes para la separación del acero. El proceso de producción queda dividido en las siguientes etapas:

- **Control de admisión de los residuos:** consiste en una inspección visual, un pesaje de la carga y comprobación del registro de origen. En caso de no cumplir con los requisitos se deniega el acceso a la planta de carga.

- **Tratamiento previo:** en esta etapa se excluyen los materiales tóxicos y peligrosos para que sean procesados por el gestor correspondiente. También se procede a una separación manual y/o mecánica de los tamaños más voluminosos.

Se procede a la eliminación de la parte más fina del material recibido. Mediante una criba, se selecciona sólo el material de tamaño superior a 80 o 60 mm para su posterior procesamiento. El resto del residuo, formado fundamentalmente por arcillas y arenas, se puede utilizar como relleno en función de su calidad.

- **Clasificación y limpieza:** de forma mecánica se separan las diferentes fracciones de residuo. También se separan los residuos contaminantes, madera, plásticos, envases, etc. que hayan podido llegar hasta esta fase.

- **Lavado:** el proceso de lavado y soplado completa la clasificación y separación de los elementos que tienen origen distinto al hormigón.

- **Trituración, cribado y acabado:** para la producción de áridos, las trituradoras más habituales emplean una combinación de cuatro mecanismos básicos: impacto, fricción, corte y compresión, con lo cual se produce la fracción del material.

Dada la escasa relación de trituración, se hace imprescindible efectuar la trituración en 2 o 3 escalones llamados normalmente trituración primaria, secundaria y terciaria.

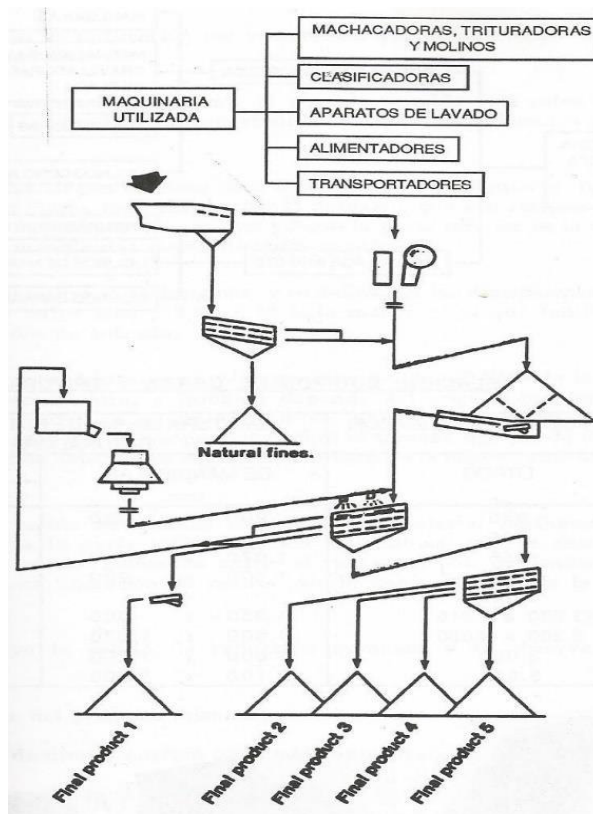


Figura 4.6. Procesamiento de áridos (Tiktin, 1998)

El material se somete a una primera trituración, habitualmente mediante una trituradora de impactos o una machacadora de mandíbulas, que rompe los grandes bloques de hormigón hasta reducirlos a un tamaño comprendido entre 50 y 150 mm. A la salida de la machacadora se eliminan mediante una cinta magnética las armaduras y otros materiales metálicos que puedan contener los escombros.

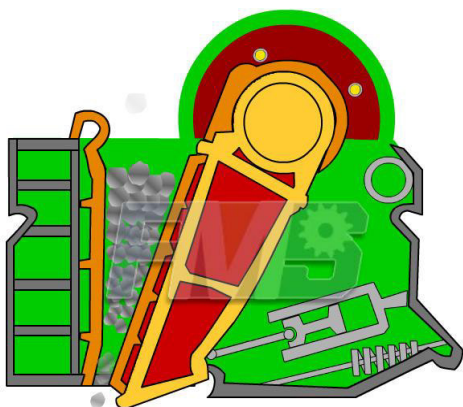


Figura 4.7. Machacadora de mandíbulas (FMB Co.Ltd., s. f.)

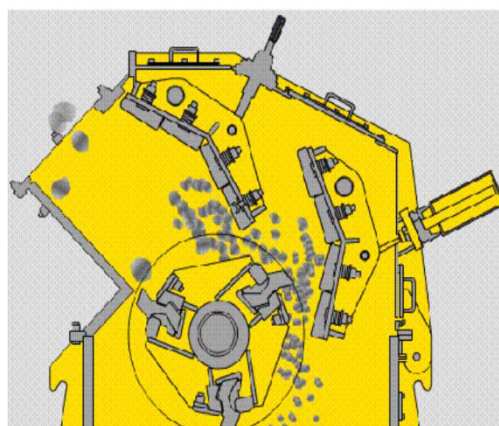


Figura 4.8. Tritradora de impactos (FMB Co.Ltd., s. f.)

Posteriormente, se realiza una separación manual de los elementos contaminantes de mayor tamaño, como pueden ser plásticos, papeles, vidrios, etc. El material limpio resultante, se pasa por cribas vibratorias que hacen un corte granulométrico por el tamaño 20 mm. El material de tamaño inferior a 20 mm se deposita en acopios separados mediante unas cintas transportadoras, mientras el material de tamaño superior continúa su procesamiento.

El siguiente paso es una trituración secundaria del material, para la que puede utilizarse de nuevo una trituradora de impactos o bien de cono. El material triturado se criba por un tamiz, normalmente de 40 o 60 mm, retornando el rechazo a la trituradora secundaria, y acopiándose la fracción correspondiente, 0/40 o 0/60 mm (para zahorras) o bien se puede realizar algún cribado adicional para separar la grava de la arena (áridos para hormigón).

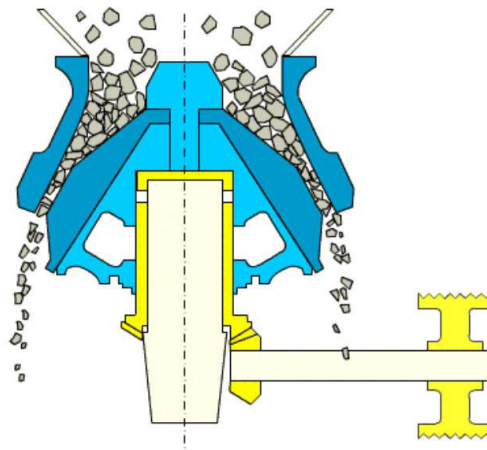


Figura 4.9. Trituradora de cono (FMB Co.Ltd., s. f.)

Hay que tener en cuenta que las características de los áridos reciclados varían en función del número de fases de trituración y del tipo de trituradora utilizada. Con la trituradora de mandíbulas se obtienen áridos reciclados más apropiados para la fabricación de hormigón (áridos con buen coeficiente de forma adecuado, buena trabajabilidad), en cambio, con la trituradora de impacto se consiguen áridos reciclados más apropiados para su utilización en obras lineales (áridos resistentes con elevado porcentaje de caras de fractura).

4.2.4. Valorización

Como se ha señalado en apartados anteriores, en España una parte importante de los RCDs generados se depositan en vertederos, a pesar de las ventajas que la actividad recicladora presenta, entre otras:

- Alargamiento de la vida útil de los vertederos.
- Menor impacto ambiental al disminuir la actividad en las canteras.
- Ahorro en el transporte de los RCDs y de materias primas.

En este apartado se detallan datos históricos sobre la experiencia práctica del uso de áridos reciclados en España, a través de las informaciones técnicas correspondientes a obras realizadas con áridos reciclados suministradas por empresas de reciclaje españolas.

También se recopilan informaciones sobre productos y tipos de aplicaciones en todas las obras realizadas durante el año 2008 con áridos reciclados comercializados por las plantas de reciclaje colaboradoras con la GERD. En conjunto sumaron un total de 566.510 toneladas suministradas (aproximadamente el 10% de la producción total estimada de áridos reciclados en el año 2008). Si bien los datos se presentan sin ponderar, con la producción individual de cada planta. Por este motivo no deben considerarse representativos de la producción total sino solamente de las plantas de reciclaje analizadas.

4.2.4.1. Aplicaciones de los áridos reciclados de hormigón

En la actualidad en España los áridos reciclados suelen aplicarse en construcción de rellenos, terraplenes y explanadas, bases y sub-bases de carreteras. Y en menor medida en estructuras de edificación y obra civil.

Como se ha comentado anteriormente, los RCDs pueden estar compuestos por varios materiales, según la mezcla se distinguen los siguientes tipos (GERD, 2011):

- Áridos reciclados de hormigón
- Áridos reciclados mixtos de hormigón
- Áridos reciclados cerámicos y mixtos de cerámicos
- Áridos reciclados mixtos con asfalto

Según refleja la *Guía Española de Áridos Reciclados Procedentes de Residuos de Construcción y Demolición (Proyecto GEAR)* el 70% de los áridos comercializados corresponde a material de carácter mixto mientras que el 28% corresponde a material procedente de residuos de hormigón.

El producto reciclado más utilizado viene siendo el árido reciclado mixto en la fracción todo uno (47,1% del total de las toneladas comercializadas en 2008), seguido del árido reciclado de hormigón, también en la fracción todo uno (17,95% del total).

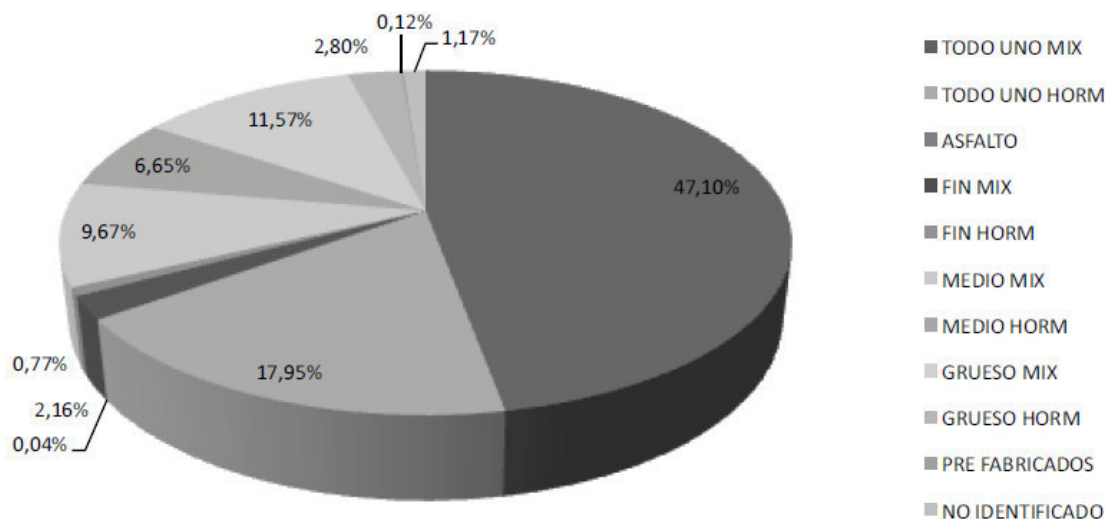


Figura 4.10. Áridos reciclados comercializados en 2008 según su composición y fracción (GERD, 2011)

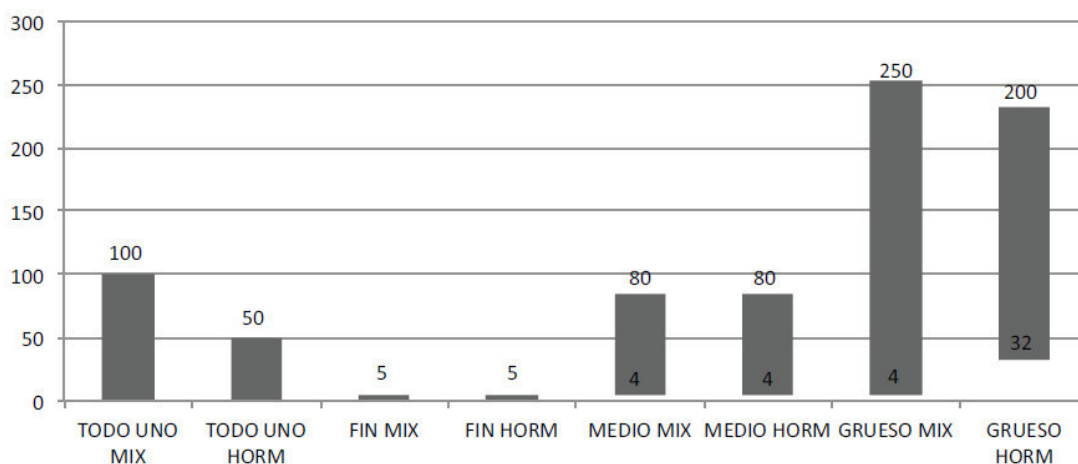


Figura 4.11. Rangos granulométricos de los áridos reciclados comercializados (GERD, 2011)

Respecto a los datos presentados para los áridos reciclados de hormigón con fracción todo uno, se concluye que el principal uso de este material es en bases y sub bases de carretera (cerca de 52%).

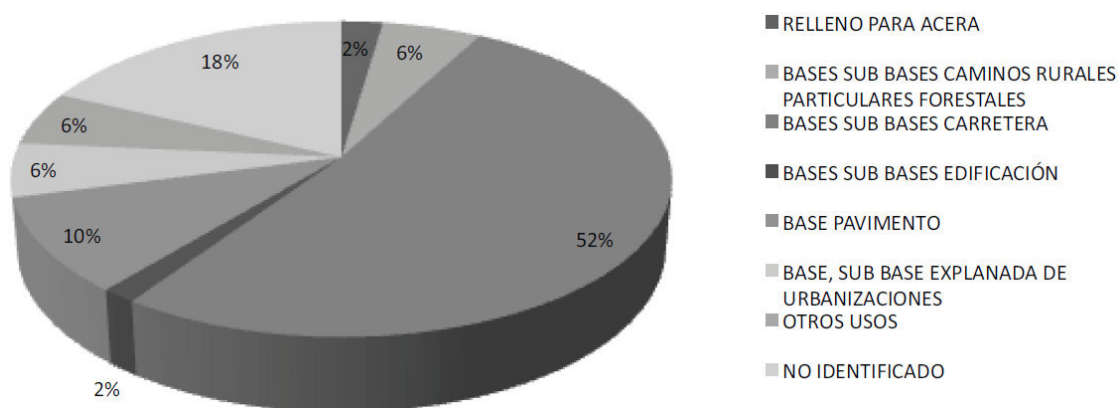


Figura 4.12. Aplicaciones identificadas para el Todo Uno de Hormigón (GERD, 2011)

Respecto a las obras realizadas con los áridos reciclados clasificados como gruesos o grava, se observa una tendencia mayor al uso de áridos gruesos de hormigón en rellenos diversos (cerca de 42%) y de adecuación de caminos (cerca de 35%). Los áridos gruesos también han presentado alto porcentaje de toneladas destinadas a obras pequeñas y sin identificación. El árido grueso de hormigón presenta el 22% de su total (comercializado en 2008) destinado a usos no identificados.

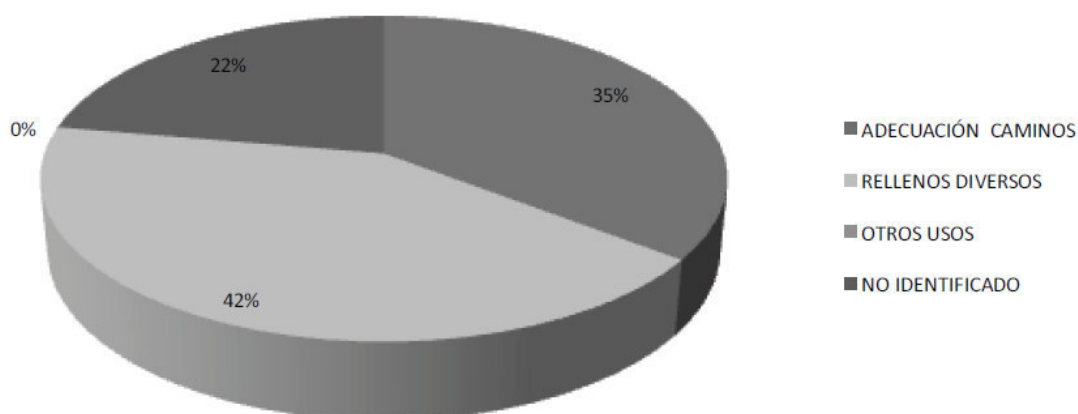


Figura 4.13. Aplicaciones identificadas para el Árido Grueso de Hormigón (GERD, 2011)

Los áridos reciclados de fracción media se comercializan como gravilla. Para el árido de hormigón de fracción media, el principal uso es como áridos no ligados para bases y sub bases de carretera (cerca de 59%). Este porcentaje es similar al presentado por el todo uno de hormigón, lo que confirma el uso de este tipo de árido en obras de este carácter. Igual que en el caso del todo uno mixto, aproximadamente el 15% del total de las toneladas comercializadas han sido destinadas a obras no identificadas.

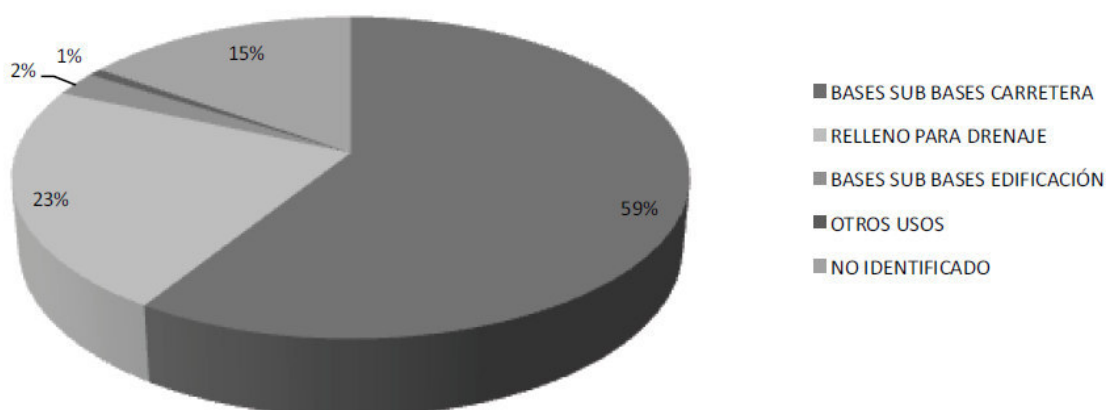


Figura 4.14. Aplicaciones identificadas para el Árido Medio de Hormigón (GERD, 2011)

Finalmente, respecto a los áridos reciclados de hormigón de fracción fina, se observa una fuerte tendencia de uso de estos materiales en relleno de servicios (cerca de 46% del total de toneladas comercializadas en 2008). Sin embargo, se observa un alto porcentaje de toneladas sin uso identificado, lo que sugiere que la comercialización de este tipo de material se esté realizando en una cantidad pequeña; cabe recordar su escaso peso con respecto al resto de áridos reciclados comercializados (ver Figura 4.10).

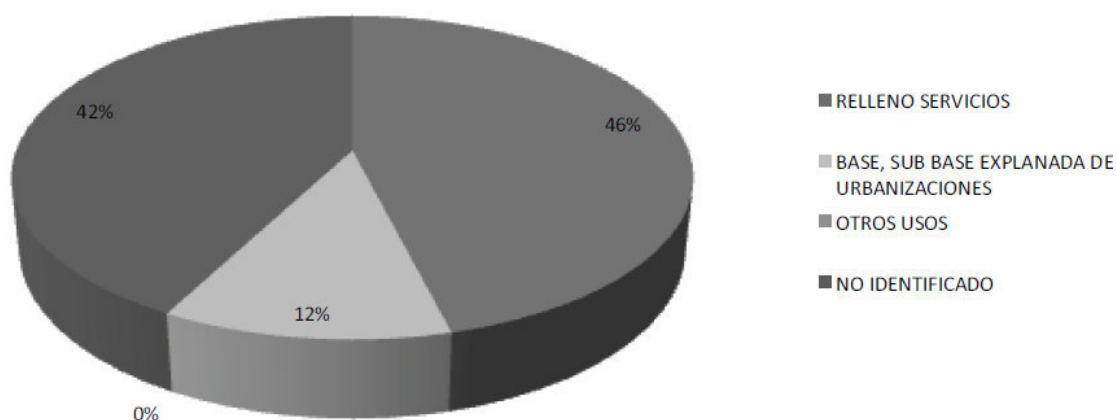


Figura 4.15. Aplicaciones identificadas para el Árido Fino de Hormigón (GERD, 2011)

4.2.4.2. Valoración económica

Respecto al coste económico hay una gran disparidad, no existiendo incremento/decremento fijo respecto al árido natural, ya que depende de múltiples factores (distancias, calidad de los RCDs, canon de vertido, etc.).

Con arreglo a la legislación española, según la Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados, con las modificaciones introducidas en la Ley 5/2013, las tasas de vertedero de residuos sólidos inertes en España son de competencia municipal, encontrándose una gran variación entre los distintos municipios, tanto en las

cuotas de las tasas como en su forma de aplicación. Así, en cuanto a este último, existen municipios que aplican una tarifa única de vertido, mientras que otros aplican diferentes tasas según la naturaleza del residuo.

Como ejemplo, se muestran tasas de varias capitales de provincia españolas, con el fin de tener una idea representativa.

Entre los municipios que tienen una tarifa única de vertido, se pueden encontrar precios que varían entre 1 euro/t (Pamplona) y 25,20 euros/t (Madrid). Dentro de los municipios que poseen diferentes tasas, los residuos inertes limpios tienen una tasa de vertido inferior a la de los residuos mezclados, pudiendo variar entre 2 y 10 euros/t la tasa de vertido de residuos inertes limpios, y entre 8 y 30 euros/t si están mezclados.

También las plantas que producen áridos reciclados admiten el depósito de residuos inertes. En la siguiente tabla se incluyen algunos precios de admisión de los residuos en las plantas de reciclado:

	Madrid	Albacete	Córdoba
RCDs mezclados	10,00 euros/t	16,00 euros/t	8,50 euros/t
RCDs de hormigón armado	5,00 euros/t	20,00 euros/t	6,70 euros/t
Hormigón limpio en masa	3,50 euros/t	9,00 euros/t	4,00 euros/t
Escombros muy sucios	-	25,00 euros/t	30,05 euros/t

Tabla 4.9. Costes de admisión de RCDs en una planta de reciclado (CEDEX, 2014)

Por otra parte, si se comparan los precios de los áridos naturales con los de los reciclados, para el caso de las gravas naturales pueden variar entre 6 y 12 euros/t y entre 5 y 13 euros/t para las arenas, mientras que los precios de los áridos reciclados suelen ser inferiores, según se recoge en la siguiente tabla (todos los precios han sido extraídos de la última edición del *Catálogo de residuos utilizables en construcción* publicado en 2014 por el CEDEX).

TARIFAS DE VENTA DE ARIDOS RECICLADOS		
	Madrid	Córdoba
Zahorra de hormigón 0-20 mm	3,00 euros/t	2,40 euros/t
Zahorra de hormigón 0-40 mm	4,00 euros/t	4,20 euros/t
Grava de hormigón 20-40	4,00 euros/t	4,20 euros/t
Cerámico-hormigón 0-40 mm	3,50 euros/t	3,00 euros/t
Cerámico-hormigón 20-40 mm	1,00 euros/t	3,00 euros/t
Material para relleno 0-6 mm	2,00 euros/t	1,80 euros/t

Tabla 4.10. Precio de los áridos reciclados (CEDEX, 2014)

4.2.4.3. Objetivos establecidos por el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente

Desde el PNIR 2008-2015, quedó fijada la separación y gestión de forma ambientalmente correcta de los residuos peligrosos (en adelante, RP) procedentes de RCD en un 100%. Si bien, en el vigente PEMAR establecido por el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (en adelante, MAGRAMA), se establecen objetivos cuantitativos sobre RCDs (ver Tabla 4.11), orientados al cumplimiento de lo previsto en la Directiva Marco 2008 de Residuos para este flujo de residuos. Dicha Directiva establece, que antes de 2020, la cantidad de residuos no peligrosos de construcción y demolición destinados a la preparación para la reutilización, el reciclado u otra forma de valorización, deberá alcanzar como mínimo el 70% en peso de los residuos generados.

	2016	2018	2020
% RCD no peligrosos destinados a la preparación para la reutilización, el reciclado y otras operaciones de valorización (con exclusión de las tierras y piedras limpias) (mínimo)	60	65	70
Eliminación de RCD no peligrosos en vertedero (en %) (máximo)	40	35	30
% de tierras y piedras limpias (LER 17 05 04) utilizadas en obras de tierra y en obras de restauración, acondicionamiento o relleno (mínimo)	75	85	90
Eliminación de tierras y piedras limpias (LER 17 05 04) en vertedero (en %) respecto del volumen total de materiales naturales excavados. (máximo)	25	15	10

Tabla 4.11. Objetivos para RCDs para los años 2016, 2018 y 2020 (PEMAR 2016-2022)

Por otra parte, la RCDA alerta en su último Informe de Producción y Gestión de Residuos de Construcción y Demolición (RCD) en España, que en el periodo 2011-2015 la valorización media realizada a los RCD fue del 39%, lo que supone que todavía se deberían valorizar el 31% de los RCD que producidos antes del año 2020. Por otro lado, ese mismo Informe refleja que el sólo el 70% de todos los RCD producidos acceden a instalaciones de gestores autorizados (plantas de tratamiento y/o vertederos).

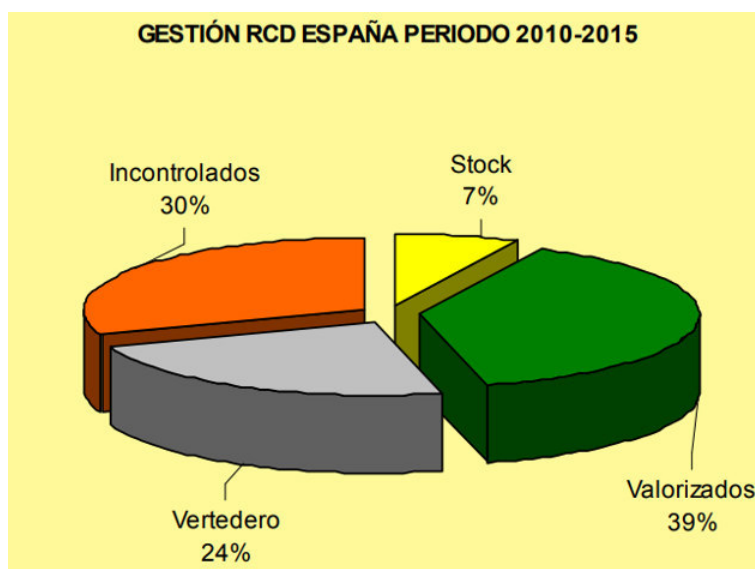


Figura 4.16. Gestión RCDs en España en el periodo 2010-2015 (RCDA, 2017)

Por su parte, el PEMAR 2016-2022 también establece tanto objetivos cualitativos para incrementar la calidad del material tratado, como orientaciones para la consecución de los objetivos del Plan. De todas ellas a continuación se detallan aquellas que puedan tener su incumbencia en este TFG:

- Fomentar una mayor utilización de los materiales procedentes de la gestión de los RCD. Con esta finalidad se pueden utilizar instrumentos tales como el aumento de las tasas de vertido para desincentivar el depósito de residuos de RCD valorizables.
- Fomentar la utilización (valorización) de materiales naturales excavados en la construcción de obras de tierra (terraplenes, pedraplenes y rellenos todo-uno) y en obras de acondicionamiento o relleno y establecer criterios ambientales para el uso de otros materiales procedentes del tratamiento de RCD no peligrosos en esos destinos.
- Introducción de criterios en la contratación pública que incluyan porcentajes mínimos de uso de material reciclado en obra pública, así como en obras privadas. Así se propone la inclusión, siempre que sea posible, en los proyectos

de construcción de obra pública y privada de un porcentaje mínimo del 5 % de áridos reciclados.

- Se analizará la oportunidad de promover la aplicación del fin de la condición de residuo a los áridos procedentes de RCD, o la exención de la autorización de gestor prevista en el Artículo 28 de la Ley 22/2011, a quienes realicen la operación de valorización del material tratado.
- Promocionar la utilización de los materiales procedentes de los RCD valorizables en las obras de construcción, tales como obras de tierra, de capas estructurales (sub-bases de carretera, capa de forma y sub-balasto en obras de ferroviarias), etc., siempre y cuando se garantice que los materiales reciclados cumplan los requisitos de calidad y prescripciones de la normativa vigente en cada caso. A tal fin, se fomentará que en los Pliegos de Prescripciones Técnicas de las obras y en la valoración de las ofertas en la contratación pública se incluyan condiciones que faciliten el empleo de los materiales procedentes de RCD valorizables antes mencionados en sustitución de los materiales naturales.
- La Administración General del Estado y las demás administraciones públicas fomentarán que en los proyectos de obra se tengan en cuenta las alternativas de diseño y constructivas que generen menos residuos en la fase de construcción.
- Fomentar mediante Proyectos de I+D+i., el desarrollo de tecnologías destinadas a la transformación de los RCD en materiales reciclados de alta calidad y durabilidad.

4.2.5. *Marco normativo*

En 1985, la Unión Europea decidió establecer en el marco de un mercado único unas especificaciones técnicas comunes a todos los países miembros, que afectan también a los materiales reutilizados. La legislación de referencia está formada por el Reglamento (UE) nº 305/2011 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 9 de marzo de 2011, por el que se establecen condiciones armonizadas para la comercialización de productos de construcción y se deroga la Directiva 89/106/CEE del Consejo. Así como las siguientes Normas Armonizadas publicadas hasta la fecha y recogidas en la *Guía Española de Áridos Reciclados Procedentes de Residuos de Construcción y Demolición*:

- UNE-EN 12620. Áridos para hormigón.

- UNE-EN 13043. Áridos para mezclas bituminosas y tratamiento superficiales de carreteras, aeropuertos y otras zonas pavimentadas.
- UNE-EN 13055-1. Áridos ligeros. Parte 1: Áridos ligeros para hormigones, morteros y lechadas.
- UNE-EN 13139. Áridos para morteros.
- UNE-EN 13242. Áridos para capas granulares y capas tratadas con conglomerantes hidráulicos para uso en capas estructurales de firmes de carreteras.
- UNE-EN 13383-1. Escolleras. Parte 1: Especificaciones.
- UNE-EN 13450. Áridos para balasto.

Por su parte, la Asociación Española de Reciclaje de Residuos de Construcción y Demolición (en adelante, RCD Asociación), propone el siguiente marco legal básico a nivel nacional aplicable a los RCDs:

Orden APM/1007/2017, de 10 de octubre, sobre normas generales de valorización de materiales naturales excavados para su utilización en operaciones de relleno y obras distintas a aquéllas en las que se generaron. Inerte adecuado.

- Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos (PEMAR) 2016-2022.
- El Real Decreto 180/2015, de 13 de marzo, por el que se regula el traslado de residuos en el interior del territorio del Estado.
- Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados.
- Real Decreto 105 / 2008 por el que se regula la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición.
- El II Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición 2008-2015. (II PNRCD).
- Real Decreto 1481 / 2001, de 27 de diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero.
- La Decisión de la Comisión, de 22 de enero de 2001, que modifica la Decisión 2000/532/CE de 3 de mayo de 2000.

Con arreglo a la legislación española, según la Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados, con las modificaciones introducidas en la Ley 5/2013, las competencias sobre el control de producción y gestión corresponde a las Comunidades Autónomas, a excepción de los RCDs procedentes de obras menores domiciliarias, cuya gestión (al menos la recogida, transporte y eliminación) corresponde a las Entidades Locales.

Por su parte, como consecuencia a la necesidad de adaptación de la normativa técnica española a las nuevas normas armonizadas, desde 2001 se han ido actualizando una serie de artículos del *Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Conservación de Carreteras* (en adelante, PG-4) y del PG-3, haciendo mención expresa sobre reciclado de firmes en el primero, y a la utilización, en las capas de firme, de materiales granulares reciclados en el segundo (GERD, 2011).

4.2.5.1. Normativa técnica aplicable al uso de RCDs en obra civil

En el sector de la construcción y en nuestra sociedad, cada vez es más habitual la necesidad de reciclar, para proteger el medio ambiente, aprovechar los recursos y revalorizar un material de desecho. La utilización de árido reciclado es cada vez más habitual en el campo de la construcción, en ámbitos muy variados como son la construcción de explanaciones (terraplenes y rellenos), capas de firmes de carreteras, o en la fabricación de hormigón.

En función de lo restrictivas que sean las aplicaciones y de la naturaleza del material reciclado, se le dotará de un uso u otro. Por ejemplo, mientras que para explanaciones se suelen utilizar materiales procedentes tanto de residuos cerámicos, como de asfalto, de hormigón o mezclas de estos, para otras aplicaciones más restrictivas, como la fabricación de hormigón, los materiales reciclados suelen proceder de residuos de hormigón o en algunos casos de mezcla de residuos de hormigón y cerámicos.

Es por todo ello, que cada una de las distintas aplicaciones obliga a fijar unos u otros niveles de exigencias en las propiedades del árido reciclado. A continuación, se detallan los articulados de las distintas normativas técnicas españolas, que incumben a la utilización de los RCDs en el ámbito constructivo de las obras civiles más frecuentes.

Terraplenes y rellenos en carreteras

Las especificaciones técnicas que se refieren a la utilización de materiales reciclados en terraplenes y rellenos en carreteras se recogen en apartado 330.3.2, MATERIALES, Características de los materiales, del Artículo 330. Terraplenes. (OM FOM 1382/2002) y en el apartado 332.3, MATERIALES, del Artículo 332. Rellenos localizados. (OM FOM 1382/2002) del PG-3.

Capas de firmes de carreteras

En lo referente a los firmes de carreteras, los artículos actualizados, que contemplan la posibilidad de uso de estos materiales reciclados, se encuentran esencialmente dentro del PG-3 y el PG-4.

Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes. (PG-3)

- Artículo 510. Zahorras. (OM FOM 891/2004) apartados 510.2.1, MATERIALES, Consideraciones generales, 510.2.2.1, Áridos, Características generales, y 510.2.2.2, Áridos, Composición química.
- Artículo 513. Materiales tratados con cemento (suelocemento y gravacemento). (OM FOM 891/2004) apartados 513.2.1, MATERIALES, Consideraciones generales, 513.2.3.1 Materiales granulares, Características generales y 513.2.3.4.1, Características específicas del árido para gravacemento, Árido grueso.
- Artículo 540. Microaglomerados en frío. (OM FOM 891/2004) apartados 540.2.1, MATERIALES, Consideraciones generales, 540.2.3.1, Áridos, Características generales.
- Artículo 542. Mezclas bituminosas en caliente tipo hormigón bituminoso. (OC 24/2008) apartado 542.2.3.1, MATERIALES, Áridos, Características generales.
- Artículo 543. Mezclas bituminosas para capas de rodadura. Mezclas drenantes y discontinuas. (OC 24/2008) apartados 543.2.1, MATERIALES, Consideraciones generales y 543.2.3.1, Áridos, Características generales.
- Artículo 550. Pavimentos de hormigón. (OM FOM 891/2004) apartados 550.2.4.1, MATERIALES, Áridos, Características generales y 550.2.4.2.1, Árido grueso, Características generales.

- Artículo 551. Hormigón magro vibrado. (OM FOM 891/2004) apartados 551.2.4.1, MATERIALES, Áridos, Características generales y 551.2.4.2, Árido grueso.

Si bien, en cada uno de los citados artículos, en el apartado sobre características generales de los áridos, se incluyen párrafos en los que se indica que el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares (en adelante, PPTP), o en su defecto el Director de las Obras, podrá exigir propiedades o especificaciones adicionales a las que figuren en el artículo cuando se vayan a emplear áridos cuya naturaleza o procedencia así lo requiera. También se hace referencia a la inalterabilidad que se debe exigir a los materiales, debiendo el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares o, en su defecto, el Director de las obras fijar los ensayos para determinarla. Asimismo, se exige que los áridos no originen disoluciones con el agua que puedan causar daños a estructuras u otras capas del firme, o contaminar corrientes de agua.

Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Conservación de Carreteras. (PG-4)

- Artículo 20. Reciclado in situ con emulsión de capas bituminosas. (OC 8/2001)
- Artículo 21. Reciclado in situ con cemento de capas de firme. (OC 8/2001)
- Artículo 22. Reciclado en central en caliente de capas bituminosas. (OC 8/2001)

Infraestructuras ferroviarias

Por su parte, en infraestructuras ferroviarias, la Orden FOM/1631/2015, de 14 de julio, por la que se aprobó la *Instrucción para el proyecto y construcción de obras ferroviarias IF-3. Vía sobre balasto. Cálculo de espesores de capas de la sección transversal* (en adelante, IF-3), en su apartado 4, Materiales de la plataforma, no restringe explícitamente el uso de áridos reciclados. No obstante, quedan reflejadas tanto en la IF-3 como en el vigente *Pliego General de Prescripciones Técnicas tipo para los proyectos de plataforma* (en adelante, PGP-2011), las condiciones que deben presentar los suelos en función de su emplazamiento en la sección transversal de rellenos artificiales que sirvan de soporte a la capa de forma y al resto de las capas de asiento de la línea ferroviaria, y de la calidad a alcanzar en la infraestructura.

Por otro lado, según lo indicado por la Orden FOM/1269/2006, de 1 de mayo, por la que queda aprobado el *Pliego de Prescripciones Técnicas Generales de Materiales Ferroviarios. Subbalasto*. (en adelante, PF-7), ofrece como opción válida en el apartado

2.1, CARACTERÍSTICAS DEL SUBBALASTO, Origen y naturaleza, la reutilización de materiales de naturaleza rocosa procedentes de obras civiles en esta sección de la superestructura.

Presas de materiales sueltos

La Orden de 12 de marzo de 1996 por la que el Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente aprobó el último Reglamento Técnico sobre Seguridad de Presas y Embalses cita en su Artículo 20. Materiales. que será el proyecto constructivo quién deberá definir los materiales, fijar las características que deben cumplir y concretar los procedimientos para su comprobación y control.

Para la construcción de presas deberán emplearse materiales cuyas propiedades intrínsecas, su puesta en obra y la evolución de sus características sean susceptibles de control, lo cual deja abierta la posibilidad al empleo de áridos reciclados.

El Reglamento es de aplicación obligatoria a las presas y embalses cuyo titular sea el Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente o los Organismos autónomos de él dependientes. También será de aplicación a aquellas presas y embalses que sean objeto de concesión administrativa por dicho Ministerio u sus organismos autónomos.

Hormigones

La instrucción de referencia vigente en España (EHE-08), publicada El 18 de julio de 2008, fue complementada con anejos que indican el uso de áridos reciclados en la producción de hormigones. Siendo una de las razones la de reforzar normativamente el uso del árido reciclado en la producción de hormigón, con objeto de incluir criterios de sostenibilidad que acerquen a España a los objetivos marcados por la Directiva 2008/98/CE sobre residuos refrendada por el Parlamento Europeo (Salesa Bordanaba, 2014). En consecuencia, la Instrucción contempla los siguientes anejos:

- ANEJO 13. Índice de contribución de la estructura a la sostenibilidad.
- ANEJO 15. Recomendaciones para la utilización de hormigones reciclados.
- ANEJO 18. Hormigones de uso no estructural.

Morteros

La fabricación de morteros es la única aplicación constructiva contemplada normativamente en España, en la que se permite el empleo de una fracción fina

reciclada. Se considera, sin embargo, que las arenas recicladas son únicamente adecuadas para la fabricación de morteros de baja resistencia (hasta 15 MPa), en los que no ocasionan una bajada de resistencia apreciable y la consistencia obtenida es similar a la que proporcionan arenas naturales calizas. Ello se debe a que, en relación a un árido fino natural, el reciclado procedente de machaqueo de hormigón presenta incrementos en la relación agua/cemento entre 0,18 y 0,45 (CEDEX 2013).

Por tanto, el uso de las arenas recicladas es considerado en las siguientes Normas Armonizadas Europeas publicadas hasta la fecha:

- UNE-EN 998-1:2016. Especificaciones de los morteros para albañilería. Parte 1: Morteros de revoco y enlucido.
- UNE-EN 998-2:2018. Especificaciones de los morteros para albañilería. Parte 2: Morteros para albañilería.

4.3. SUELOS COHESIVOS

Antes de abordar en profundidad la caracterización de la fracción cohesiva de los suelos y su compactación en obra, es conveniente mostrar la notoriedad de las estructuras de tierra en obra civil.

Dichas obras, en su gran mayoría infraestructuras lineales (de carreteras y ferroviarias principalmente), pueden considerarse la integración de una serie de “estructuras” que soportan el firme por el que han de discurrir los vehículos o medios de transporte usuarios de las mismas. Estas serán, bien estructuras de tierra formadas a partir de la compactación de materiales sueltos (terraplenes, pedraplenes o escolleras), estructuras formadas por el propio terreno natural y/o estructuras de fábrica.

Además de los terraplenes (tamaño máximo menos a 100-150 mm y bajo contenido en finos), pedraplenes (fragmentos rocosos) y escolleras (bloques de roca entorno al metro cúbico) para infraestructuras lineales, las estructuras de tierra también se utilizan para otros fines, como presas de materiales sueltos, diques de abrigo o, simplemente, rellenos marítimos o terraplenes para conseguir plataformas horizontales (González de Vallejo et al., 2004).

4.3.1. Caracterización

Tal y como propone Luis Ortuño en el libro *Ingeniería Geológica*, los suelos están formados por partículas sólidas y huecos (reellenos parcial o totalmente por fluidos), pudiéndose clasificar en función del tamaño de las partículas en dos tipos:

- **Suelos de grano fino o suelos finos** (con cernido por el tamiz ASTM N.º 200 de 0,074 mm de 50 % para el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (en adelante, USCS), formados principalmente por limos y minerales de arcilla, como caolinitas, ilitas, esmectitas y materia orgánica, entre otros.
- **Suelos de grano grueso o granulares** (con tamaños inferiores a 0,074 mm menores del 50%), formados principalmente por gravas o arenas de cuarzo, feldespato y calcita: y sulfatos, sales y vidrios volcánicos, con menos frecuencia.

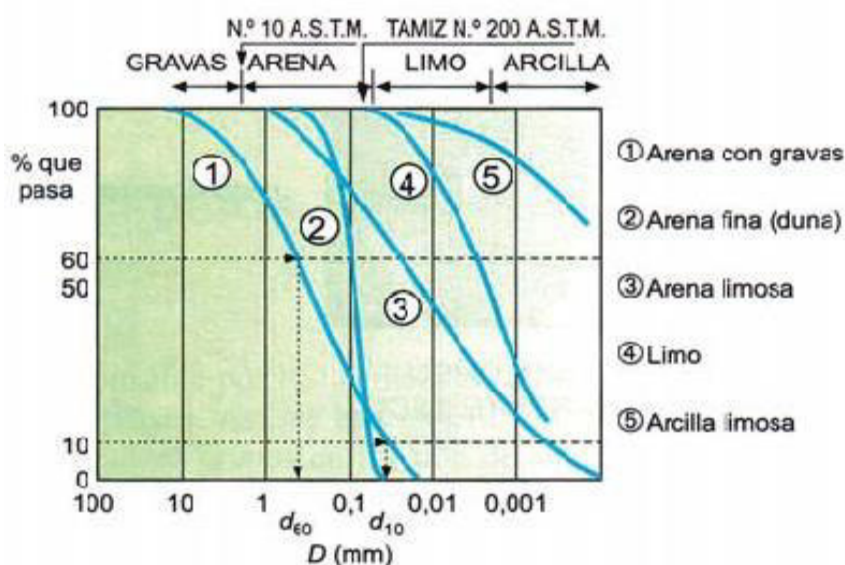


Figura 4.17. Granulometría de partículas (González de Vallejo et al., 2004)

Ambos tipos de suelos se diferencian a partir del análisis granulométrico. Las partículas de los suelos granulares suelen comportarse de forma estable y resistente, mientras que los suelos finos forman estructuras laminares, de comportamiento muy variable, siendo por la general geotécnicamente inestables. Los suelos granulares no son plásticos y la resistencia dependerá básicamente del ángulo de rozamiento interno, que a su vez está condicionado por la forma, tamaño y grado de empaquetamiento de las partículas sólidas, considerándose a estos suelos como friccionales; los suelos finos son plásticos, y su resistencia depende tanto del rozamiento interno entre las partículas

sólidas, como de las fuerzas de cohesión existentes entre las mismas, es por lo que también se los denomina suelos cohesivos.

Por su parte la normativa técnica española precisa varias definiciones para los suelos cohesivos. Sirva de ejemplo lo expuesto a continuación:

- **Código Técnico de la Edificación (CTE), Documento Básico-Seguridad Estructural-Cimientos (DB-SE-C).** Cuando la proporción en el peso del contenido de finos que tengan plasticidad es igual o superior al 35%. Esta definición de suelo cohesivo va en línea de la clasificación propuesta por la American Association of State Highway and Transportation Officials (en adelante, AASHTO).
- **Guía de cimentaciones en obras de carretera (GCOC).** Suelo que tiene cohesión apreciable pero inferior 0,5 MPa. Valores mayores son propios de las rocas. Normalmente, los suelos cohesivos tienen un porcentaje de finos superior al 15% y este valor se usará en esta Guía como identificador del carácter cohesivo.

4.3.1.1. Plasticidad

Dada la disposición intergranular de los suelos cohesivos, en el proceso típico de su deformación, como consecuencia de acciones exteriores, suelen aparecer deformaciones permanentes con muy poco retraso respecto a la carga que las origina.

Estas deformaciones, denominadas plásticas, son mayores que las elásticas cuando un terraplén se carga por primera vez y, por ende, son de gran importancia en la ingeniería civil. Además, como causante de las mismas aparecen también cargas intermitentes y repetitivas como el tráfico (Rojo López, 1988).

En el caso opuesto a la plasticidad, se encuentra el comportamiento elástico. Dicho comportamiento puede provenir o de la deformación elástica de sus granos o de la deformación elástica de la estructura de la masa del suelo.

Las cargas que cada partícula de suelo transmite a sus vecinas como consecuencia de las cargas que otras les transmiten y debidas bien, a cargas exteriores al suelo o a su propio peso, se ejercen en los puntos de contacto de los granos. Las componentes normales a los contactos producen fuerzas compresoras que deforman los granos. La magnitud de la deformación y la cuantía máxima de la fuerza compresora, que puede aguantar cada grano sin rotura, depende de las cualidades elásticas del mismo.

La plasticidad del suelo está en correspondencia con otras propiedades como la cohesión, el entumecimiento, la permeabilidad o la compresibilidad. Cuestiones todas ellas que a lo largo del apartado 4.3.1. "Caracterización" van a ser estudiadas.

4.3.1.2. Criterio de rotura

Al modificar el estado tensional del suelo se producen deformaciones que pueden originar su rotura. Aunque los suelos con cohesión rompen a veces por tracción, como puede ser el caso de las grietas verticales que a veces se observan en la coronación de un talud deslizado, la forma de rotura más habitual en los suelos es por esfuerzo cortante (tensión tangencial).

Las componentes tangenciales tienden a deslizar entre sí los granos en contacto. La cuantía máxima que pueden tener, sin que se produzca el deslizamiento, depende de su resistencia al corte.

La resistencia al corte no puede considerarse como un parámetro único y constante, ya que dependen de su naturaleza, estructura, enlaces, nivel de deformaciones, etc., así como, muy especialmente, de su estado tensional y de la presión del fluido que rellena sus poros (agua o agua y aire) (González de Vallejo et al., 2004).

El criterio de rotura en suelos más difundido deriva del propuesto por Coulomb. Este criterio establece que, para un suelo saturado, la resistencia al corte viene dada por,

$$\tau = c' + (\sigma_n - u) \cdot \tan \phi'$$

donde,

- τ : resistencia al corte del terreno a favor de un determinado plano.
- σ_n : tensión total normal actuando sobre el mismo plano.
- u : presión intersticial.
- c' : cohesión efectiva.
- ϕ' : ángulo de rozamiento interno efectivo.
- σ' : tensión efectiva ($\sigma_n - u$).

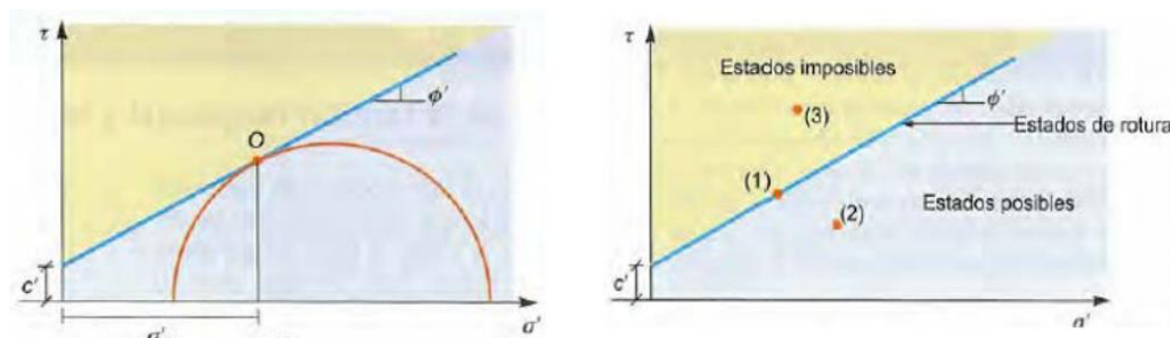


Figura 4.18. La envolvente de rotura y el círculo de Mohr (González de Vallejo et al., 2004)

La línea de resistencia definida actúa como una «envolvente o superficie de estado», separando estados posibles de imposibles. Así:

- **El punto (1)** señalado en la Figura 4.18 representa un estado de rotura.
- **El punto (2)** representa una combinación (σ' , τ) que cuenta con un cierto factor de seguridad ya que, para una determinada tensión efectiva normal, la tensión tangencial es inferior a la máxima movilizable.
- **El punto (3)** representa un estado imposible en tanto en cuanto se sitúa por encima de la envolvente de rotura, lo que significa que se ha sobrepasado la combinación máxima (σ' , τ) del criterio de rotura, y por lo tanto no es compatible con la resistencia definida del suelo.

Tipo de suelo	ϕ'	c'
Grava	32 - 38°	0
Arena	30 - 36°	0
Limo	25 - 32°	≥ 0
Arcilla	16 - 28°	≥ 0

Tabla 4.12. Órdenes de magnitud de ϕ' , c' en suelos medianamente densos (Bibliografía)

4.3.1.3. Cohesión y entumecimiento

Las fuerzas que ligán entre sí las partículas sólidas de un suelo son de muy diversa índole; unas son fuerzas de cohesión debidas a fortísimos campos iónicos formados por la superficie de cada grano (caso de suelos cohesivos), mientras que otras son debidas a tensiones capilares creadas en la fina película de agua que rodea los granos (falsa cohesión de las arenas). Estas fuerzas son variables con el tiempo y suelen rebajarse con el transcurso del mismo.

La intensidad de las fuerzas anteriores se ve comprometida por la presión del agua y gas atrapados en los huecos intergranulares. En terrenos poco permeables aumenta con las cargas a que se somete en su superficie.

Los suelos cohesivos tienen una superficie específica muy elevada, es decir, una gran superficie por unidad de peso. De ello se deduce que han de tener una gran energía superficial cuando están secos. Conforme se humedecen las partículas va disminuyendo dicha energía hasta alcanzar el límite líquido, situación en la que el suelo tiene el mínimo de energía superficial, transformándose en un material de comportamiento viscoso. Por consiguiente, la fracción fina de un material es la más sensible a la acción de la humedad (Dal-Ré Tenreiro, 2001).

La cohesión es una característica de los suelos arcillosos, y por tanto asociada a la plasticidad. Por lo general, tanto para cuantificar el grado de humedad en el que se alcanza el carácter plástico, como fluidificado o líquido, es extendida la realización de las pruebas debidas a Atterberg, las cuales determinan los límites del mismo nombre. Las arcillas tienen un elevado límite líquido e índice de plasticidad; los suelos granulares tienen un pequeño índice de plasticidad, el cual aumentará cuanto mayor sea la proporción de arcilla en su contaminación.

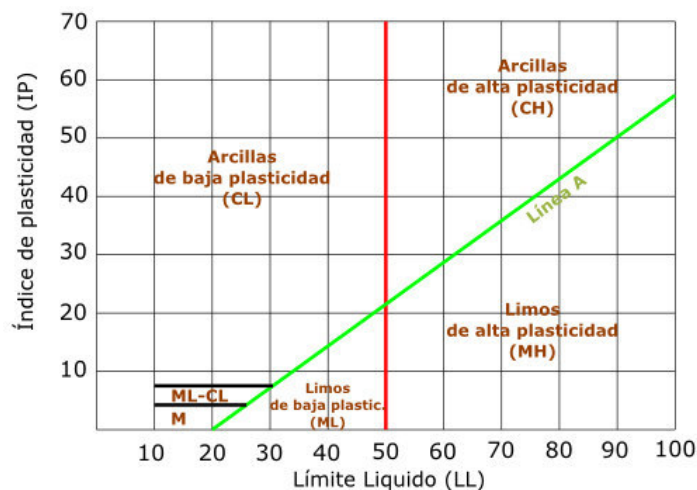


Figura 4.19. Carta de Casagrande para clasificar los finos en función de su plasticidad en el USCS. (González de Vallejo et al., 2004)

Por su parte, el entumecimiento se origina porque la arcilla, al fijar agua entre sus partículas, da lugar a un aumento de volumen, desde el límite de retracción hasta la saturación. En el incremento de volumen disminuye la energía superficial en proceso fijación de agua. La cohesión del suelo disminuye al aumentar la distancia entre las

partículas al intercalarse agua entre ellas. Consecuencia de ello es su mayor deformabilidad (Dal-Ré Tenreiro, 2001).

La capacidad de cambio de volumen de estos materiales viene condicionada por el contenido de arcilla y su mineralogía, su estructura y fábrica; además de, las variaciones climáticas, la vegetación y los cambios hidrogeológicos.

La aversez de una arcilla por el agua, da lugar a los siguientes fenómenos:

- Que las primeras cantidades de agua se fijen con enorme energía, produciendo grandes presiones exteriores.
- Que, a continuación, las presiones exteriores se vayan reduciendo poco a poco.

Hablaremos de expansividad cuando se produzca un aumento de volumen por absorción de agua, y de retracción a la disminución de volumen por eliminación de agua.

A efectos prácticos, dado que la expansividad se relaciona con el contenido arcilloso, es habitual emplear parámetros de caracterización de arcillas para evaluar y graduar la posible expansividad de un suelo. Generalmente se consideran cuatro grados, tal y como se indica en la siguiente tabla:

Grado	Expansividad	Finos (%)	Límite líquido	Índice Lambe (kPa)	Presión de hinchamiento (kPa)	Hinchamiento libre (%)
I	Baja	< 30	< 35	< 80	< 25	< 1
II	Baja a media	30-60	35-50	80-150	25-125	1-4
III	Media a alta	60-95	50-65	150-230	125-300	4-10
IV	Muy alta	> 95	> 65	> 230	> 300	> 10

Tabla 4.13. Grados de expansividad y valores medios de parámetros geotécnicos (González de Vallejo et al., 2004)

El entumecimiento, al igual que la cohesión, está ligado a la superficie específica del suelo, pero con una diferencia sustancial: para que haya cohesión, como se dijo tiene que haber arcilla, en tanto que el entumecimiento puede presentarse en suelos limosos, desprovistos de cohesión. Los suelos limosos, por lo tanto, están carentes de una propiedad positiva, como es la cohesión, pero tienen la característica negativa de las arcillas: el entumecimiento. En cualquier caso, una adecuada compactación del suelo limo-arcilloso disminuirá la capacidad de entumecerse. (Dal-Ré Tenreiro, 2001).

4.3.1.4. Permeabilidad y compresibilidad

Cuando se habla de la compresibilidad de un suelo se está refiriendo a los cambios de volumen experimentados bajo la acción de una carga en su superficie y debidos a pérdidas de parte del agua que está entre sus granos.

Para comprender las posibilidades de compactación hay que considerar las distintas fases de la estructura del material. En general, los granos sólidos son prácticamente incompresibles bajo las cargas normales y, por tanto, las deformaciones de los suelos se deben a cambios de la posición relativa de los granos o a la expulsión del agua y gas o compresión del gas intersticial (Rojo López, 1988).

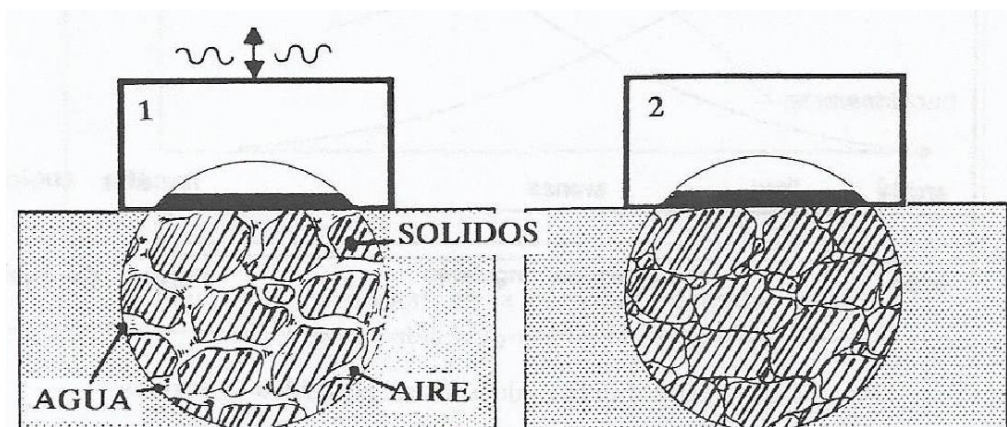


Figura 4.20. Fases del material al compactar. (1) Durante la compactación. (2) Después de la compactación. (Tiktin, 1997)

En la compresibilidad de un suelo en su estado natural influye mucho su estructura y el desarrollo de los esfuerzos a que ha sido sometido en su yacimiento. En general, los suelos sedimentarios son más compresibles que los residuales.

Por otro, la permeabilidad de un suelo es la facilidad con que permite que fluya el agua entre sus poros. Esta propiedad depende mucho de la textura, granulometría, grado de compactación y estructura primaria.

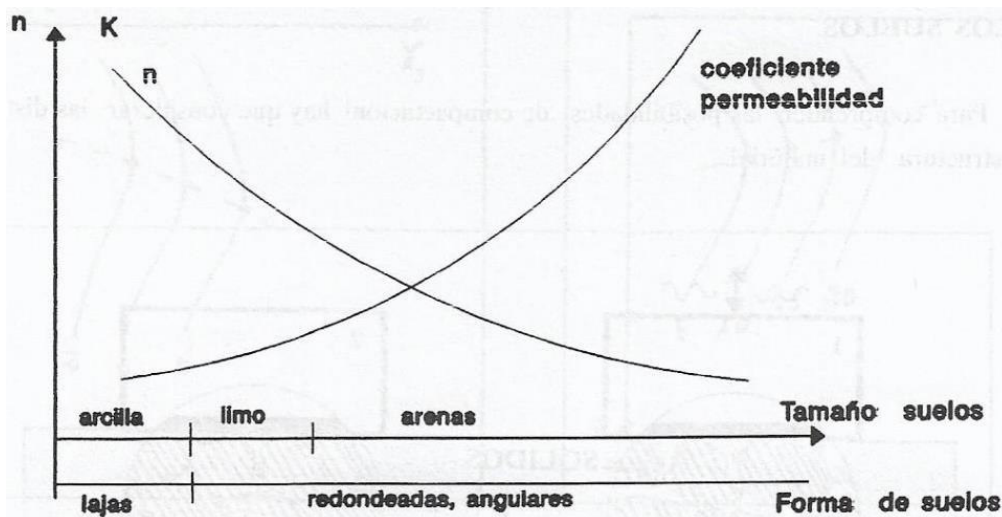


Figura 4.21. Permeabilidad de suelos, porosidad y formas (Tiktin, 1997)

Los suelos de grano grueso suelen ser más permeables que los de grano fino, pero si los granos gruesos van acompañados de finos que rellenan bien sus huecos, el suelo también puede adquirir impermeabilidad. Por el contrario, un suelo de granos finos con grietas o fisuras resulta permeable.

La Figura 4.23 tienen interés representarla sobre la 4.22 porque se ve la evolución de la densidad al disminuir el volumen de huecos de aire en el proceso de compactación.

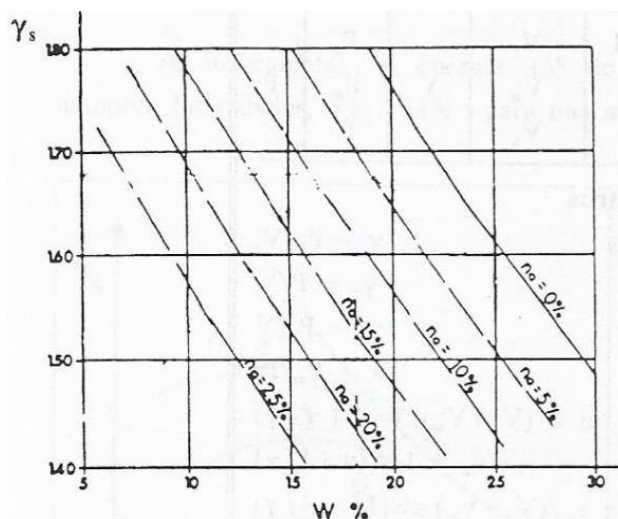


Figura 4.22. Familia de curvas γ_s en función de n_a y W (Tiktin, 1997)

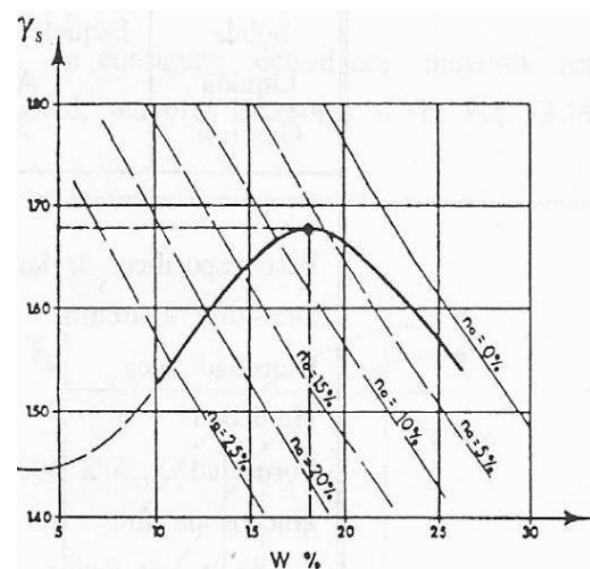


Figura 4.23. Curva de γ_s función de w sobre la familia de γ_s , función de n_a y W (Tiktin, 1997)

Al variar la humedad se obtiene la gráfica γ_s en función de W (Figura 4.23) que puede presentar mínimos y máximos según el material.

Cuando aumenta la humedad n_a disminuye, o sea el aire es expulsado de forma creciente hasta un punto determinado de W en que la densidad disminuye, pues una parte del agua desplaza los sólidos. Si W aumenta la curva se acerca asintóticamente a la de saturación del suelo. La siguiente figura muestra como varían algunos parámetros con la plasticidad.

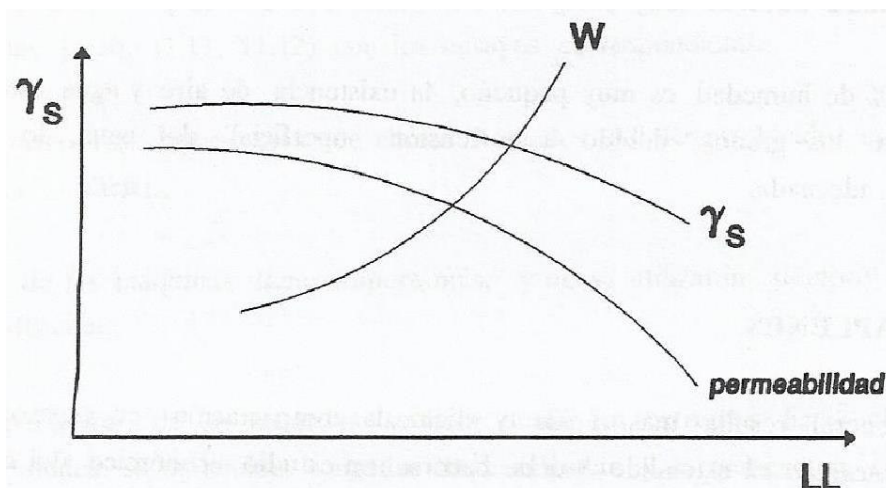


Figura 4.24. Variación de la humedad, densidad seca y permeabilidad, según el límite líquido (Tiktin, 1997)

En los suelos con finos donde más del 35% es de tamaño $< 80 \mu\text{m}$, cuanto mayor es la plasticidad menor es su permeabilidad y más difícil corregir su humedad natural en capas ya extendidas, siendo preferible en banco o perfil (más costoso reducir que aumentar).

Cuanto más plásticos, mayor es la cohesión, y más difícil la compactación, requiriéndose más energía/volumen (mayor carga lineal o nº de pasadas), o menor espesor.

Los suelos limosos, al ser más permeables, absorben más humedad que las arcillas después de las lluvias, pero se secan mejor y es más fácil corregirla (Tiktin, 1997).

Tipo de suelo	k (cm/s)
Grava mal graduada (GP)	≥ 1
Grava uniforme (GP)	0,2-1
Grava bien graduada (GW)	0,05-0,3
Arena uniforme (SP)	5×10^{-3} -0,2
Arena bien graduada (SW)	10^{-3} -0,1
Arena limosa (SM)	10^{-3} - 5×10^{-3}
Arena arcillosa (SC)	10^{-4} - 10^{-3}
Limo de baja plasticidad (ML)	5×10^{-5} - 10^{-4}
Arcillas de baja plasticidad (CL)	10^{-5} - 10^{-8}

Tabla 4.14. Rango de valores del coeficiente de permeabilidad en suelos (González de Vallejo et al., 2004)

A continuación, se estudian dos escenarios típicos de suelos impermeables (arcillosos).

A. Con gran exceso de humedad natural

Presentan una elevada fuerza de atracción entre el agua y las partículas sólidas, por lo que el agua no puede salir. No disminuye el volumen del conjunto, dada la prácticamente nula compresibilidad del agua, se está en un estado semifluido, que cede bajo la carga, desplazándose toda una masa. Los granos tenderán a moverse entre sí, pero sin alcanzar posiciones de mayor compacidad. La carga elevará mucho la presión intersticial. En caso extremos se pueden crear grandes desplazamientos de porciones de terreno bajo la carga, debido a que los granos del terreno están como flotando en el agua que les rodea, produciéndose el "efecto colchón", tan conocido en terrenos saturados (Rojo López, 1988).

Hay que eliminar el agua, tratar o sustituir el material. Cuando se debe reducir la humedad, es necesario recurrir al escarificado, roturado del suelo con grada de discos o similar e incluso al volteo sucesivo de la capa con motoniveladora, con el fin de facilitar la evaporación. Tal operación puede requerir varios días (habitualmente de 0,5 a 5 días), lo que obliga, si existe amenaza de lluvia, a cerrar la superficie con unas pasadas de rodillo liso al final de jornada, dejándola con pendientes suficientes no inferiores a 4 % (Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo, 1987).

A veces se consigue compactar en capas gruesas, de 40 a 60 cm, empleando compactadores remolcados vibratorios con patas apisonadoras de peso superior a 10 t.

En el lado opuesto, suelos permeables, caso típico arenas limpias, es fácil evacuar el agua, ésta actúa de lubricante de la fase sólida, y se puede disminuir el volumen de huecos más fácilmente con la compactación.

B. Con humedad natural muy seca

Si el porcentaje de humedad es muy pequeño, la existencia de aire y agua establece fuerzas de cohesión entre los granos, debido a la tensión superficial del agua, lo cual impide una compactación adecuada. El extendido en capas delgadas, junto al empleo de compactadores de patas apisonadoras autopropulsados, puede ser el método más indicado antes de decidir la adición de agua.

Cuando es necesaria la adición de agua se requiere determinar la cantidad a añadir en litros por metro cuadrado, mediante los oportunos ensayos, distribuir esta cantidad uniformemente evitando encharcamientos, bien sobre el préstamo o cantera, o bien sobre una capa ya extendida, y dejar pasar el tiempo necesario para que el agua llegue a penetrar en todo el espesor, tanto más cuanto mayor cohesividad presente el suelo (Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo, 1987).

Muchas veces se busca que un terraplén resulte impermeable, como sucede en los núcleos tanto de presas como carreteras, mientras que otras veces se busca que sean muy permeables, como sucedes en drenes y filtros.

4.3.1.5. Colapso de terraplenes de suelos cohesivos

La pérdida de resistencia de los suelos cohesivos se produce porque el proceso constructivo moderno de terraplenes es muy rápido, no permitiendo los asientos naturales con el tiempo (la mayor problemática de los suelos cohesivos son sus elevados tiempos de consolidación o de expulsión de agua bajo esfuerzos). Durante la construcción se consiguen densidades altas con humedades reducidas, pero después de las lluvias otoñales, al saturarse o aumentar la humedad, la capacidad portante (índice C.B.R.) se reduce notablemente. La causa es la inestabilidad del suelo, por el incremento de la presión de agua en los poros del suelo (Tiktin, 1997).

4.3.1.6. Valores característicos en su estudio

ESTADO DEL TERRENO	Grado de compactación	Módulo de deformación E (dN/cm ²)	Coeficiente de deformación no recuperable K' (dN/cm ²)	Coeficiente de viscosidad aparente η_0 (seg. cm ⁻²)	Coeficiente de deformación elástica K (dN/cm ²)				
					CON HUMEDAD OPTIMA				
					0,8 W _{opt}	0,9 W _{opt}	1,0 W _{opt}	1,1 W _{opt}	1,2 W _{opt}
Totalmente esponjado	0,6 - 0,70	5 - 10	15 - 30	30 - 60	250	125	70	25	5
Muy esponjado	0,71 - 0,75	10 - 20	30 - 35	61 - 130	400	200	125	40	25
Esponjado	0,76 - 0,85	20 - 40	65 - 110	131 - 240	500	250	150	55	35
Algo compactado	0,86 - 0,90	40 - 80	110 - 225	241 - 500	600	300	180	65	40
Caso compactado	0,91 - 0,94	80 - 100	225 - 280	501 - 800	670	350	200	70	45
Compactado	0,95 - 0,97	150 - 200	400 - 560	901 - 1.400	770	400	250	80	50

Tabla 4.15. Valores de coeficientes de deformación de terrenos cohesivos (Rojo López, 1988)

Clasificación de suelos U.S.C. (Unifad Soil Classification)				Características medias para su aplicación en carreteras y aeropuertos										Valor relativo en estas aplicaciones											
		Símbolos de los grupos	Denominación común de algunos de los suelos	Procedimiento de identificación en campo. Se excluirán las partículas de más de 3"			Valor como cor-nación no su-jeta a hielo	Valor como subbase no sujeta a hielo	Valor como base no sujeta a hielo	Acción poten-cial de heladas	Com-presibi-lidad y expan-sión	Carac-terísticas de drenaje	Densidad roca	C.B.R.	Módulo K.	Presas de tierras			Canales		Cimentaciones		Carreteras		
																Re-lleño	Núcleo	Esco-llerías	Re-sistencia erosión	Recubri-miento en tierra compacta	Eva-cuación de agua	Sin posi-bilidad de heladas	Heladas posibles	Capa superior	
Suelos de grano fino Más del 50 % menores del tamiz n.º 200	Limos y arcillas con límite líquido 50	ML	Limos inorgánicos y arenas muy finas. Arenas finas limosas o arcillosas. Limos arcillosos de baja plasticidad.	Nin-guna a lige-ra.	Algu-na a baja.	Nula.	Pobre a medio.	No vale.	No vale.	Mucha a muy alta.	Ligera a media.	Mala a nula.	1,45-2,0	15	100-200	6	6	—	—	6 erosión crítica.	6	9	10	11	—
		CL	Arcillas inorgánicas de plasticidad baja o media, arcillas con gravas, arcillas con arenas, arcillas limosas.	Media a alta.	Nin-guna o muy baja.	Media.	Pobre a medio.	No vale.	No vale.	Media o muy alta.	Media.	Nula.	1,45-2,0	15	50-150	5	3	—	9	8	5	10	9	7	7
		OL	Limos orgánicos y arcillas limosas de baja plasticidad.	Ligera a media.	Muy baja.	Lige-ra.	Pobre.	No vale.	No vale.	Media a muy alta.	Media a elevada.	Nula.	1,45-1,70	5	50-100	8	8	—	—	7 erosión crítica	7	11	11	12	—
	Limos y arcillas con límite líquido 50	MH	Limos inorgánicos, suelos limosos, limos elásticos.	Ligera a media.	Baja a nula.	Ligera a media.	Pobre.	No vale.	No vale.	Media a muy alta.	Elevada.	Regu-lar a nula.	1,28-1,70	10	50-100	9	9	—	—	—	8	12	12	18	—
		CH	Arcillas inorgánicas de gran plasticidad, arcillas gruesas.	Alta a muy alta.	Nula.	Alta.	Pobre a medio.	No vale.	No vale.	Media.	Elevada.	Nula.	1,45-1,84	15	50-150	7	7	—	10	8 cambio de	9	13	13	8	—
		OH	Arcillas orgánicas de plasticidad media alta, limos orgánicos.	Media a alta.	Nin-guna a muy baja.	Ligera a media.	Pobre a muy pobre.	No vale.	No vale.	Media.	Elevada.	Nula.	1,28-1,76	5	50-150	10	10	—	—	—	10	14	8	14	—
Suelos muy orgánicos.		Pt	y otros suelos muy orgánicos.	Se identifica rápidamente por el calor, olor, tacto esponjoso y fenáticamente tortura fibrosa.			No vale.	No vale.	No vale.	Ligera.	Muy elevada.	Regu-lar a nula.	—	15	—	—	—	—	—	—	—	14	—	—	

Tabla 4.16. Valores característicos y sugerencias sobre valor relativo para diversas aplicaciones de suelos de grano fino (Rojo López, 1988)

4.3.2. Identificación y análisis

Como ya se ha dicho anteriormente, los suelos de grano fino son aquellos en los que más de un % determinado pasa por el tamiz ASTM N.º 200 de 0,074 mm (50 % para la clasificación USCS), o el su equivalente en UNE de 0,080 mm. Lo que comprende tanto limos como arcillas.

Es importante la identificación de los finos, porque según sean los materiales se compactan con procedimientos distintos. Hay pruebas visuales para clasificar toscamente los suelos en granulares y plásticos; así como análisis específicos para estudiar la fracción fina de un material. A continuación, se muestra lo indicado al respecto por el profesor referencia en el asunto Juan Tiktin.

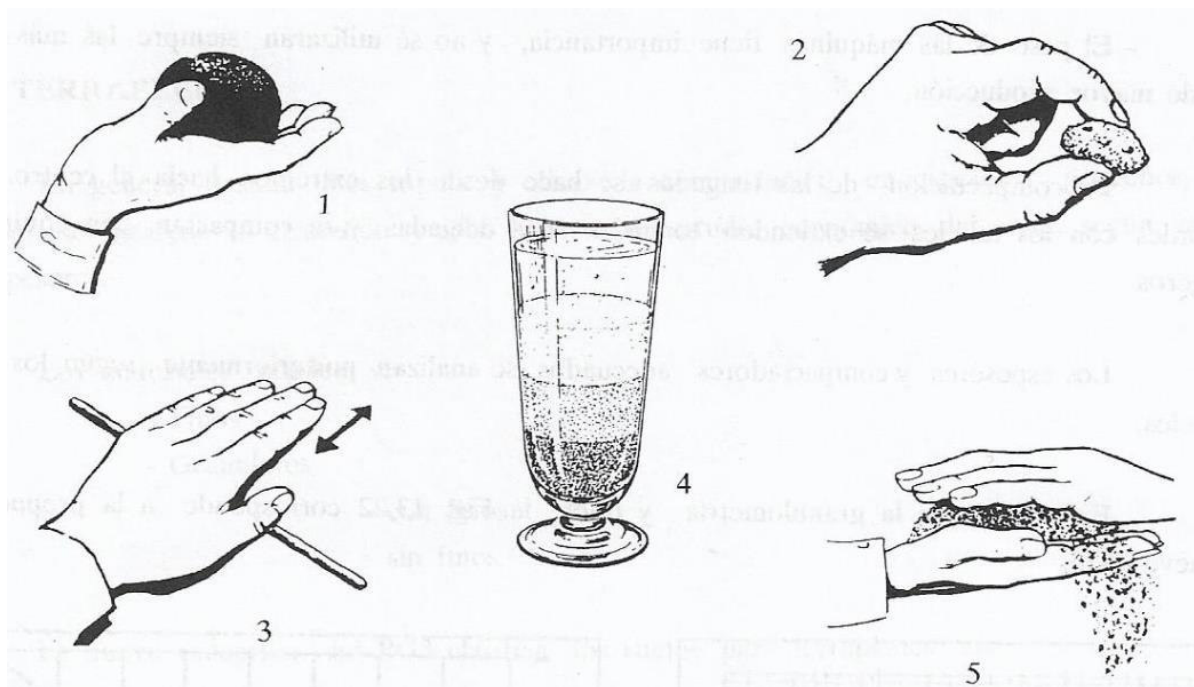


Figura 4.25. Pruebas visuales de suelos (Tiktin, 1997)

1, 2 y 3 suelos cohesivos:

1. Se forma una pelota con su humedad natural, si no se puede, o es difícil de moldear, es menos plástico, o la humedad está debajo de la Óptima.
2. Si se deshace en fragmentos uniformes, la humedad está debajo de la óptima.
3. Si se forma aproximadamente de 3 mm el suelo tiene plasticidad.
4. Muestra en un tubo de ensayo y se agita. Se deja reposar 1,5 min, si el agua queda turbia y se advierten dos niveles de depósito, hay un % de arcilla.

5. Suelo granular.
6. Arcilla o limo: Se coge un puñado de suelo con su humedad natural, si la mano queda manchada después de frotarla, los finos son arcillas. Si al frotar las manos los finos quedan sueltos y no pegados, son limos.

La Tabla 4.17 presenta una guía de relación de suelos.

Lo que hay que buscar	Suelos granulares, arenas finas, limos	Suelos plásticos (cohesivos), arcillas
<i>Aspecto y tacto.</i>	<i>Los granos gruesos se ven; el suelo tiene un tacto granoso al cogerse con los dedos.</i>	<i>Los granos no pueden verse; el suelo tiene un tacto uniforme y untuoso al cogerse con los dedos.</i>
<i>Movimiento de agua en los dedos vacíos</i>	<i>Se echa agua en la palma de la mano, se extiende una pequeña cantidad de suelo y se agita. Aparece agua en superficie. Al dejar de agitar, desaparece.</i>	<i>Mismo ensayo pero no hay indicio de agua saliendo de los huecos.</i>
<i>Plasticidad</i>	<i>Muy poca o ninguna plasticidad.</i>	<i>Plástico y pegajoso. Puede arrollarse.</i>
<i>Cohesión en estado seco</i>	<i>Poca o ninguna resistencia en estado seco. Se cuarteo y hace escamas rápidamente.</i>	<i>Elevada resistencia en seco. Se cuarteo con dificultad. Baja porosidad.</i>
<i>Sedimentación en agua</i>	<i>Se separa por sedimentación de forma rápida.</i>	<i>Se mantiene en suspensión en agua durante varias horas a menos que se flocule.</i>

Tabla 4.17. Guía de selección de suelos

El análisis de la parte fina de un material viene definido por la tabla 4.18.

CARACTERISTICA	CONTROL
Índice de plasticidad	Límites de Atterbeg
% de arena	Equivalente de arena
% de arcilla	Granulometría por sedimentación

Tabla 4.18. Análisis de la parte fina de un suelo

La sedimentometría se basa en obtener la velocidad de sedimentación mediante el método del densímetro aplicando la ley de Stoke. Tiene la ventaja sobre los límites

de Atterberg, que separa claramente los limos de arcillas y da un porcentaje, lo que es importante porque estos materiales se comportan y compactan de distinta forma.

Este análisis es más utilizado para núcleos de presas de tierras que en carreteras. Estableciendo la granulometría de finos de la siguiente manera:

$$80 \mu\text{m} < \text{arena fina} < 400 \mu\text{m}$$

$$2 \mu\text{m} < \text{limos} < 80 \mu\text{m}$$

$$0 \mu\text{m} < \text{arcillas} < 2 \mu\text{m}$$

4.3.3. Compactación

Ya se ha visto, que en general, las fuerzas de cohesión necesitan una determinada cantidad de agua para su desarrollo. Un exceso de agua tiende a disminuirlas o hacerlas desaparecer. Cuanto más compacto sea el entramado que forman las partículas sólidas menor será el agua que puede contener el suelo y mayores las fuerzas de cohesión que pueden desarrollarse.

Por otro lado, cuanto más trabados y compactos estén los sólidos, más dificultad se tendrá para que haya movimiento de los granos y, por tanto, menores será las deformaciones. El poco contenido de gases favorece también la ligazón de los granos, como antes se ha visto.

Por tanto, la compactación consiste, básicamente, en la densificación de un material por medio de la aplicación de un esfuerzo mecánico. El aumento del rozamiento interno entre las partículas sólidas, y la disminución del volumen de huecos en la masa del material, son sus dos principales efectos.

La compactación en obra es un proceso rápido, producido por la energía y acción al moverse unas máquinas (compactadores), cuyo objetivo es proporcionar los resultados que se relacionan en la Tabla 4.19 relativos a la estructura de los materiales.

OBJETIVOS	EFEECTO	CONTROL, ENSAYOS
<i>Aumento de la resistencia</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Capacidad portante - Estabilidad del terraplén 	<ul style="list-style-type: none"> - De penetración ó índice CBR - Triaxiales - Corte - Compresión simple
<i>Disminución del volumen de huecos</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Impermeabilidad 	<ul style="list-style-type: none"> - Permeabilidad
<i>Resistencia a la deformación</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Limitación de asientos y cambios de volumen 	<ul style="list-style-type: none"> - Módulo de Deformación Edométrico

Tabla 4.19. Objetivos de la compactación

Como se ha visto anteriormente, unas veces será preciso la adición de agua y otras habrá que eliminar el exceso antes de proceder a su compactación. En general, durante la compactación se efectúan las siguientes operaciones:

- Compresión del terreno.
- Expulsión de parte del agua.
- Expulsión de parte del gas.
- Recolocación de las partículas sólidas.

El equipo de movimiento de tierras de extendido a su paso por el material suelto de las capas de terraplén ocasiona ya una cierta compactación por su propio peso y la vibración de su movimiento, estimándose en un 70-80% de la total solicitada, de forma que el procedimiento de compactación tiene que hacer el resto (Tiktin, 1997).

4.3.3.1. Elección del método de compactación

Los espesores de las tongadas en el caso de terraplenes y presas de tierra pueden ser variables. Están muy relacionados con las posibilidades de compactación, que dependen del tipo de material.

Las causas determinantes de los espesores de extendido pueden clasificarse en función de:

- Tipo del material (granulometría, plasticidad, grado de humedad óptimo e in situ de las condiciones meteorológicas previsibles)
- Energía de compactación:

- Tipo de compactador y características
- Nº de pasadas
- Velocidad (espaciamiento en vibrantes)

Obtener una producción elevada en el arranque no presenta problema, éste radica en el extendido y compactación en un solo tajo, porque la limitación del espesor de cada tongada exige disponer de grandes superficies en los terraplenes.

Ejecución de la compactación

No hay que olvidar que la idoneidad del medio mecánico elegido se habrá de medir por su capacidad para conseguir, con el menor costo posible, la densificación requerida por las especificaciones evaluadas, en general, por comparación con una densidad máxima de referencia. Esto nos lleva a introducir un factor adicional en el análisis, ligado lógicamente a los datos de partida antes enunciados, que es el rendimiento del compactador. La elección deberá recaer sobre la máquina que pueda alcanzar la densidad exigida con el máximo rendimiento posible.

Es importante señalar que el grado de libertad en la elección del compactador es hoy en día mucho más amplio que hace algunos años, cuando era obligado sujetarse a una simple tabla de correspondencia entre tipos de máquinas y materiales a compactar. Actualmente, la posibilidad de actuar, durante la compactación, sobre los parámetros de funcionamiento (vibración, presión de inflado, velocidad, etc.) unido a la diversidad de compactadores existentes dentro de una misma clase, permiten basar la elección en criterios de rendimiento y disponibilidad (Ministerio de Obras Públicas y Transportes, 1989).

Sistemas de control de la compactación

En cualquier tipo de control de calidad, incluyendo el que nos ocupa, son aplicables indistinta o conjuntamente dos sistemas básicos: el control del "producto terminado" y el control del "proceso". Ambos tienen sus ventajas e inconvenientes para el control de la compactación, como veremos a continuación. Según los casos, hay especificaciones como las británicas, que se inclinan totalmente por el segundo sistema, otras, como la mayoría de las norteamericanas, lo hacen por el de "producto terminado", y finalmente algunas, como las francesas y, en cierta medida la nuestras, por una combinación de ambos tipos de control.

En definitiva, cada uno de los tres métodos de control de la compactación puede estar más o menos indicado en función de las circunstancias particulares de cada caso, que pueden resumirse así:

- **Control por “producto terminado”.** Homogeneidad dudosa de los materiales y métodos de ejecución. Ritmos de obra medios a bajos. Posibilidad de efectuar elevado número de medidas de densidad (ensayos nucleares, por ejemplo).
- **Control de “proceso”.** Materiales y ejecución homogéneos. Ritmos altos de producción. Dificultad para efectuar muchos ensayos con tiempo rápido de respuesta.
- **Control mixto.** De general aplicación, poniendo mayor énfasis en el “proceso” o en el “producto terminado”, según prevalezcan unas u otras de las circunstancias antes señaladas.

4.3.3.2. Especificaciones en diversos países

Reino Unido

En su Pliego de Prescripciones Técnicas, publicado por el Department of Transport en 1986, los británicos prescriben generalmente el control de procedimiento.

El Departamento de Transporte británico establece una serie de limitaciones referidas especialmente a las propiedades del material y los requerimientos necesarios para la compactación, así como para las condiciones granulométricas de dichos materiales. También se especifica la compactación por producto terminado para algunas unidades de obra, como los accesos a estructuras y algunos materiales, como las cenizas volantes.

No obstante, otras instituciones de Reino Unido permiten el control por producto terminado en rellenos que re presten a realización de ensayos, sirva de ejemplo el *Code of Practice for Earthworks* (Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo, 1988).

Francia

Las recomendaciones francesas se basan en la clasificación de suelos establecida en la Guía Técnica *Réalisation des remblais et des couches de forme*; Guía realizada por el LCPC y SETRA, y publicada por el Ministère de l'Équipement, du Logement et des Transports en el año 2000. De forma que teniendo en cuenta el tipo de suelo se redactan

una serie de recomendaciones en las que se establecen las condiciones a tener en cuenta para obtener unos resultados óptimos en la puesta en obra de estos materiales (Ministerio de Obras Públicas y Transportes, 1989).

Admite la siguiente alternativa de control de compactación:

- A. Por densidad o método convencional de producto terminado. Define el porcentaje de densidad Proctor para distintas partes de terraplén, explanada, y suelos sensibles al agua (lote de control).
- B. Control continuo o del Procedimiento utilizado. Para ello se basa en una clasificación francesa del suelo A, B, C, D según utilización y subclasificaciones.

Estados Unidos

En Estados Unidos las limitaciones suelen establecerlas cada uno de los Estados que lo componen. En general especifican que los materiales no deben tener materia orgánica o estar en muy pequeñas cantidades. Teniendo en cuenta que la clasificación más generalizada es la AASHTO, disponen como recomendables los materiales clasificados en los grupos A-1, A-2-4, A-2-5 o A-3, compactados a no menos del 95% Proctor Normal. Cuando no se disponga de estos materiales, con los que se utilicen se habrán de extremar las operaciones y tomar las precauciones que fueran precisas.

En estas normas generales no se establecen limitaciones absolutas, especificando precauciones a tener en cuenta, y ello es lógico dado que, como se ha expresado anteriormente, cada Estado determina normas concretas y dicta las limitaciones a imponer en los suelos (RENFE, 2001).

Aplicación de los diversos criterios a España

Según se ha podido ver, las posturas en cuanto al procedimiento de compactación no son acordes en todos los países. Para el caso de España, donde las condiciones climáticas y las características de los suelos son muy diversas, las Guías de referencia en la compactación aconsejan, siempre que se pueda, recurrirse al control por producto terminado.

Los Pliegos de Prescripciones Técnicas Generales de referencia en España, en lo referente a estructuras de tierras, como son el PG-3 en carreteras y puentes o el PGP-2011 en plataformas ferroviarias, no consideran condiciones de ejecución, energías a aplicar, etc., dejando libertad a proyectistas, direcciones de obra y contratistas (siguiendo ese mismo orden) para manejar el material y conseguir el producto deseado.

No obstante, si las características del material o las condiciones de la obra lo permiten, se acude también al control por procedimiento, sirviendo en este caso como orientación las recomendaciones de los distintos países que se han descrito. Si las características de la obra lo determinan, estos datos deben complementarse con tramos de prueba.

Es por ello que, tras un exhaustivo estudio de normativa extranjera influyente a la construcción civil española, a continuación, van a exponerse las prácticas habituales contempladas en la misma, para la compactación o tratamientos previos a la misma, en caso de haberlos, de un suelo cohesivo.

4.3.4. Compactadores de suelos plásticos

La propiedad fundamental de los suelos cohesivos, cuando contienen más de un 35% de limos y arcillas, en lo que a compactación se refiere, es la dificultad que presentan, tanto para reducir como para incrementar su humedad en una capa previamente extendida. Dado que, cuanto más plástico es el suelo, menor es su permeabilidad y más difícil, por tanto, corregir su humedad natural.

En caso de lluvia, sin embargo, la plasticidad del suelo puede tener un efecto contrario. Una capa de material limoso ligeramente plástico, con IP alrededor de 15 por ejemplo, absorberá mayor cantidad de agua y tardará más en secar que otra de suelo arcilloso, en la que el agua procedente de la lluvia habrá penetrado con más dificultad y sólo tendrá que evaporarse superficialmente. En cualquier caso, el estado de humedad de estos suelos condiciona fuertemente el equipo de compactación más indicado.

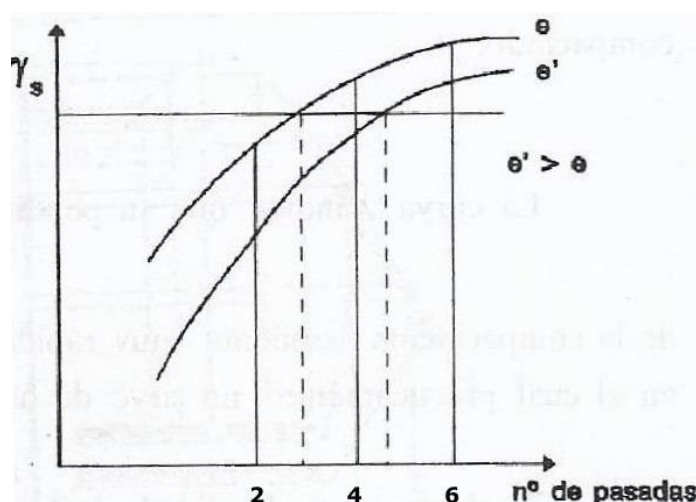


Figura 4.26. Aumento de espesores con la energía (Tiktin, 1997)

Si la humedad natural del suelo se encuentra en un entorno próximo a la humedad óptima del PN, alrededor del $\pm 1 \%$ en los menos plásticos o $\pm 3 \%$ en los de IP superior a 20, puede utilizarse una amplia gama de compactadores, que va desde los neumáticos y de patas apisonadoras hasta los vibrantes lisos. Se empleará más energía por unidad de volumen para los de mayor plasticidad, o sea, espesores más reducidos y/o mayor número de pasadas. El espesor puede variar así, desde 20 a unos 50 centímetros, debiéndose utilizar, si se trata de rodillos vibratorios, baja frecuencia y alta amplitud nominal.

4.3.4.1. Compactación por repetición de ciclos de carga descarga

Los compactadores de ruedas neumáticas, así como en gran parte los rodillos pata de cabra de baja velocidad siguen la técnica de compactación carga-descarga.

En el caso de un compactador pata de cabra vemos que las velocidades de carga en cada ciclo van disminuyendo con la profundidad, si bien la carga máxima también disminuye. A diferencia de los compactadores neumáticos, en éstos la duración de ciclos en todos los puntos bajo la superficie son iguales, siendo ésta proporcional a la carga máxima alcanzada.

También es reseñable que la presión de contacto máxima es mucho mayor que en los de neumáticos, debido a la pequeñez de la superficie de apoyo de cada taco. Los bulbos de isobaras son muy concentrados, pero en cambio, las velocidades de carga en cada ciclo son mucho menores en profundidad.

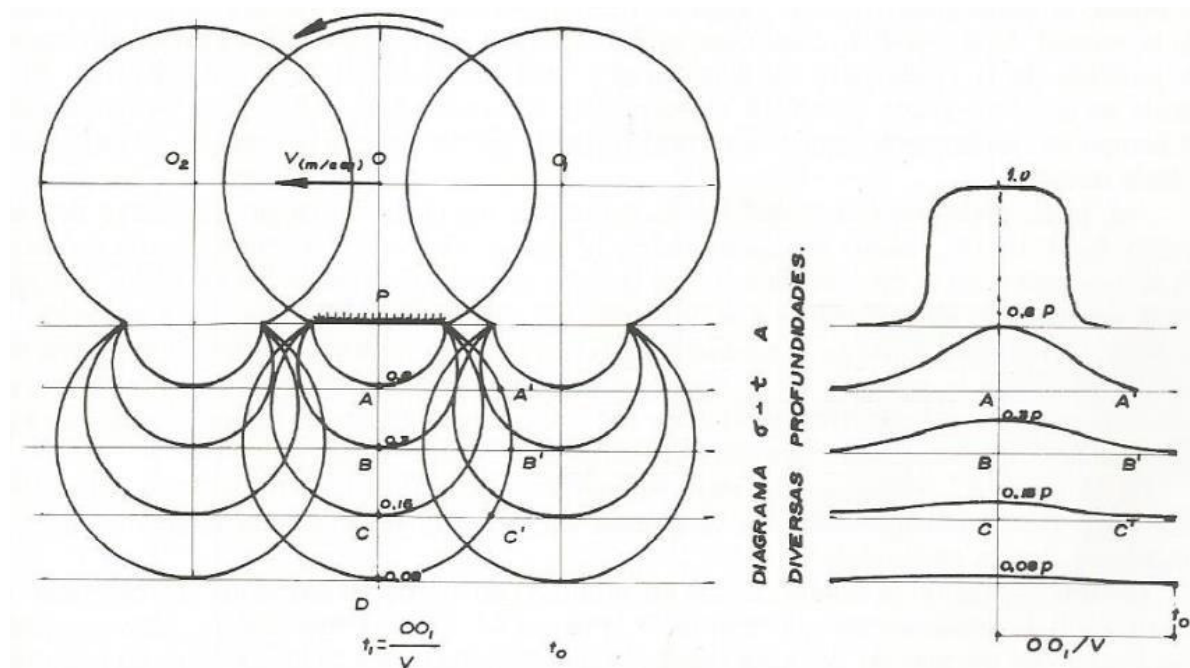


Figura 4.27. Estimación de los ciclos de carga y descarga en puntos bajo un neumático en traslación uniforme (Rojo López, 1988)

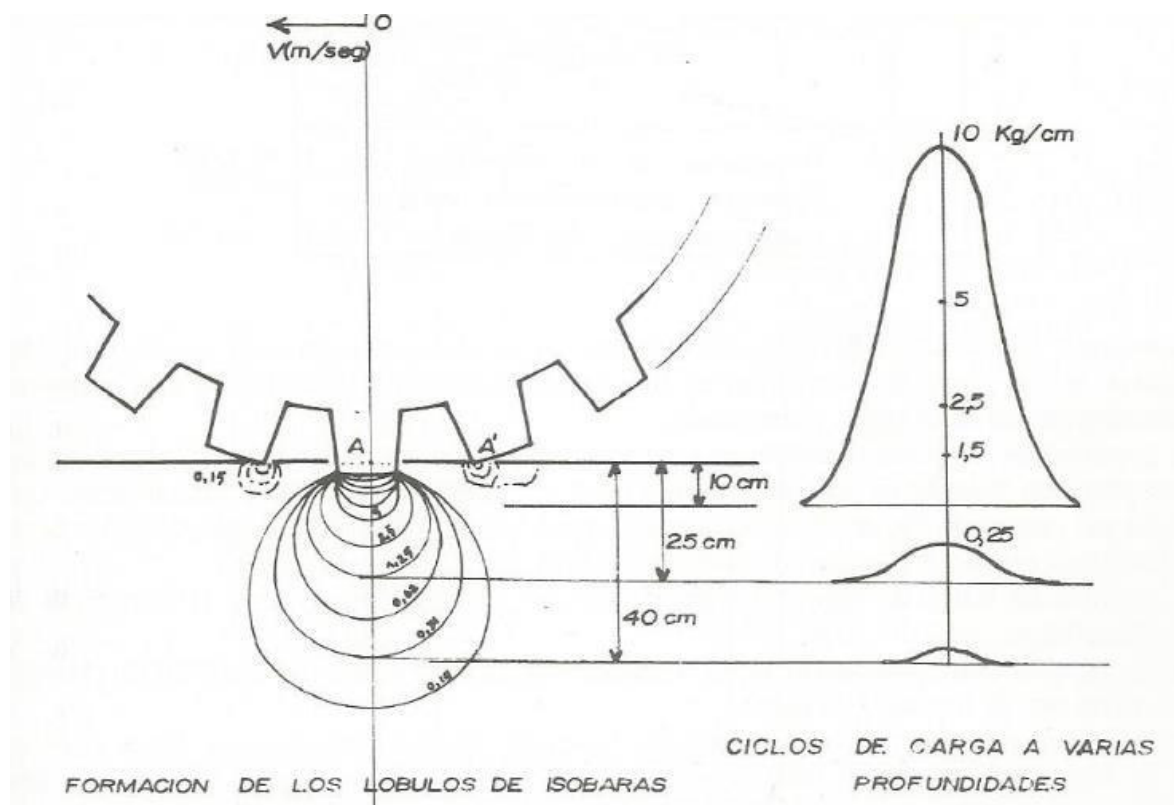


Figura 4.28. Esquema de distribución de presiones y ciclos de carga y descarga a diversas profundidades, al pasar el rodillo pata de cabra (Rojo López, 1988)

En los suelos plásticos, poco permeables, muy sensibles a la velocidad de aplicación de la carga, esta variación de la duración del ciclo de carga en profundidad favorece la compactación (Figuras 4.29 y 4.30).

Cuanto mayor es la velocidad, menores son las deformaciones a igual valor de carga. Este efecto es debido a que la evacuación de gases y agua no se realiza instantáneamente, sino que necesita cierto tiempo, mayor cuanto más impermeable sea el suelo y cuanta más agua tenga.

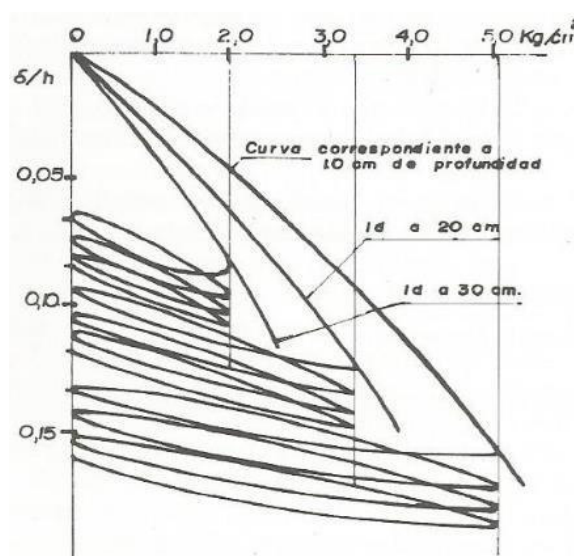


Figura 4.29. Diagramas carga-deformación a diversas profundidades bajo un compactador de neumáticos (Rojo López, 1988)

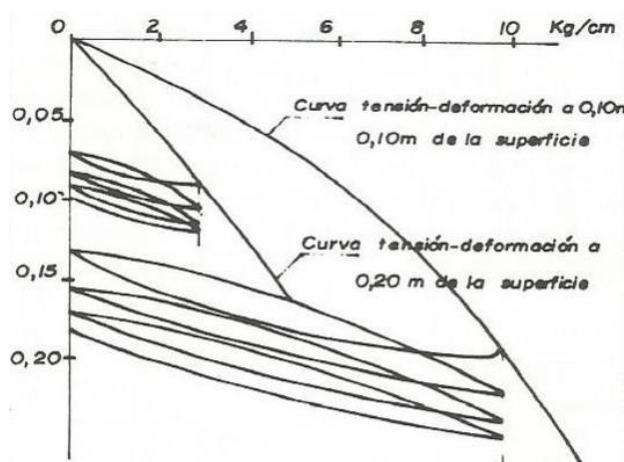


Figura 4.30. Diagramas carga-deformación a diversas profundidades bajo un rodillo de pata de cabra (Rojo López, 1988)

No obstante, la principal ventaja de los de pata de cabra sobre los neumáticos, radica en que en zona de materiales de granulometría fina cerrada permiten evacuar, con relativa facilidad, el agua y gas por las zonas laterales entre huellas.

Cuando la situación es de defecto de humedad, por debajo de los límites señalados en el apartado 4.3.4, la compactación se hace muy difícil, en especial en los más plásticos, que alcanzan una gran cohesión y alta resistencia de los terrones a pulverizarse. El extendido en capas delgadas, junto al empleo de compactadores de patas apisonadoras autopropulsados, puede ser el método más indicado antes de decidir la adición de agua.

Si la plasticidad es reducida, en tongadas con espesores máximos de 30 cm, los bolos de material arcilloso se pueden romper durante el extendido con los bulldozer por el efecto de su propio peso (son suficiente los tamaños pequeños de tractor), o se retiran si son lentejones, y la compactación se realiza con compactadores vibratorios de tambor liso.

Compactadores de alta velocidad, pata de cabra (pisones)

Constan de cuatro tambores con unas patas en la superficie de los mismos y una hoja extendidora en su parte frontal que se utiliza para el extendido, evitando los bulldozer. Después se dan las pasadas necesarias hasta llegar a la densidad especificada. De esta forma se tienen dos máquinas en una, lo que les da una preferencia sobre el rodillo vibratorio si el material está en los límites inferiores de suelos tolerables.



Figura 4.31. Compactador pata de cabra (pisones o pies "tamping" (CAT, 2019)

Son compactadores que combinan el efecto de amasado producido por las patas, con el impacto (efecto dinámico) originado por su alta velocidad, que produce una cierta rotura del material, cuando está en forma de bolos.

La compactación se realiza de abajo a arriba según pasadas. Las velocidades más lentas son en las primeras pasadas y más rápidas en las últimas, velocidad media 7-10 Km/h.

Los espesores dependen de la altura de las patas que suelen ser como máximo 20 cm, no debiendo la capa sobrepasar mucho este espesor si se quiere obtener una densidad real media del 100% del PN. Sin embargo, para lograr una mayor producción se extienden también capas de 30 cm, y en este caso deben emplearse los rodillos de mayor peso, que son de 32 t, siendo suficiente unas 6 pasadas.

Hay que tener en cuenta que, al compactar un suelo, se tiende a evacuar parte de agua y gas intersticiales. La vibración favorece el movimiento de estos elementos.

4.3.4.2. Compactación con vibración del suelo

Si el problema es de exceso de humedad por encima de los límites mencionados en el apartado 4.3.4, los suelos finos de plasticidad baja a media solo pueden compactarse con energía reducida, evitando así que el suelo llegue a la saturación con la consiguiente pérdida de estabilidad. A veces se consigue compactar en capas gruesas, de 40 a 60 cm, empleando compactadores vibratorios, remolcados o autopropulsados, con patas apisonadoras de peso superior a 10 t.

Compactadores vibratorios pata de cabra

Este tipo de rodillos combina el efecto de la vibración con un mayor impacto ya que la superficie de contacto de las cabezas de las patas es aproximadamente 1/3 de la de un tambor liso, debido a la separación entre las patas, y por consiguiente el impacto es tres veces superior y mejora así la fuerza para vencer los rozamientos internos.

Por este motivo interesa que las patas penetren y no se apoye el tambor en la parte lisa, para lo cual el espesor de la capa no debe ser superior a la altura de las patas y aunque esto no pueda conseguirse en la práctica exactamente, al menos deben elegirse los espesores de capa menores posibles, porque entonces mejora mucho la compactación y se necesitan menos pasadas, aumentando la producción. Son recomendables los modelos más pesados con tracción también al tambor, de peso 16-20 t, alturas de pata 100-127 mm y espesores de tongada 20 cm.

Estos modelos pueden llevar hoja empujadora, aunque ésta es pequeña y en éste tipo de máquina no resulta eficaz.



Figura 4.32. Compactador vibratorio de tambor único, pata de cabra (CAT, 2019)

Antiguamente era más frecuente el empleo rodillos pata de cabra remolcados por tractores, pero este tipo de máquinas ha caído en desuso; prácticamente no se fabrican, lo cual no quiere decir que si se dispone de ellos no deban utilizarse, únicamente que la producción es más lenta por la baja velocidad del tractor y el número de pasadas necesario, de 15 a 20 (Tiktin, 1997).



Figura 4.33. Compactador pata de cabra remolcado (Rojo López, 1988)

Compactadores vibratorios lisos

Los modelos pesados de 17-20 t en algunos tipos de arcillas han dado también buen resultado, hincando con la vibración los terrones de arcilla, sin romperlos, en la masa de las arcillas. Sin embargo, dan mejor trabazón los de pata de cabra autopropulsados, que tienen además la ventaja del extendido con la hoja frontal.

Además, en terrenos flojos fácilmente deformables, con muchos finos, agua y gas, las ondas de presión son mucho más lentas, de modo que las capas primeramente afectadas, mientras avanza la onda hacia las capas inferiores, absorben mucha más energía, alcanzando menor profundidad los efectos de la onda. Así pues, se obtiene una compactación de la zona superior, tendiendo ésta a impermeabilizar el terreno y a dificultar la salida de los gases, lo que producirá en pases sucesivos la "licuefacción del terreno".

Este hecho puede ser favorable en el caso de proteger de la lluvia un tajo inacabado realizado por un compactador pata de cabra.



Figura 4.34. Compactador vibratorio de tambor único liso (CAT, 2019)

4.3.5. Estabilización

Cuando la humedad natural del suelo llega a ser la correspondiente a un CBR inferior a 5 para energía del PN, puede presumirse que será necesario sustituir el suelo o bien aplicar una de las técnicas de estabilización.

Para los casos de estabilización "in situ", se usa muy frecuentemente la clasificación de la "AASHTO". Según la cual, los suelos A-1 y A-2, se consideran utilizables cuando se han tomado los apropiados procedimientos de drenaje y compactación. Pueden formar por sí mismos buenas bases o bien realizar un buen suelo-cemento o grava-cemento. Los suelos A-3, en algunos casos requieren estabilización y pueden formar buenos suelos-cementos. Los suelos A-4 a A-7, requieren estabilización, pues por sí mismos son malos para terraplenes, subbases y bases.

También son útiles las clasificaciones de Casagrande y la triangular arcilla-arena-limo, muy clara para estos casos de elección de suelo estabilizable, pero la más completa actualmente es la clasificación francesa, que contiene numerosos tipos y subtipos de suelo y establece para cada uno de ellos los estudios, ensayos, controles y procedimientos de estabilización a realizar (Morilla Abad, 1991).

En el caso de España la *Norma 6.1 IC "Secciones de Firmes"*, en su apartado 5.2 "Materiales para la formación de la explanada", considera los materiales inadecuados y marginales (apartado 330.3.3 PG-3) para la formación de explanada. En él que se indica que su empleo sólo es posible si se estabiliza con cal o con cemento para obtener S-EST1 y S-EST2. No obstante también se considera el empleo de un tercer tipo de estabilización con cemento, S-EST3.

Por su parte la *Norma 6.3 IC "Rehabilitación de Firmes"*, indica que si en la excavación a realizar junto a la sección a ensanchar, el suelo es marginal, se tendrá que estabilizar con cemento o cal. Tanto para la Norma 6.1 IC como para la 6.3 IC, el tratamiento de estabilización está regulado por el PG-3 en el Artículo 512. Suelos estabilizados in situ, el cual reglamenta este proceso en obras de carreteras puentes.

De la misma manera, está contemplada la utilización de material granular tratado con cemento realizado en central, que convenientemente compactada, se utiliza como capa estructural en firmes de carretera. Dependiendo del material granular utilizado se distinguen dos tipos de materiales: suelocemento y gravacemento. En este caso es el PG-3 en el Artículo 513. Materiales tratados con cemento (suelocemento y gravacemento), el que regula este procedimiento.

A su vez, en los terraplenes, el apartado 330.4 del PG-3 permite utilizar materiales distintos a los contemplados en el mismo, en forma natural o previo tratamiento, siempre que cumplan las condiciones de capacidad de soporte exigidas, y previo estudio justificativo aprobado por el Director de las Obras, así como los que en su caso se exijan en el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares.

Por otro lado, el *Pliego General de Prescripciones Técnicas tipo para los proyectos de plataformas ferroviarias (PGP-2011)* indica que tratamiento del suelo con cal podrá hacer posible su utilización en el cimient, el núcleo, los espaldones o la coronación de terraplenes, así como en los fondos de desmonte. En este caso el tratamiento con cal se hará de acuerdo a las especificaciones del Artículo G0112. La IF-3, por su parte, no limita la naturaleza de los materiales siempre que cumplan las condiciones exigidas.

En cualquier caso, la estabilización de los suelos pretende mejorar su estructura granular (implícitamente mejora en su resistencia a la deformación) o su sensibilidad al agua o las dos cosas, con la adición al suelo natural de algo que modifique sus propiedades negativas. Si lo que se añade es otro tipo de suelo, estaremos en presencia de una estabilización granulométrica, que se denomina, asimismo, mecánica o natural. Pero, también se puede adicionar al suelo un producto industrial, ligante, que sea capaz de modificar la estructura granular, dotándole de la cohesión que no tiene o disminuir una plasticidad excesiva. Se trataría, entonces, de una estabilización química (cemento, cal, productos bituminosos, etc.). Como es lógico, se debe cumplir la condición de que, sea cual fuere el ligante empleado, no debe perjudicar a las demás propiedades del suelo (Dal-Ré Tenreiro, 2001).

4.3.5.1. Estabilización granulométrica

El objeto de este TFG no es otro que el realizar, en cierta manera, un contranálisis y una evaluación técnico-económica de una investigación llevada a cabo en la EUPLA en el año 2015 en relación a una mejora en la compactabilidad de un suelo limoso mediante la elaboración de mezclas con RCDs. Dicha investigación evaluó la mejora en la compactabilidad de un material lutítico (suelo limoso) presente en amplias zonas de la provincia de Zaragoza, mediante la mezcla con un residuo procedente de molienda de hormigón, de granulometría principalmente arenosa.

En el estudio de la mezcla se llegó a la conclusión de que el origen de la mejora del suelo está causado por una mejora granulométrica del material y no por el posible aporte de cemento no fraguado de la mezcla procedente del RCD, ya que la cantidad es mínima y el efecto no será relevante. Si bien, la capacidad de absorción del árido podría reducir la cantidad de agua disponible en la mezcla, reduciendo la humedad de la fracción limosa-arcillosa y reduciendo así su plasticidad, lo que a su vez mejoraría la estabilidad de la mezcla en condiciones de humedad.

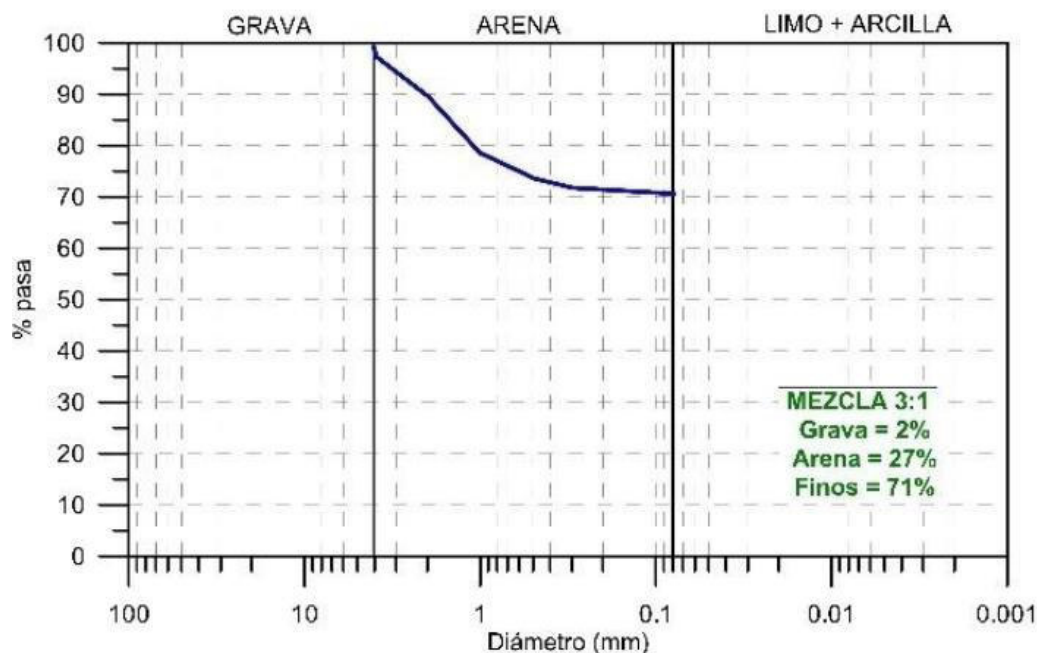


Figura 4.35. Gráfica granulométrica resultante de la mezcla arcilla-RCD considerada óptima en anteriores investigaciones (Fuentes Blanco, 2016)

Es por ello que a continuación se pretende dar una visión general de las estabilizaciones granulométricas más usuales. No obstante, es preciso decir que la normativa técnica española no desarrolla una reglamentación al respecto para obras civiles. Por lo que la gran mayoría de las técnicas examinadas en los siguientes apartados, son aportación tanto de artículos técnicos como publicaciones de mayor entidad de divulgación tecnológica aplicable a caminos rurales en España. Sirvan de ejemplo el *Manual de aspectos constructivos* desarrollado por Parques Nacionales, el Manual Técnico del desaparecido Instituto Nacional de Reforma y Desarrollo Agrario (IRYDA) o la publicación *Caminos rurales. Proyectos y construcción* del Doctor Ingeniero Agrónomo Rafael Dal-Ré Tenreiro.

Estabilización mediante curva de máxima compacidad

Este tipo de estabilización, como ya se dijo, está basado en la mezcla de suelos naturales, pero solamente en combinaciones binarias, parece ocioso señalar que, en la práctica constructiva, la mezcla de más de dos suelos no es ni habitual ni aconsejable, por el encarecimiento de la obra.

La proporción de materiales granulares y limo-arcillosos en las mezclas debe ser la precisa, ya que un exceso de los primeros desembocaría en una falta relativa de cohesión, es decir, de "cementación", en tanto que una proporción excesiva de los

segundos provocaría fenómenos de inestabilidad por el entumecimiento ante un aumento de humedad.

La compactación del suelo es básica para conseguir una estabilización adecuada, debido a que, además de aumentar la densidad seca, también lo hace la insensibilidad al agua. Al estar más compactado, las partículas incrementan el rozamiento total del terreno, más aún, las partículas de arcilla intercaladas entre las de mayor tamaño, teniendo contacto con ellas, actúan más eficazmente desde el punto de vista de su valor cementante por efecto de la cohesión que aportan.

Para conseguir la máxima compacidad, y siguiendo la teoría de Fuller para áridos bien graduados en hormigones, Talbot estableció la ecuación,

$$P = 100 \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^n$$

donde,

- **P**: Tanto por ciento, en peso, que pasa por el tamiz de abertura **d**.
- **D**: Máximo tamaño de las partículas en cada caso.
- **n**: Exponente función de los valores de D, y que varía entre 0,11 y 0,50.

Estableciéndose los siguientes valores de n:

Para	D = 2"	,	n = 0,5
	D = 1 ½"	,	n = 0,4
	D = 1"	,	n = 0,33
	D = 3/8"	,	n = 0,22

Según la experiencia en caminos ejecutados por el IRYDA, se ha comprobado la eficacia de estabilizaciones a 3/4", para cuyo tamaño n=0,3.

Existen unos husos que sirven de referencia a la hora de examinar la granulometría de un material, como los de AASHTO. Huso C, para 1 ½", huso B, para 2", huso D, para 1", que junto con el huso A para 1" son los más usuales. La formación de husos es el resultado de la comprobación experimental que las tolerancias en los tantos por ciento que pasan cada tamiz no desvirtúan la capacidad estabilizante esté entre los máximos

y mínimos. La AASHTO también establece una serie de exigencias en cuanto a la plasticidad y resistencia del producto final.

Tamiz	% que pasa		
	Ecuación de Talbot	Huso AASHTO	Valor medio
1 1/2"	100	100	100
1"	85	70-100	85
3/4"	75,8	60-90	75
3/8"	57,4	40-70	55
n.º 4	43	30-60	45
n.º 10	30,7	20-50	35
n.º 40	16,5	10-30	20
n.º 200	8,2	5-15	10

Tabla 4.20. Resultados de la ecuación Talbot para $D=1\frac{1}{2}$ " comparados con los husos de AASHTO para ese D (Dal-Ré Tenreiro, 2001)

Cuando no se dispone de husos como los de la AASHTO y se encuentren suelos aprovechables próximos con tamaños máximos, D, podrá utilizarse la ecuación Talbot.

No es aconsejable la estabilización granulométrica para tamaños D inferiores a 3/4", pues disminuye el ángulo de fricción interno y aumenta la proporción de finos y con ello la inestabilidad en presencia de humedad.

En general, se evitará que el tamaño D sea superior a la tercera parte de la capa a tratar. Por otro lado, se aconseja que el retenido por el tamiz 1/2" tenga más del 50% de material procedente de machaqueo, con un mínimo de dos caras de fractura (Dal-Ré Tenreiro, 2001).

Estabilización arena-arcilla

Se trata de una estabilización en la que intervienen la arena, como material granular, y la arcilla como ligante.

El resultado depende del tipo de suelo del que se parta, arenoso o arcilloso, al que habrá que agregar el complementario adecuado que corresponda. Si se pretende estabilizar un suelo arcilloso, se corregirá su plasticidad y su granulometría con la adición de arenas bien graduadas, pero si se trata de arenas carentes de cohesión, se añadirá suelo arcilloso.

Se procurará que la arena sea de carácter silíceo, dura y angulosa. La arcilla deberá tener una plasticidad moderada, con hinchamiento muy bajo o prácticamente nulo ante la humedad, y muy homogénea. Las normas AASHTO señala para la granulometría lo siguiente:

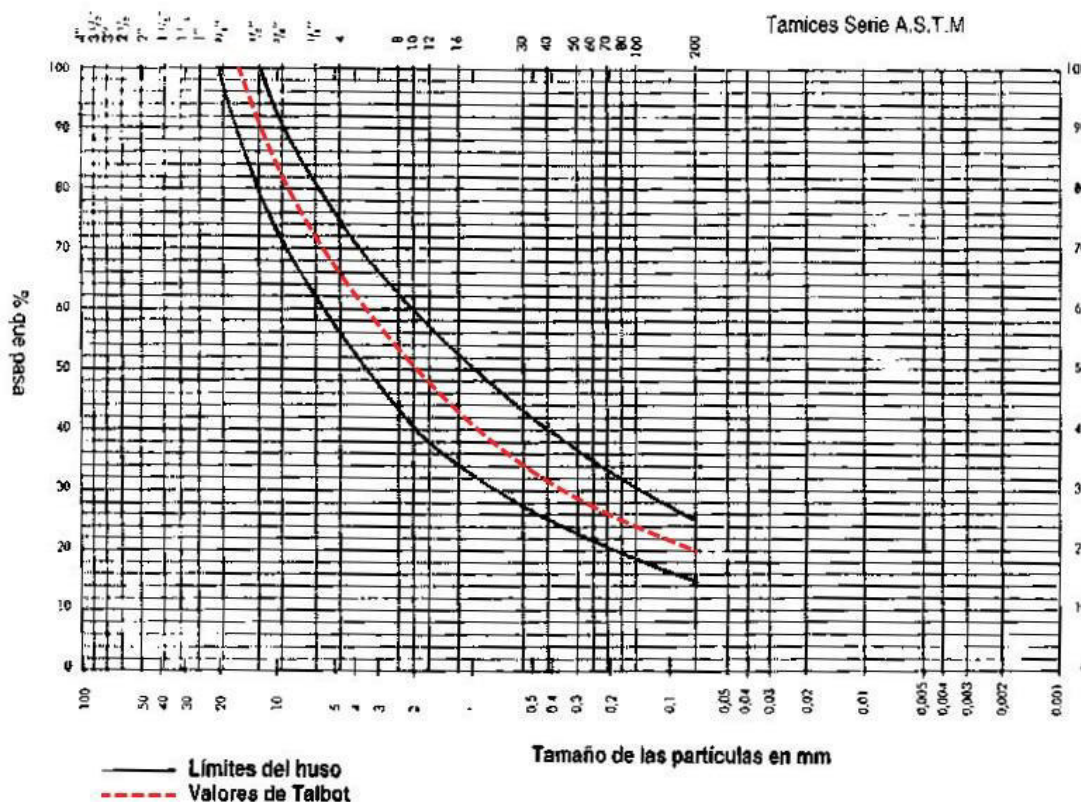


Figura 4.36. Exigencias AASHTO para la granulometría de una estabilización arena-arcilla (Dal-Ré Tenreiro, 2001)

Además, las condiciones de plasticidad son,

$$IP \leq 10 \quad ; \quad LL \leq 30$$

Se recomienda, para facilitar la mezcla de componentes, realizarla en torno al punto medio de los límites plástico y de retracción de la arcilla. Por lo que este tipo de estabilización requiere un control muy estricto de la humedad.

A su vez, en relación a la granulometría, se deberá cumplir que el tamaño máximo del árido sea menor que la mitad del espesor tratado, siendo preferibles espesores de 15 cm.

Mezclas de suelos

La posibilidad de encontrar suelos en estado natural que cumplan las condiciones de granulometría y plasticidad de cualquiera de los tipos de estabilización descritos es muy remota. Lo normal es que la estabilización se lleve a cabo mediante la mezcla binaria de suelos.

La granulometría de la mezcla puede establecerse utilizando el módulo granulométrico. Según Abrams o Hummels, no es preciso ajustarse con toda exactitud a una curva granulométrica para conseguir la máxima compacidad en hormigones, a igualdad de consistencia: es suficiente que el módulo granulométrico del árido, o de una mezcla de áridos, coincida con el de la curva teórica adoptada. Esta hipótesis, de sobra confirmada, también es aplicable para lograr la máxima compacidad en mezclas de suelos, con una buena compactación a la humedad óptima, como "hormigones de áridos" con un material ligante (la arcilla) (Dal-Ré Tenreiro, 2001).

Se suele adoptar como curva granulométrica de referencia la deducida por la ecuación de Talbot, o de la misma manera, los valores medios de los husos normalizados.

Sistema "sándwich"

En condiciones atmosféricas desfavorables, el problema de exceso de humedad puede no tener más solución que la remoción del suelo y su sustitución por otro en mejores condiciones, o la aplicación de métodos especiales, entre ellos, el sistema "sándwich" o el tratamiento con cal (más excepcionalmente con cemento).

El sistema "sándwich" no es una corrección granulométrica al uso; consiste en intercalar entre dos capas de material húmedo, una capa de material granular, zahorra natural, etc., con el propósito, al igual que el tratamiento con cal, de permitir la puesta en obra y compactación del suelo, al tiempo que el exceso de humedad se va drenando a través de la capa de zahorra. A menudo, la rápida colmatación de los huecos de esta última, por los finos procedentes de las capas que la limitan, impide el éxito del sistema (Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo, 1987).

Ejecución de capas estabilizadas granulométricamente

En la ejecución de capas estabilizadas granulométricamente hay que tener en cuenta si se utilizan solamente suelos aportados de canteras o, en general, de préstamo; o si se emplea el terreno de la propia explanación como parte integrante de la futura capa, como ocurre en la estabilización arena-arcilla.

Dentro del primer caso, se ha de considerar el caso particular de la utilización, como suelo a estabilizar, del exceso de los desmontes no utilizados en la compensación de tierras, y acopiados en "caballeros".

- **Suelos aportados.** Las operaciones a realizar son las siguientes:

- **Preparación de material.** Se realizará en la cantera, con trituración, cribado y mezclado homogéneo, si ha lugar.

Si los materiales tienen distinta procedencia, se mezclarán sobre la capa subyacente. Para ello se formarán uno o dos cordones con el árido a corregir, el que entra en mayor proporción; el corrector se verterá sobre estos.

- **Transporte y la formación de cordones.** La carga sobre camión con pala cargadora debe hacerse de modo que, durante el vertido no se produzca disgregación, para ello la altura de caída debe ser la menor posible. Lo mismo puede decirse para la descarga del camión en la formación de los cordones longitudinales.

- **Mezcla.** Para mezclar ambos suelos, generalmente se usa la motoniveladora, y se añadirá agua poco a poco, entre cada dos o tres pases de la misma, hasta alcanzar una humedad menor en un 3-4% de la óptima.

Conviene decir que, si el material procede de una única cantera, cuando se vierta en obra, se procurará que tenga algo de humedad, con lo que se disminuye el riesgo de disgregación.

- **Compactación.** Una vez distribuida la mezcla uniformemente, con la humedad óptima, añadiendo agua en caso de ser necesario; se realizan las pasadas precisas con el compactador adecuado, según el tipo de terreno, estáticos o vibrantes.

- **Acabado.** Si la capa en construcción no va a llevar otra capa encima, se pasará un rodillo de neumáticos después de abundante riego a una velocidad mayor de la habitual.

- **Suelo de la propia explanación.** Es habitual en la estabilización arena-arcilla, para ello se escarificará la explanada hasta la profundidad correspondiente, homogeneizando luego la parte escarificada, con motoniveladora y fresadora en sucesivos pases, habiendo aportado agua hasta alcanzar una humedad próxima a la mitad de la óptima. Se acordonará el suelo removido, y se continuará con las sucesivas operaciones descritas para el anterior caso; transporte del suelo corrector, mezcla, extendido, compactación y acabado.

4.4. CONCLUSIONES GENERALES SOBRE EL ÁRIDO RECICLADO Y LOS SUELOS COHESIVOS

4.4.1. Conclusiones sobre el árido reciclado de residuos de construcción y demolición

- Las propiedades del árido reciclado son muy distintas en función de su origen (hormigón, cerámico, mixto), en el caso de los áridos provenientes de hormigón, estos varían en función de las características del hormigón de origen.
- La gran diferencia de un árido natural y un árido reciclado es el mortero adherido en el último, esta es la causa de las diferentes propiedades entre ambos: el árido reciclado tiene una menor densidad y mayor absorción respecto al natural. Debido a su origen, el árido reciclado presenta un mayor contenido de impurezas, en algunos casos sulfatos y yesos, en otros incluso cloruros si su origen es un ambiente salado. Estos factores influyen de forma negativa en las propiedades del árido reciclado.
- La resistencia a la helada y al desgaste son inferiores en los áridos reciclados respecto a los naturales.
- Elegir bien el proceso de trituración en función del uso que se le va a dar es muy importante, ya que influye en las propiedades del nuevo árido, sobre todo en la granulometría, en la cantidad de mortero adherido y en la forma. Los áridos generados través de una trituradora de impacto resultan más adecuados para su empleo en la construcción de obras lineales.
- Tras el proceso de trituración, el árido es una mezcla de fracción gruesa o grava (≥ 4 mm) y finos o arena (< 4 mm). El porcentaje de árido grueso que se obtiene varía del 70% al 90% de la masa total del hormigón original.
- Según los últimos datos públicos del INE sobre generación de RCDs, se estima una producción ascendente que en 2015 alcanzaba los 36 millones de toneladas. La RCDA por su parte, refleja una producción media de 19 millones de toneladas (sin tierras de excavación) en el periodo 2011-2015, manteniéndose ésta con cierta estabilidad.

- Según refleja la *Guía Española de Áridos Reciclados Procedentes de Residuos de Construcción y Demolición* el 28% los áridos reciclados comercializados corresponden a material procedente de residuos de hormigón. De los cuales sólo es comercializado como árido fino el 0,77%. La tendencia de uso de estos materiales es como relleno de servicios (cerca de 46% del total de toneladas comercializadas en 2008). Sin embargo, se observa un alto porcentaje de toneladas sin uso identificado, lo que sugiere que la comercialización de este tipo de material se realiza en una cantidad muy pequeña.
- La fabricación de morteros es la única aplicación constructiva contemplada normativamente en España, en la que se permite el empleo de una fracción fina reciclada. Se considera, sin embargo, que las arenas recicladas son únicamente adecuadas para la fabricación de morteros de baja resistencia.
- El árido reciclado se puede utilizar como material granular para la formación de explanadas, rellenos, suelo/grava cemento y en capas de firme, siempre que cumpla con las exigencias del PG-3 y el PG-4 en su caso. Por otra parte, el árido reciclado puede ser empleado como material de plataforma y subbalasto ferroviario siempre que se cumplan las exigencias de la IF-3 y PF-7 respectivamente, así como las del PGP-2011.
- La tasa de vertido de RCDs llega en algunas capitales de provincia a los 30€/t, precio que siempre va a estar por encima de las tasas de admisión en plantas de valorización.
- El precio de los áridos, para el caso de las gravas naturales pueden variar entre 6 y 12 euros/t y entre 5 y 13 euros/t para las arenas, mientras que los precios de los áridos reciclados suelen plantear una rebaja entorno al 50% de esos precios.
- El último Informe de Producción y Gestión de RCDs en España publicado por la RCDA, advierte de que todavía se deberían valorizar el 31% de los RCD que producidos antes del año 2020 para cumplir la Directiva Marco 2008 de Residuos para este flujo de deshechos. Por otro lado, ese mismo Informe refleja que sólo el 70% de todos los RCD producidos acceden a instalaciones de gestores autorizados.
- El PEGAR 2016-2022 establece objetivos cualitativos y cuantitativos para incrementar para incrementar la consecución de los objetivos del Plan. Entre ellos que las administraciones públicas fomenten que en los proyectos de obra

se tengan en cuenta alternativas de diseño y constructivas que generen menos residuos en la fase de construcción o la introducción de criterios en la contratación pública que incluyan porcentajes mínimos de uso de material reciclado en obra pública y privada. Así como el aumento de las tasas de vertido para desincentivar el depósito de residuos de RCD valorizables.

4.4.2. Conclusiones sobre los suelos cohesivos y su compactación

- Los suelos finos son plásticos, y su resistencia depende tanto del rozamiento interno entre las partículas sólidas, como de las fuerzas de cohesión existentes entre las mismas, es por lo que también se los denomina suelos cohesivos.
- Dada la disposición intergranular de los suelos cohesivos, en el proceso típico de su deformación, como consecuencia de acciones exteriores, suelen aparecer deformaciones permanentes con muy poco retraso respecto a la carga que las origina.
- La plasticidad del suelo está en correspondencia con otras propiedades como la cohesión, el entumecimiento, la impermeabilidad o la compresibilidad.
- La mayor problemática de los suelos cohesivos son sus elevados tiempos de consolidación o de expulsión de agua bajo esfuerzos.
- Es importante la identificación de los finos, porque según sean los materiales se compactan con procedimientos distintos.
- La propiedad fundamental de los suelos cohesivos, cuando contienen más de un 35% de limos y arcillas, en lo que a compactación se refiere, es la dificultad que presentan, tanto para reducir como para incrementar su humedad en una capa previamente extendida.
- En la compresión de suelos cohesivos con exceso grande de humedad natural, al presentar estos huecos pequeños, el agua no puede salir. Por ello no disminuye el volumen del conjunto, se está en un estado semifluido. Hay que eliminar el agua, oreando, o sustituir el material.
- Con humedad natural muy seca, la existencia de aire y agua establece fuerzas de cohesión entre los granos, debido a la tensión superficial del agua, lo cual impide una compactación adecuada.

- En los suelos plásticos, muy sensibles a la velocidad de aplicación de compactación por repetición de ciclos de carga-descarga favorece el proceso de compresión del terreno.
- Generalmente el efecto en profundidad con los rodillos vibratorios es mayor del lado húmedo y más importante cuanto más arcilloso es el material. Sin embargo, dan mejor trabazón los de pata de cabra autopropulsados, que tienen además la ventaja del extendido con la hoja frontal.
- Los Pliegos de Prescripciones Técnicas Generales de referencia en España, en lo referente a estructuras de tierras, como son el PG-3 en carreteras y puentes o el PGP-2011 en plataformas ferroviarias, no consideran condiciones de ejecución, energías a aplicar, etc., dejando libertad a proyectistas, direcciones de obra y contratistas (siguiendo ese mismo orden) para manejar el material y conseguir el producto deseado. No obstante, si las condiciones de la obra lo permiten, se acude también al control por procedimiento, pudiendo servir como orientación las recomendaciones francesas de la Guía *Réalisation des remblais et des couches de forme* o las Prescripciones Técnicas del Department of Transport británico. Si las características de la obra lo determinan, estos datos deben complementarse con tramos de prueba.
- Cuando la humedad natural del suelo llega a ser la correspondiente a un CBR inferior a 5 para energía del PN, puede presumirse que será necesario sustituir el suelo o bien aplicar una de las técnicas de estabilización.
- En condiciones atmosféricas desfavorables, el problema de exceso de humedad puede no tener más solución que su sustitución por otro en mejores condiciones, o la aplicación de métodos especiales.
- La normativa técnica española no desarrolla una reglamentación al respecto para obras civiles fuera de los tratamientos con cemento o cal.
- La investigación llevada a cabo en la EUPLA en el año 2015, en relación a una mejora en la compactabilidad de un suelo limoso mediante la elaboración de mezclas con RCDs, concluyó que el origen de la mejora del suelo estaba causado por una mejora granulométrica del material (arena-arcilla). Próxima pero no semejante a la “estabilización arena-arcilla” planteada por la AASHTO, pues sobrepasa los porcentajes límite del tamiz N.º 200 ASTM en todos los casos analizados.



5. MATERIALES Y PROCEDIMIENTOS

5.1. INTRODUCCIÓN

El presente capítulo tiene como objeto analizar y describir las características de los materiales utilizados en la elaboración de las mezclas de lutita y árido reciclado del estudio, así como el procedimiento de fabricación seguido.

En un primer punto se describe cada uno de los materiales utilizados, haciendo hincapié en la trazabilidad de los materiales.

En el segundo punto del capítulo se señalan las diferentes mezclas lutita-árido reciclado elaborados, así como sus dosificaciones. Además, se detallan los pasos seguidos durante el proceso de fabricación.

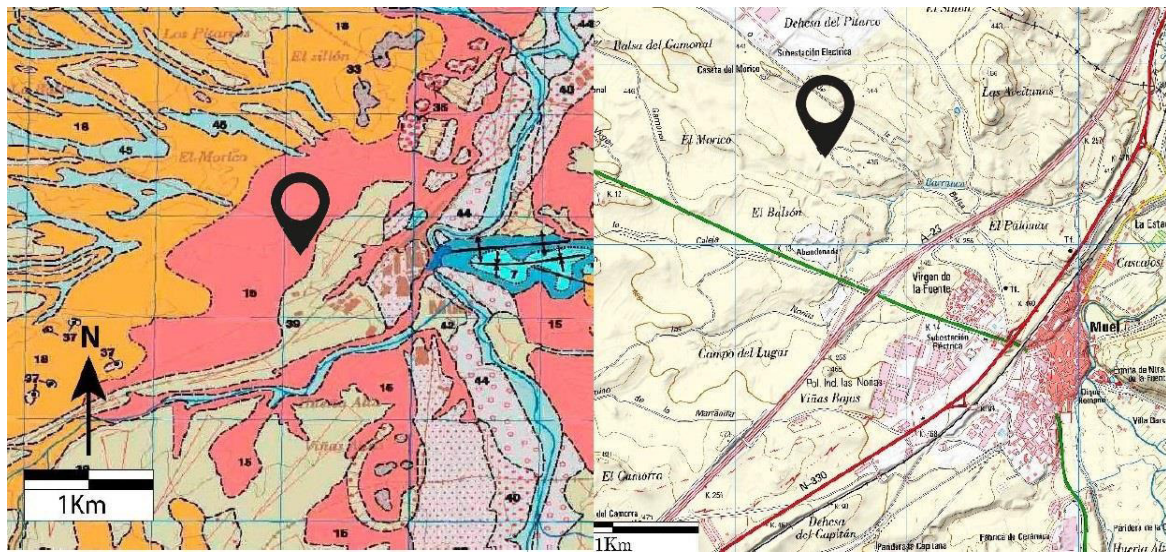
5.2. MATERIALES

En los siguientes apartados se analizan las características de los dos principales componentes usados en el estudio, lutitas terciarias y áridos reciclados de hormigón.

5.2.1. *Lutitas*

Para la elaboración de las mezclas, al igual que en el trabajo de investigación de 2015, se ha utilizado como suelo a tratar, lutitas terciarias (arcillas endurecidas) de tonos rojizos. Como en aquella ocasión, la toma de muestras se realizó a 1,4 Km al norte de la localidad de Muel (Figura 5.1), en las inmediaciones del barranco Salado. El acceso se realiza, partiendo desde la localidad de Muel, desde la carretera A-1101 en dirección a Épila.

**Figura 5.1. A) Situación geológica de la toma de muestras (Hernández Samaniego et al., 2005).
B) Situación geográfica de la toma de muestras (IGN, 2011)**



Coordenadas UTM: 30T - X: 658545 - Y: 4593494 (Datum ETRS 89)

La muestra de suelo con la que se han realizado los ensayos son unas lutitas de color rojizo del Aragoniense inferior, se presentan frecuentemente bioturbadas, con nódulos de yeso y ocasionales capas de gipsiarenitas de color gris-verdoso. Esta unidad se interpreta como las facies medias y distales de abanicos aluviales según Hernández Samaniego et al. (2005).

En el afloramiento no se observan bandeados o laminaciones, tampoco se observan alteraciones del material.

Tal y como se muestra en la foto adjunta, así como en la descripción en las calicatas realizadas en la zona durante el proyecto de construcción de la Autovía de Levante a Francia por Aragón (A-23), el producto resultante de la excavación constituye una especie de todo-uno de cantos o cantillos angulosos centimétricos a decimétricos de arcillas endurecidas de tamaños comprendidos entre gravilla y bolos empastadas en una matriz de textura arenosa pero composicionalmente de naturaleza limoarcillosa.

Los husos granulométricos de estos materiales van a estar condicionados por el tipo de maquinaria de extracción y el propio laboreo. Por lo tanto, este material puede considerarse como una roca muy blanda y evolutiva, que tiende a agrietarse por desecación y en caso de humectación tiende a formar elementos de tipo coloide (fangoso).



Fotografía 5.1. Calicata realizada en el Proyecto de Construcción de la A-23. Tramo Paniza-Torrubia



Fotografía 5.2. Muestra de lutita extraída

Al suelo arcilloso se le realizaron los siguientes ensayos. En el laboratorio de materiales de la EUPLA se determinó su densidad real y se practicó el ensayo de compactación Proctor Normal. También se recurrió a los servicios del Laboratorio Control 7 S.A.U., el cual realizó un análisis granulométrico, Límites de Atterberg y rotura a compresión simple.

Para complementar la caracterización del suelo se han tomado algunos resultados de ensayos del Proyecto de Construcción Autovía de Levante a Francia por Aragón (A-23). N-330. Tramo: Paniza-Torrubia, la cual está situada en las proximidades de la zona donde se tomaron las muestras.

5.2.2. Árido reciclado

Para realizar el tratamiento de mejora del suelo se ha empleado un árido de granulometría arenosa procedente de dos ciclos de reciclaje de piezas de hormigón prefabricadas. En concreto, se trabaja con los denominados desclasificados inferiores, partículas generalmente descartadas por las plantas de procesamiento por ser finas para su uso como árido reciclado. La razón de ser de esta elección reside en que, en la actualidad, la fracción fina reciclada sólo está contemplada normativamente en la fabricación de morteros de baja resistencia, por lo que en la gran mayoría de los casos constituyen un material de tipo residual que debe ser destinado a vertedero.

5.2.2.1. Trazabilidad del árido reciclado

En su origen, los desclasificados inferiores empleados en este TFG, proceden de piezas de hormigón prefabricadas desechadas (RCDs) en el propio proceso de fabricación por la empresa PRAINSA entre los años 2009 y 2011.



Fotografía 5.3. Elementos prefabricados desechados en PRAINSA

Las piezas desechadas por PRAINSA, por considerarse defectuosas, se acopiaban en un vertedero dentro de la propia fábrica, depositando los materiales mezclados sin ningún orden ni clasificación. Estas piezas tenían diferentes orígenes, las dosificaciones y composiciones de los hormigones de las piezas se recogen en la siguiente tabla.

Componente	Cloruros solubles Máx. (%)	HP-40 ponedora (Kg/m ³)	HAC-30 (Kg/m ³)	HAC-40 (Kg/m ³)	HPAC-50 (Kg/m ³)
AFT-0/4 S-L	0.01	1157	960	960	813
AGT-6/12 S-L	0.01	590	365	393	840
AGR-6/12 S-L	0.01	0	360	403	0
Filler Calizo	0.002	0	190	125	165
Cemento I 52.5 R	0.01	400	330	360	400
Plastificante	0	0.5	0	0	0
Superfluidificante	0	0	5.5	6	6.35
Agua	0.005	200	165	180	200
Densidad 28 días (Kg/m ³)		2283	2326	2368	2365
Cloruros solubles totales %		0.01	0.0087	0.0089	0.0094
f _c 28d (MPa)		42	32	42	53
Aire ocluido %		<6	<2	<2	<2

Tabla 5.1. Dosificación de los distintos hormigones utilizados en la fabricación de las piezas prefabricadas PRAINSA desechadas (Pérez Benedicto, 2011).

En todas las dosificaciones se usaron hormigones autocompactantes con la incorporación de aditivos plastificantes, solubles al agua, con un pH mínimo de 9 y exentos de cloruros, o bien de superplastificantes a base de policarboxilatos modificados con un pH de 8 e igualmente exentos de cloruros.

Tras un proceso de machaqueo, finalizado en la planta de PRAINSA de Aranda de Duero con una trituradora de impactos, y cribado de las piezas, se obtuvo el árido $AR_{PRAINSA}$ con un ciclo de reciclado. De este árido se seleccionó mediante tamizado únicamente la fracción 4/12 mm. Finalmente el árido se acopió, en una zona aislada de la fábrica de PRAINSA en Zuera, al objeto de no sufrir contaminación con otros elementos.

Con el $AR_{PRAINSA}$ seleccionado y árido de naturaleza silícea, J. A. Pérez Benedicto en su tesis doctoral de 2011 *Estudio experimental realizado sobre el comportamiento mecánico del hormigón elaborado con áridos reciclados de autoconsumo* fabricó 40 vigas, 20 armadas y 20 pretensadas con cuatro porcentajes de fracción gruesa sustituida por árido reciclado (0, 20, 50 y 100%). Las vigas fueron sometidas a ensayos de flexión.

Fórmulas teóricas de hormigón:								
Tipo	Mezcla (en seco)	Arena Kg	Grava trit. Kg	Grava reciclada lavada Kg	Becontres Filler Calizo Kg	Cemex 52.5R Kg	P-180 litros	Ag/c
Hormigón armado								
CH5005001	1AR40-0	860	890	-	175	360	5.3	0.38
CH5005002	1AR40-20	860	712	178	175	360	5.3	0.38
CH5005003	1AR40-50	860	445	445	175	360	5.3	0.38
CH5005004	1AR40-100	860	-	890	175	360	5.3	0.38
Hormigón pretensado								
CH5005005	2AR50-0	860	890	-	100	420	6.2	0.41
CH5005006	1AR50-20	860	712	178	100	420	6.2	0.41
CH5005007	1AR50-50	860	445	445	100	420	6.2	0.41
CH5005008	2AR50-100	860	-	890	100	420	6.2	0.41

Tabla 5.2. Dosificación de los distintos hormigones utilizados en la fabricación de las vigas ensayadas (Pérez Benedicto, 2011).

Con las vigas analizadas, A. Salesa Bordanaba en su tesis doctoral de 2014 *Propiedades físico-mecánicas del hormigón tras dos ciclos de reciclado* generó áridos con dos ciclos de reciclado.

En este segundo ciclo, el proceso de machaqueo y cribado se desarrolló en las instalaciones de Aragonesa de Áridos S.L. en Pinseque (Zaragoza), únicamente con las viguetas fabricadas con un 0, 50 y 100% de sustitución de fracción gruesa reciclada.

El machaqueo final se realizó, de nuevo, con una trituradora de impactos. Posteriormente al cribado, se obtuvieron diferentes tamaños de árido reciclado.

Desde que A. Salesa Bordanaba finalizara su tesis, hasta el inicio de esta investigación, este árido de dos ciclos de reciclado se encontraba acopiado a la intemperie en sacos de rafia, según tipología y tamaño; concretamente en la campa trasera del edificio de c/ Ronda San Juan Bosco de la EUPLA (Zaragoza). En este TFG, al igual que la investigación de 2015, se ha seleccionado la fracción arena, con un tamaño de partícula inferior a 6 mm, aunque también se encuentran partículas de entre 6 y 12 mm.



Fotografía 5.4. Estado del acopio de los áridos de dos ciclos de reciclado en febrero de 2019

La fracción seleccionada, dado que su módulo de finura es superior a la mayoría de arenas de río, queda fuera de los límites establecidos para las arenas naturales y por tanto de la normativa española para elaborar hormigones estructurales. Por lo general queda descartada tras la molienda de residuos de hormigón y después del aprovechamiento parcial de las partículas más gruesas. Aparte, como ya se ha señalado anteriormente, la fracción fina tiene peores propiedades que la fracción gruesa: alto contenido de impurezas, mayor absorción, mortero adherido y baja densidad.

De la zona de acopio se procedió a la toma de muestras para su clasificación y estudio. En el laboratorio de materiales de la EUPLA se han realizado varios ensayos para caracterizar el material: análisis granulométrico, determinación de la densidad real, absorción de agua y Proctor Normal. Para complementar la caracterización, se han

tomado resultados de ensayos al árido reciclado de los anteriores trabajos de investigación.



Fotografía 5.5. Árido tras dos ciclos de reciclado utilizado (0-6 mm)

5.3. MEZCLAS LUTITA - ÁRIDO RECICLADO

En el siguiente apartado se muestran las características y dosificaciones de las distintas mezclas elaboradas para esta investigación. También se describen los procedimientos para su elaboración, como son la preparación de materiales y amasado, para la posterior realización de ensayos.

Con el objetivo de poder determinar una posible mejora al mezclar la fracción fina de árido reciclado con arcilla, en el laboratorio de materiales de la EUPLA se han realizado los ensayos de compactación Proctor Normal y Proctor Modificado a las mezclas para poder determinar la densidad máxima alcanzada por las mezclas.

Para estudiar las mezclas y poder comparar sus características con las del suelo a tratar, se les han practicado en el laboratorio de materiales de la EUPLA análisis granulométrico y ensayo de compactación Proctor Normal.

Por otra parte, en el Laboratorio Control 7 S.A.U. se determinaron los Límites de Atterberg y sometieron a ensayo de rotura a compresión simple. También se ha llevado a cabo el ensayo de compactación Proctor Modificado (en el laboratorio de materiales la EUPLA) e Índice de penetración C.B.R. (en el Laboratorio Control 7 S.A.U.) a la dosificación que se ha estimado óptima. Para complementar la caracterización, se han

tomado resultados de ensayos al árido reciclado de los anteriores trabajos de investigación.

5.3.1. Procedimiento seguido en la elaboración de las mezclas

5.3.1.1. Dosificación de las mezclas

A continuación, se muestran las dosificaciones (en peso) realizadas en la investigación. Se han realizado tres tipos de mezclas lutita-árido reciclado,

- **Mezcla (1:1).** Compuesta por la misma proporción de lutita que de árido reciclado.
- **Mezcla (2:1).** Compuesta por dos partes de lutita por cada parte de árido reciclado.
- **Mezcla (3:1).** Compuesta por tres partes de lutita por cada parte de árido reciclado.



Fotografía 5.6. Muestras de las dosificaciones definidas para la investigación

Las distintas dosificaciones utilizadas en las mezclas tienen como objetivo poder establecer la mezcla óptima entre árido reciclado y lutita, y determinar cuál es la más favorable técnica y económicamente hablado.

La razón por la cual, al realizar las mezclas, solo se ha incrementa la cantidad de lutita, manteniendo fija la cantidad de árido reciclado, es porque en caso de aplicación

de dichas mezclas en obra, para grandes cantidades, la viabilidad económica de mezclas lutita-árido reciclado (1:3) y el grado de aprovechamiento del material natural, quedarían en entredicho, ya que se deberían aportar 3 veces más de árido reciclado que de arcilla.

Del mismo modo que se hizo en 2015, se ha considerado que la mejor opción es incrementar la cantidad de lutita, duplicando y triplicando la cantidad aportada respecto al árido reciclado, ya que el suelo a mejorar/estabilizar in situ es el cohesivo compuesto de lutita. La sencillez de estas dosificaciones no tiene otro objetivo que el de facilitar y agilizar la puesta en obra.

5.3.1.2. Almacenamiento y preparación de materiales

Almacenamiento de muestras

Tras una toma, en las inmediaciones de la carretera A-1101 en Muel (Zaragoza), de lutita suficiente para poder llevar a cabo la totalidad de los ensayos sin reutilizar muestras, el material se trasladó al laboratorio de materiales de la EUPLA. Donde se extendió para que con el paso de los días fuese secándose y así poder empezar a hacer los ensayos con una humedad que permitiera modificaciones controladas.

Respecto al árido reciclado, éste se encontraba acopiado en sacos de rafia a la intemperie. Al igual que la lutita, se almacenó en el laboratorio de materiales unas semanas antes de realizar los ensayos para que perdiera la humedad.

Cribado de muestras

Para la preparación de los suelos en la elaboración de la mezcla, el material debía ser tamizado por el tamiz de 20 mm, que es el que exige la norma para poder realizar el ensayo de compactación Proctor Normal y Proctor Modificado.

No obstante, a las muestras de lutita se les debía efectuar un machaqueo intenso, con objeto de desmenuzar cada una de las porciones de falsa arena en que se disgrega. El desmenuzando se ha llevado a cabo mediante una machacadora de mandíbulas de la marca Proeti y modelo A0670.



Fotografía 5.7. Lutita extendida tras su extracción



Fotografía 5.8. Lutita extendida tras su machaqueo



Fotografía 5.9. Machacadora de mandíbulas utilizada en la investigación

Por otra parte, al igual que la investigación de 2015, el árido reciclado seleccionado ha sido la fracción arena, con un tamaño de partícula inferior a 6 mm. Por todo ello, al material a ensayar no le supone una dificultad superar la criba de 20 mm.

5.3.1.3. Amasado de los materiales

Una vez finalizado el procesamiento de los componentes, se preparan tantos kilos de mezclas como sean necesarios para no tener que reutilizar materiales. Para ello se preparan 20 kg de cada una de las mezclas, exceptuando la considerada óptima, pues de ésta se preparan 45 kg, dado que será sometida al ensayo de compactación Proctor Modificado y C.B.R.

Para elaborar las mezclas se aportan la cantidad necesaria de árido reciclado y de arcilla en función de cada dosificación. Para ello se utiliza la báscula electrónica Gibertini TMB 45N del laboratorio de materiales de la EUPLA, pesando por separados los materiales y las cantidades justas para la elaboración de las mezclas.



Fotografía 5.10. Báscula de pesado Gibertini TMB 45N

A continuación, se introducen los materiales en la amasadora, concretamente una mezcladora de laboratorio Proeti H0050, la cual se limpia previamente a cada amasada para eliminar posibles restos de hormigón u áridos de ensayos anteriores. Se dejan los materiales mezclándose cinco minutos para terminar el proceso, al finalizar ya se dispone de la mezcla homogénea lutita-árido reciclado.



Fotografía 5.11. Amasadora usada en la investigación

5.3.1.4. Preparación de las mezclas para los ensayos

Una vez están las mezclas preparadas, se procede a determinar el contenido de humedad con que parten a la hora de realizar los distintos ensayos en el laboratorio de materiales de la EUPLA.

- Al haber extendido los materiales en el laboratorio, las humedades iniciales deben ser relativamente bajas. Para determinar el contenido de humedad exacto se realizan los siguientes pasos:
- Se coloca la muestra de la mezcla en un recipiente transparente apto para temperaturas superiores a 200°C.
- Se pesa la muestra en la báscula de precisión, en este caso una Gibertini modelo EUROPE3000HR.
- Se introduce durante 24 horas en la estufa de desecación con control e indicador analógico Proeti P0200 (CN).
- Con los valores de peso húmedo y peso seco obtenemos la humedad de la mezcla.

Este proceso se repetirá, tanto con las mezclas, como componentes de las mismas, siempre que resulte necesario hallar su grado de humedad.



Fotografía 5.12. Báscula de precisión usada en la investigación



Fotografía 5.13. Estufa de desecación usada en la investigación

El último paso antes de realizar los ensayos es preparar las mezclas con distintos porcentajes de humedad para la posterior realización del ensayo de compactación Proctor Normal y Modificado, así como las probetas necesarias para practicar ensayos de rotura a compresión simple. Para homogeneizar la humedad a toda la muestra se utilizó la amasadora.

Como ya se ha señalado anteriormente, también se realizaron ensayos Proctor Normal para el árido reciclado y la lutita por separado, por lo que este procedimiento también se ha seguido en estos casos.

Al dejar las muestras de árido reciclado y arcilla extendidas en el laboratorio varios días antes de la realización de los ensayos, la humedad de los materiales una vez realizadas las mezclas, estaba entorno el 2% de humedad.



6. PROGRAMA EXPERIMENTAL

6.1. INTRODUCCIÓN

Una vez descrito en el Capítulo 5 los materiales y el procedimiento de fabricación de las mezclas lutita-árido reciclado del estudio, toca explicar los ensayos realizados a las mismas y también a los áridos reciclados y lutitas por separado.

Como ya se ha mencionado anteriormente, el objetivo de esta investigación es determinar la viabilidad del uso de la fracción fina procedente de residuos de construcción y demolición para mejorar suelos cohesivos, que en ocasiones su viabilidad en la formación de rellenos queda en entredicho, debido sobre todo al menor rendimiento en su puesta en obra.

Para poder determinar la viabilidad del uso de dichas mezclas, es necesario evaluar las distintas propiedades de las lutitas y áridos reciclados que las conforman. Posteriormente se estudia el comportamiento de las mezclas elaboradas en sus distintas dosificaciones, pudiendo comparar al final de su caracterización la posible mejora o no de sus propiedades.

6.2. ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN

En los siguientes puntos se describen los procedimientos seguidos para el análisis de las propiedades fundamentales de los materiales usados en el estudio.

En la siguiente tabla, a modo de resumen, se recogen los ensayos realizados y la normativa seguida en el proceso.

Ensayo	Normativa	Material ensayado
Análisis granulométrico	UNE 103101:1995 UNE-EN 933-1:2012	L , AR _{RCD} , M
Densidad real	UNE-EN 1097-6:2014	L , AR _{RCD}
Absorción de agua	UNE-EN 1097-6:2014	AR _{RCD}
Límites de Atterberg	UNE 103103:1994 UNE 103104:1993	L , M
Proctor Normal	UNE 103500:1994	L , M
Proctor Modificado	UNE 103501:1994	M _{3:1}
Rotura a compresión simple	UNE 103400:1993	L , M
Índice C.B.R.	UNE 103502:1995	M _{3:1}

Tabla 6.1. Ensayos realizados

donde,

- **L:** lutitas
- **AR_{RCD}:** árido reciclado
- **M:** mezclas lutita-árido reciclado

6.2.1. Análisis granulométrico

La granulometría es un ensayo de laboratorio que permite obtener la distribución de los tamaños de las partículas que componen un suelo, expresada en porcentaje en peso. El conocimiento de dicha distribución permite conocer las propiedades básicas de los suelos.

La granulometría tiene como objetivo el estudio que se basa en la distribución de tamaños de las partículas de un suelo y que son útiles para conocer las propiedades básicas del mismo, así como para realizar una clasificación previa.

La determinación de la granulometría ha sido realizada de acuerdo a las normas UNE 103101:1995 "Análisis granulométrico de suelos por tamizado" y UNE-EN 933-1:2012 "Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 1: Determinación de la granulometría de las partículas. Método del tamizado".

La serie de tamices UNE utilizada (en milímetros) es: 16-8-4-2-1-0,5-0,25-0,125-0,08.

6.2.2. Densidad real

La determinación de la densidad real se realiza de acuerdo a la norma UNE-EN 1097-6:2014 "Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 6: Determinación de la densidad de partículas y la absorción de agua".

La densidad es una medida que relaciona la masa y el volumen de los áridos, o lo que es lo mismo, una medida indirecta del índice de poros. La densidad se calcula a través de un picnómetro.

6.2.3. Absorción de agua

El ensayo para determinar la absorción se realiza de acuerdo a la norma UNE-EN 1097-6:2014 "Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 6: Determinación de la densidad de partículas y la absorción de agua".

La absorción se determina a través del coeficiente de absorción, que es la relación entre el aumento de masa de la muestra debido a un sumergimiento parcial de agua teniendo la superficie seca y la masa seca de la muestra.

6.2.4. Límites de Atterberg

Los límites de Atterberg o límites de consistencia tienen como objetivo caracterizar el comportamiento de los suelos de grano fino. Estos ensayos se diseñaron para complementar al granulométrico, el cual tiene una limitación metodológica, al no poder separar físicamente por vía seca las partículas con tamaño inferior a la arena.

Los ensayos de consistencia se basan en el concepto de que un suelo de grano fino puede encontrarse en cuatro estados de consistencia según la humedad. Así, un suelo se encuentra en estado sólido cuando está seco, y al agregársele agua poco a poco irá pasando sucesivamente a los estados semisólido, plástico y finalmente, líquido. Los contenidos de humedad en los puntos de transición de un estado al otro son los denominados límites de Atterberg, y varían para cada tipo de partículas finas, y también para cada combinación de las mismas en cualquier suelo.

6.2.4.1. Límite plástico (LP)

Corresponde al porcentaje de humedad para el cual se produce el cambio de estado semisólido a plástico. Se ha realizado de acuerdo a la norma UNE 103104:1993 "Determinación del límite plástico de un suelo".

6.2.4.2. Límite líquido (LL)

Corresponde al porcentaje de humedad para el cual que se produce el paso de estado plástico a líquido. Se ha realizado de acuerdo a la norma UNE 103103:1994 "Determinación del límite líquido de un suelo por el método del aparato de Casagrande".

6.2.5. Ensayos de compactación Proctor

Los medios o controles que se siguen en obra para conocer si se ha alcanzado la compactación adecuada, varían según el tipo de materiales. En el caso de terraplenes el control más extendido es la densidad seca.

La densidad seca medida en el tajo debe ser la especificada en el pliego de condiciones. Normalmente se considera un porcentaje sobre la obtenida en el laboratorio según el ensayo Proctor.

En líneas generales, el Proyecto, o en su defecto el Director de las Obras, señala, entre el Proctor Normal o el Proctor Modificado, el ensayo a considerar como Proctor de referencia. En caso de omisión se considera como ensayo de referencia el Proctor Modificado; sin embargo, en el caso de suelos expansivos se aconseja el uso del ensayo Proctor Normal.

El Proyecto o, en su defecto, el Director de las Obras, pueden especificar justificadamente valores mínimos, superiores a los indicados, de las densidades después de la compactación en cada zona de terraplén en función de las características de los materiales a utilizar y de las propias de la obra.

6.2.5.1. Proctor Normal (PN)

Se ha realizado de acuerdo a la norma UNE 103500:1994 "Ensayo de compactación. Proctor Normal". Tiene como objeto determinar en un suelo, la relación entre la densidad seca y la humedad, para una energía de compactación de unos 0,583 J/cm³ con contenidos de humedad diferentes. También de definir la densidad seca máxima y su humedad correspondiente llamada óptima.

6.2.5.2. *Proctor Modificado (PM)*

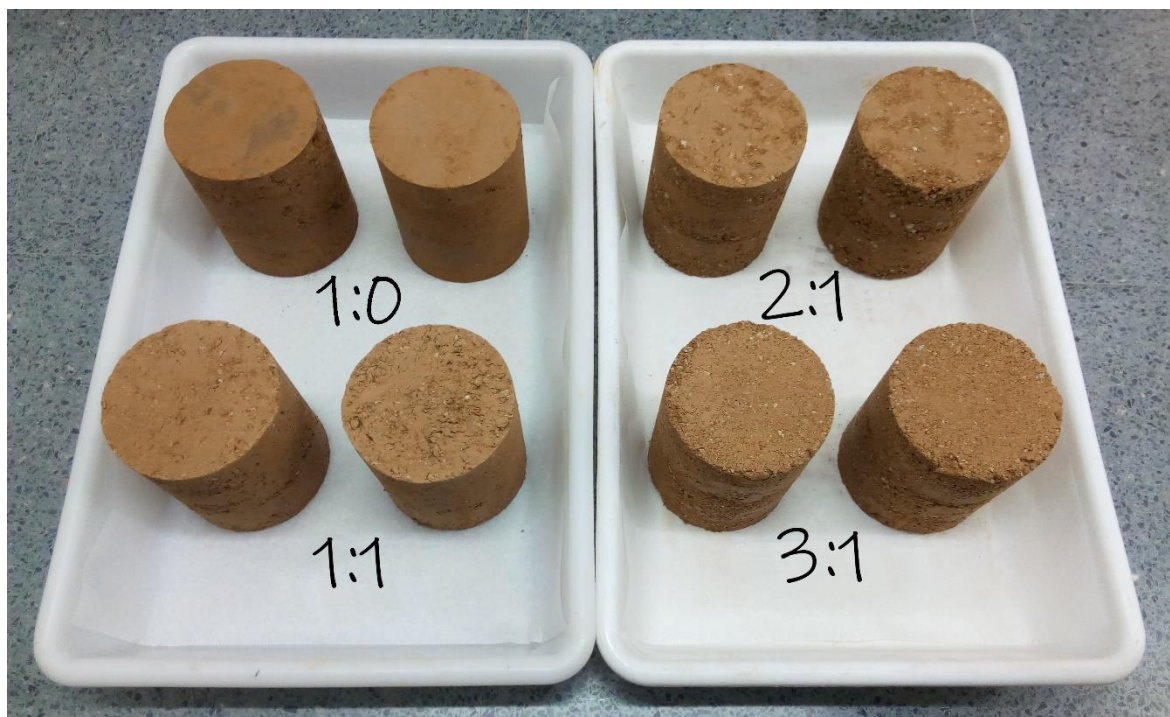
El ensayo Proctor Modificado se ha realizado de acuerdo a la norma UNE 103501:1994 "Ensayo de compactación. Proctor Modificado". Tiene como objeto determinar en un suelo, la relación entre la densidad seca y la humedad, para una energía de compactación de unos $2,632 \text{ J/cm}^3$ con contenidos de humedad diferentes. También de definir la densidad seca máxima y su humedad correspondiente llamada óptima.

Como se puede observar la principal diferencia entre el Proctor Normal y el Proctor Modificado, es la energía de compactación, siendo la del Proctor Modificado la más elevada y la más similar a la energía de compactación de la maquinaria pesada utilizada en la actualidad en obra civil.

6.2.6. *Rotura a compresión simple*

Este ensayo tiene como objetivo caracterizar el esfuerzo a compresión que es necesario aplicar al suelo para generar la rotura del mismo, así como de caracterizar e identificar los límites elástico y plástico de deformación. Se ha realizado de acuerdo con la norma UNE 103400:1993: "Ensayo de rotura a compresión simple de probetas de suelo".

Para la realización del ensayo se han ejecutado dos probetas por material o mezcla a ensayar, resultantes de un ensayo de compactación Proctor Normal con la humedad óptima. Éstas se han realizado con la humedad de compactación óptima en cada caso. Posteriormente, se ha dejado secar al aire suficientemente antes de someterlas a compresión.



Fotografía 6.1. Probetas elaboradas para la realización del ensayo

No obstante, tal y como lo demuestra la mayoría de la normativa técnica de estructuras de tierra no tratada en obras civiles, en su gran mayoría infraestructuras lineales (terraplenes), el parámetro más habitual para evaluar la capacidad portante de los suelos es el índice C.B.R. Si bien es cierto, que en ocasiones se propone una correspondencia entre este índice y los resultados obtenidos en el ensayo de rotura a compresión simple. Es el caso de la IF-3 a la hora de determinar la capacidad portante de los materiales, del terreno natural o de aportación, que constituyen la plataforma ferroviaria.

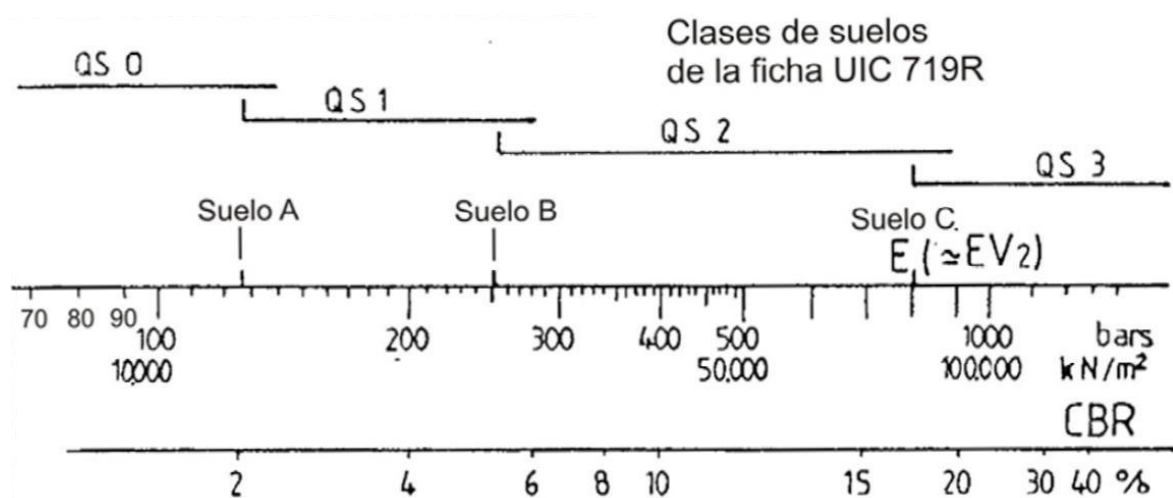


Figura 6.1. Escalas comparativas de criterio usuales de clasificación de plataformas IF-3

6.2.7. Índice C.B.R.

El Índice resistente C.B.R. (California Bearing Ratio) se define como la razón, en porcentaje, entre la presión necesaria para que el pistón penetre en el suelo hasta una profundidad determinada y la correspondiente a esa misma penetración en una muestra patrón de grava machacada. Se obtiene este índice para dos penetraciones, de 2,54 y 5,08 mm, tomándose como índice C.B.R. el mayor valor.

El ensayo C.B.R. es un ensayo de penetración o punzonamiento, que, además, tiene en cuenta los efectos colaterales de la presencia de agua. Se utiliza para evaluar la capacidad portante de suelos en terraplenes, explanadas y capas de base o subbase en firmes. El índice C.B.R. no es un valor intrínseco del suelo, sino que depende de sus condiciones de estado, densidad y humedad, así como de la sobrecarga que se le aplique.

El ensayo se ha realizado de acuerdo a la norma UNE 103502:1995 "Método de ensayo para determinar en laboratorio el índice C.B.R. de un suelo".

No obstante, no siempre se dispone del aparato de C.B.R., y siendo además un ensayo de cierto coste, en la gran mayoría de caminos pueden ser de aplicación los procedimientos de Peltier y de Trocchi para determinar el valor soporte de los suelos, que se basan en ensayos más comunes y económicos, y que, por otra parte, son siempre precisos a la hora de proyectar un camino. Se consideran válidos para suelos plásticos con valores menores a 20, pues en valores superiores el índice es demasiado conservador.

Con objeto de tener un valor de referencia para todas las muestras, también se ha calculado en todas ellas el índice C.B.R. por medio del método de Trocchi. Se ha escogido este método dado que utiliza más características que el de Peltier, pues tiene en cuenta, además de IP y LL, el índice de grupo IG, y la densidad seca máxima, D, Proctor Normal (PN). Según Trocchi:

$$\text{C. B. R.} = \frac{(22 - \text{IG}) * D/1,45}{1 + \text{LL} * \text{IP}/750}$$



7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1. INTRODUCCIÓN

El objetivo principal de esta investigación es estudiar la potencial mejora en la puesta en obra, prestando especial atención a la compactación, de un material cohesivo, mediante la mezcla con la fracción arena de un residuo procedente de molienda de hormigón (RCD). Para ello, se van a analizar cuantitativamente las principales características mecánicas de los materiales, por separado y en confluencia. Así como también el comportamiento reológico de las mezclas, es decir, el estudio de la resistencia de los suelos obtenidos en las mezclas como la amplitud del campo de comportamiento elástico y plástico de las mismas, mediante ensayos de deformación.

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en la fase experimental, y se discuten los mismos.

Dada la baja, o incluso nula posibilidad de repetición de los ensayos, no se considera necesario realizar un análisis estadístico más allá de extraer valores medios, al efecto de tener en cuenta errores de manejo en el laboratorio.

Los resultados obtenidos se comparan con investigaciones previas recogidas en el Capítulo 4 "Estado del Arte" y, con resultados de ensayos de caracterización a muestras similares, en caso de haberlos, realizados en anteriores trabajos de investigación o proyectos, todos ellos mostrados en los Anexos 1, 2 y 3.

Por último, cabe indicar que el sistema de clasificación utilizado para la identificación de las mezclas ha sido el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (USCS). El USCS (Unified Soil Classification System) fue incluido por la American Society for Testing Material entre sus métodos normalizados (ASTM). Esta clasificación es utilizada en muchos países, entre ellos España, que lo hace siguiendo exactamente la normativa americana.

7.2. ESTUDIO DE LAS MUESTRAS

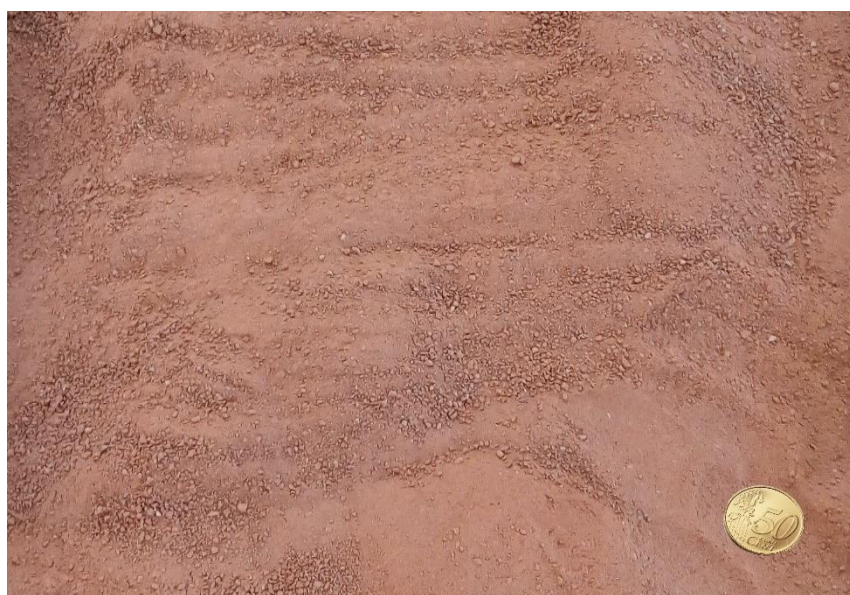
7.2.1. *Aspecto visual*

7.2.1.1. *Resultados*

A continuación, se muestran fotografías de los distintos materiales utilizados en la elaboración de las mezclas.



Fotografía 7.1. Lutita tras su extracción del terreno



Fotografía 7.2. Lutita tras su machaqueo en el laboratorio



Fotografía 7.3. Árido reciclado (0-6 mm) sedimentado



Fotografía 7.4. Árido reciclado (0-6 mm)

7.2.1.2. Discusión

Lutitas

Tal y como describe Hernández Samaniego et al. (2005), y como bien puede apreciarse en las fotografías, la muestra de suelo con la que se han realizado los ensayos se compone de lutitas de color rojizo, que presentan ocasionales capas de gipsiarenitas de color gris-verdoso. No muestra presencia de un contenido elevado de materia orgánica, debido a la ausencia de olor y a la ausencia de un color oscuro.

El producto resultante de la extracción constituye una especie de todo-uno de cantos o cantillos angulosos centimétricos a decimétricos de arcillas endurecidas de

tamaños comprendidos entre gravilla y bolos empastadas en una matriz de textura arenosa.

No obstante, en su manejo se aprecia que los husos granulométricos van a estar condicionados por el tipo de maquinaria de extracción y el propio laboreo. Por lo tanto, en un primer contacto puede considerarse como una roca muy blanda que tiende a agrietarse por desecación y en caso de humectación tiende a formar elementos de tipo coloide (fangoso).

Tras el machaqueo intenso, realizado con objeto de desmenuzar cada una de las porciones de falsa arena en que se disgrega, se observa la composición natural de las matrices, es decir, una naturaleza limoarcillosa.

Árido reciclado

Las partículas que componen el árido reciclado pueden estar compuestas por roca natural y mortero en diferentes proporciones. En otros casos lo pueden estar sólo por roca natural y en los últimos, el árido reciclado puede ser enteramente mortero o cemento sin fraguar que forman un único elemento. Pueden contemplarse pequeñas fracciones más oscuras que corresponden con el árido natural original de origen silíceo. El árido natural silíceo se caracteriza por una resistencia mecánica alta.

Tras la observación de las fotografías puede verse que los áridos reciclados a partir de trituración tienen una rugosidad evidente, superior a la de un árido natural también triturado. No obstante, pueden apreciarse en las fracciones recicladas pequeñas oquedades que corresponden a huecos de aire ocluido de las viguetas de hormigón originales.

Cabe recordar que cuanto más rugosa sea la superficie de los áridos mayor será la reacción tangencial que puede desarrollarse sin alterarse la posición de los granos.

Respecto a la angulosidad, como consecuencia del machaqueo por impactos al que ha sido sometido el hormigón, no se ven diferencias apreciables con respecto a la que podría tener un árido natural procedente de machaqueo. Lo cual hace de estos áridos apropiados para su utilización en obras lineales (caras de fractura considerables).

Es preciso destacar que, debido a la exposición ambiental a la que han sido sometidos los sacos de rafia donde se depositaban los áridos reciclados, ciertas porciones de árido se encontraban agregadas como elementos individuales de tamaños centimétricos a decimétricos. Lo cual puede interpretarse como un indicio de fraguado del cemento que pudiera quedar sin hidratar originalmente. En cualquier caso, la debilidad de estos agregados es evidente, pues es posible desmenuzarlos manualmente.

7.2.2. Análisis granulométrico

7.2.2.1. Resultados

En la siguiente tabla se recogen los resultados del porcentaje de retenido acumulado de cada tamiz en cada una de las muestras llevadas a análisis.

Tamiz UNE	Muestra tamizada				
	Lutita	AR _{RCD}	Mezcla 1:1	Mezcla 2:1	Mezcla 3:1
8		0,16	0,08	0,06	0,04
4		15,90	7,93	5,29	3,97
2		38,35	19,17	12,78	9,59
1		69,50	34,77	23,17	17,38
0,5	3,00	83,50	43,26	29,84	23,13
0,25	12,00	93,30	52,67	39,11	32,33
0,125	21,00	98,00	59,49	46,65	40,24
0,080	25,60	99,00	62,30	50,06	43,95

Tabla 7.1. Granulometría de las muestras (%Retenido acumulado)

A continuación, se presentan las diferentes figuras con las granulometrías de cada uno de los tamaños analizados.

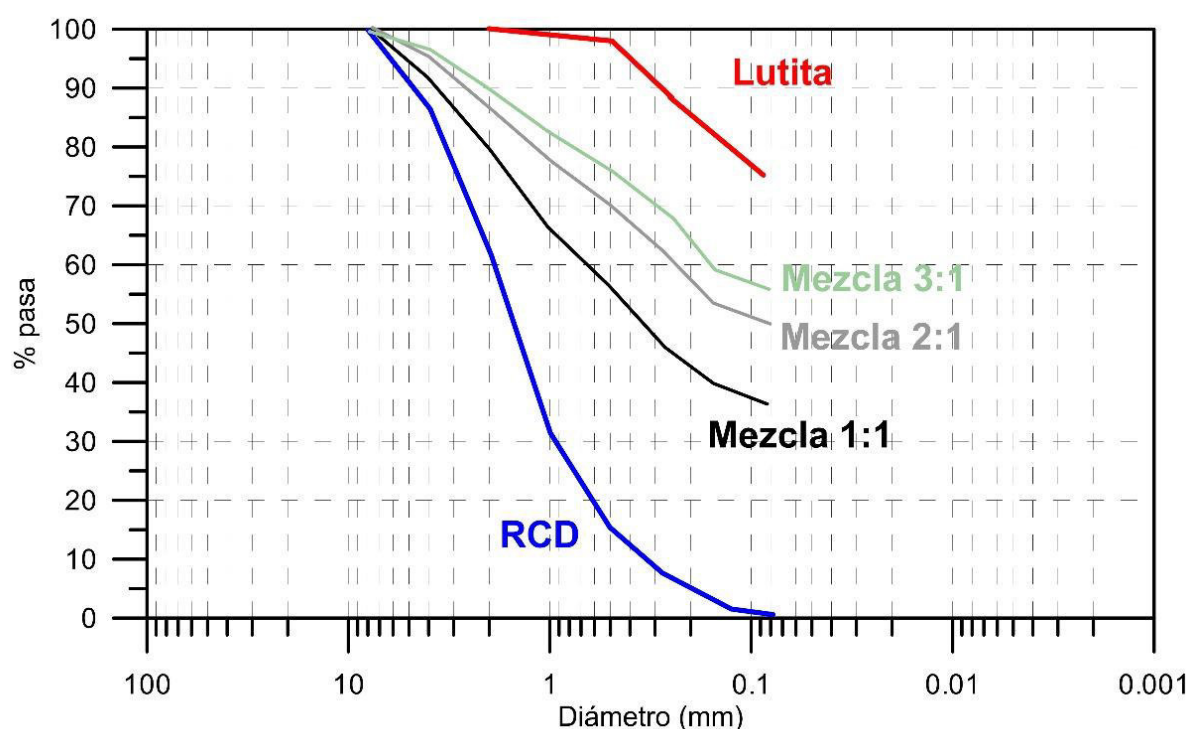


Figura 7.1. Curva granulométrica correspondiente a las muestras tamizadas

7.2.2.2. Discusión

Lutita

En lo que respecta a la lutita, en su granulometría se observa que el 74,40% pasa la malla N.º 200, lo que la sitúa claramente como suelo de partículas finas en la clasificación del USCS. Así mismo, el hecho de que el porcentaje de finos se encuentre en el intervalo 60-95 a priori le confiere un grado de expansividad potencial III (media a alta) según González Vallejo et al. (2004).

Su granulometría se puede definir como fina y cerrada, lo que a priori le confiere una impermeabilidad que dificultará la salida del agua y el gas en un proceso de compactación.

Árido reciclado

En términos generales el árido utilizado es igual al de la investigación de 2015, no obstante, se aprecia un ligero aumento de las partículas gravosas. Lo que supondrá que las mezclas tiendan a ser menos uniformes y mejor graduadas que entonces. El aumento de estas partículas se considera consecuencia de la exposición ambiental a la que ha estado sometido el árido, donde un porcentaje considerable de partículas finas ha podido

ser lavado. Quedando los coeficientes característicos en su granulometría de la siguiente manera:

Valores característicos	
D ₆₀	1,95
D ₃₀	0,99
D ₁₀	0,33
Cu	5,91
Cc	1,52

Tabla 7.2. Valores característicos en la granulometría del árido reciclado

Se observa que en su mayoría se trata de arena, con un contenido del 84% del total. El 15,90% es grava y el 1% restante finos. En referencia a su uniformidad ($5 \leq Cu \leq 20$), se concluye que se trata de un árido poco uniforme.

Según el USCS, con los resultados obtenidos, puede clasificarse al árido reciclado como arenas limpias mal graduadas con pocos finos del grupo SP, evidentemente sin riesgo de expansividad, según los siguientes criterios de clasificación:

- Más del 50% pasa por el tamiz N.º 4 ASTM.
- Menos del 5% pasa por el tamiz N.º 200 ASTM.
- Incumple el criterio de clasificación $Cu \geq 6$, por lo que se descarta el grupo SW.

El hecho de que esta fracción de árido reciclado esté por encima del 5% de partículas que pasan por el tamiz de 4 mm, conlleva incumplir lo recogido en el Anejo 15 "Recomendaciones para la utilización de hormigones reciclados" de la EHE-08. Cabe recordar que las fracciones recicladas finas ($4 \leq D$ y $d=0$ según EHE-08) están fuera de la mencionada recomendación. Éste es uno de los motivos por el cual el árido reciclado utilizado en esta investigación, por lo general, no corresponde a un subproducto del reciclado de RCDs.

Mezclas lutita-árido reciclado

En las tres granulometrías de las mezclas se observa un aumento progresivo del contenido en finos, pasando de un 37,70% para la mezcla 1:1 a un 56% para la mezcla 3:1. Esto se debe a la mayor proporción de árido reciclado en la mezcla 1:1. El agregar RCD al suelo aporta partículas de tamaño arena y, en menor medida, de grava, al suelo. Lo cual, a priori, reduce con respecto a la lutita el grado de expansividad potencial de III a II (baja a media).

En lo que respecta a las mezclas 1:1 y 2:1, atendiendo al USCS pasarían a situarse como suelos de arenas con finos. Según los siguientes criterios de clasificación:

- Más del 50% pasa por el tamiz N.º 4 ASTM.
- Más del 12% pasa por el tamiz N.º 200 ASTM.

En cuanto a la mezcla 3:1, es preciso señalar que se encuentra en el límite que separa las arenas con finos de los limos y arcillas, más aún si se tiene en cuenta que en el análisis granulométrico realizado se ha utilizado el tamiz 0,080 UNE y no el N.º 200 ASTM (0,074 mm) que es el fijado por el USCS para separar los suelos de partículas gruesas del de partículas finas.

En otro orden, es apreciable ver como la curva granulométrica tiende a la uniformidad conforme el porcentaje de RCD aplicado es mayor. Es destacable recordar que cuanto más uniforme es la granulometría de un suelo, más uniforme es el tamaño de sus huecos, menores densidades alcanzará, más fácilmente será erosionado, etc.

Un suelo de tamaño uniforme puede adquirir una compacidad menor que si su curva granulométrica es continua, pues en el segundo caso los granos pequeños llenan los huecos de los mayores. En este caso la granulometría mejor graduada corresponde a la mezcla 3:1.

Como se vio en el apartado 4.3.5.1 "Estabilización granulométrica", existen curvas granulométricas para conseguir la máxima compacidad y, en general, los pliegos de especificaciones de construcción determinan las franjas en que se pueden mover las curvas granulométricas.

Al igual que en 2015, la estabilización granulométrica planteada por cada mezcla, se encuentra próxima, a la "estabilización arena-arcilla" planteada por la AASHTO, aunque sin cumplir en su totalidad las condiciones, pues en todas las mezclas se sobrepasan los porcentajes límite del tamiz N.º 200 ASTM. No obstante, la mezcla 1:1 es la que más se aproxima.

A continuación, se muestran a modo de comparativa, las exigencias de la AASHTO para este tipo de estabilización y los valores obtenidos en las distintas mezclas.

Tamiz ASTM	AASHTO	Mezcla 1:1	Mezcla 2:1	Mezcla 3:1
N.º 10	100	100,00	100,00	100,00
N.º 20	55-90	75,00	85,00	87,00
N.º 40	37-70	65,00	78,00	81,00
Nº 200	8-25	46,64	57,26	61,99

Tabla 7.3. Granulometría para la fracción que pasa por el tamiz N.º 10 ASTM (%Pasa)

De la tabla anterior se deduce que para cumplir la granulometría propuesta por la AASHTO debería aumentar el porcentaje de participación del árido reciclado, quedando por tanto en entredicho la viabilidad económica y el máximo grado de aprovechamiento del material natural. De igual modo sucedería si se tratara de asemejar la granulometría de las mezclas a una curva granulométrica de máxima compacidad, por ejemplo, la deducida por Talbot.

7.2.3. Densidad real

7.2.3.1. Resultados

La siguiente tabla recoge los valores de densidad real de los materiales llevados a estudio:

Densidad de los materiales UNE-EN 1097-6:2014	
Material analizado	ρ_r (g/cm ³)
Lutita	2,57±0,02
Árido reciclado	2,17±0,05

Tabla 7.4. Resultados de densidad real de los materiales

7.2.3.2. Discusión

Lutita

La densidad de la obra de tierra proyectada dependerá en gran medida de la densidad de la lutita. La densidad obtenida en el ensayo entra dentro los valores habituales de esta roca sedimentaria, siendo esta una buena densidad, superior a 2000 kg/m³, límite para considerar un árido como ligero.

Árido reciclado

Del mismo modo que ocurre con la lutita, el árido reciclado estudiado tiene una buena densidad. No obstante, se aprecia una clara diferencia de densidad de estos con respecto a la del árido natural utilizado en la dosificación de los hormigones reciclados; siendo la de estos 2450 kg/m^3 según Pérez Bendito. (2011). Esto está motivado por la existencia de mortero adherido. El mortero adherido tiene una menor densidad, lo que le confiere al árido reciclado, conjunto de mortero, roca natural y, en menor medida, cemento sin hidratar (dado el control intenso de ejecución y la exposición ambiental a la que ha estado expuesto), una densidad menor.

La densidad del árido reciclado empleado se encuentra por debajo de las recogidas en el estado del arte (entre los 2260 y los 2570 kg/m^3). Si bien es cierto que los áridos contemplados no corresponden a fracciones finas, ya que la mayoría de estudios se centran en el hormigón reciclado. Sin embargo, en los trabajos de Ángel Salesa Bordanaba, (Salesa Bordanaba, 2014), la densidad de las arenas recicladas estudiadas está comprendida entre los 2110 y 2230 kg/m^3 . Esto viene a avalar la afirmación de que el tamaño de las partículas influye en la densidad, las fracciones más pequeñas presentan menor densidad.

7.2.4. Absorción de agua

7.2.4.1. Resultados

Los resultados del ensayo de absorción de agua en los áridos reciclados utilizados son los siguientes:

Absorción de agua UNE-EN 1097-6:2014	
Tiempo de inmersión	Ab (%)
3 horas	$5,71 \pm 0,1$
24 horas	$4,77 \pm 0,1$

Tabla 7.5. Resultados del ensayo de absorción de agua en árido reciclado

7.2.4.2. Discusión

Las absorciones de los áridos reciclados son muy superiores a las del árido fino natural empleado en la dosificación de los hormigones reciclados; siendo la de estos $2,65\%$ según Pérez Bendito. (2011). Este hecho se encuentra directamente vinculado con la presencia de mortero adherido y pasta de cemento sin hidratar.

La EHE-08 indica como requisito físico-mecánico para los áridos naturales utilizados que la absorción de agua sea menor o igual al 5%. Adicionalmente, en hormigones reciclados con más del 20% de árido reciclado (como es el caso del RCD utilizado), la combinación de árido grueso natural y reciclado debería cumplir la especificación que establece la Instrucción, presentando un coeficiente de absorción no superior al 5%.

Como puede observarse, la absorción obtenida incumple las especificaciones de la EHE-08, lo cual da idea de la influencia del mortero adherido y pasta de cemento sin hidratar.

Los resultados recogidos en el estado del arte para la absorción están en una horquilla de entre 2,2% y 8,7%, por lo que los valores obtenidos están dentro de los límites bibliográficos. Por su parte, los resultados de absorción de agua para la fracción arenosa en los trabajos de Ángel Salesa Bordanaba, (Salesa Bordanaba, 2014), están en torno a $6,9 \pm 0,1\%$. El ligero descenso de la absorción obtenida en este trabajo con respecto a los datos de Ángel Salesa Bordanaba se estima consecuencia del lavado soportado por el árido en su exposición ambiental desde 2014. También puede aplicarse este rozamiento a la absorción obtenida a las 24 horas de inmersión.

A modo comparativo la bajada de humedad en una estabilización con cal variará en función de la cal añadida y las condiciones ambientales, pero puede oscilar un 2% y un 5% (Morilla Abad, 1991). Se estima que la adición del 1% de cal viva puede rebajar la humedad del suelo en el 1,5% aproximadamente. Según los resultados de los ensayos existe una diferencia del 18% entre las densidades de la lutita y el RCD, lo cual, en condiciones de proporcionalidad en la distribución de los materiales y una estructura de las partículas favorable al desplazamiento de agua, podría suponer una reducción teórica de humedad del 4,66%.

7.2.5. Límites de Atterberg

7.2.5.1. Resultados

Los resultados de los Límites de Atterberg obtenidos en las distintas muestras llevadas a estudio son los siguientes:

LÍMITES DE ATTERBERG	Muestra analizada			
	Lutita	Mezcla 1:1	Mezcla 2:1	Mezcla 3:1
Límite Líquido	22,8	20,8	23,8	22,9
Límite Plástico	15,6	16,5	16,6	16,9
Índice de Plasticidad	7,2	4,3	7,2	6

Tabla 7.6. Resultados de los Límites de Atterberg

7.2.5.2. Discusión

De acuerdo con los resultados, utilizando la línea A y el criterio de baja y alta plasticidad en la carta de Casagrande, junto con lo expuesto en el apartado 7.2.2. "Análisis granulométrico" puede completarse la identificación de las muestras según el USCS del siguiente modo:

Clasificación según Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (USCS)		
Muestra estudiada	Símbolo de grupo	Nombre del grupo
Lutita	CL	Suelo de partículas finas. Arcilla baja plasticidad con arena
Mezcla 1:1	SC-SM	Suelo de partículas gruesas. Suelo de partículas gruesas con finos (suelo sucio). Arena arcilloso-limosa
Mezcla 2:1	SC	Suelo de partículas gruesas. Suelo de partículas gruesas con finos (suelo sucio). Arena arcillosa
Mezcla 3:1	CL-ML / SC-SM	Suelo de partículas finas. Arcilla limosa arenosa / Suelo de partículas gruesas. Suelo de partículas gruesas con finos (suelo sucio). Arena arcilloso-limosa

Tabla 7.7. Asignación de símbolos de grupo y nombre según USCS

Queda evidenciado que las variaciones, favorables o no, provocadas por la adición de árido reciclado apenas son significativas en la plasticidad de las muestras, pues en todos los casos ésta se mantiene baja. Si bien es cierto que la tendencia es a aumentar el Límite Plástico.

Según González Vallejo et al. (2004) en cuanto al grado de expansividad, desde el punto de vista del Límite Líquido, éste permanece invariable en un grado I (baja), pues en todos los casos está por debajo de 35, si bien es cierto que se alcanza el valor más bajo en la proporción de mezcla 1:1.

En cuanto a la mezcla 3:1, tal y como se ha señalado anteriormente, ésta se encuentra en el límite que separa las arenas con finos de los limos y arcillas. Este hecho tiene su interés dado que algunas recomendaciones de puesta en obra varían si se está en uno u otro de los suelos mencionados.

7.2.6. Ensayos de compactación Proctor

7.2.6.1. Resultados

A continuación, se presentan las curvas Proctor de densidad-humedad obtenidas en las distintas muestras, así como los resultados de densidad máxima seca y humedad óptima correspondiente.

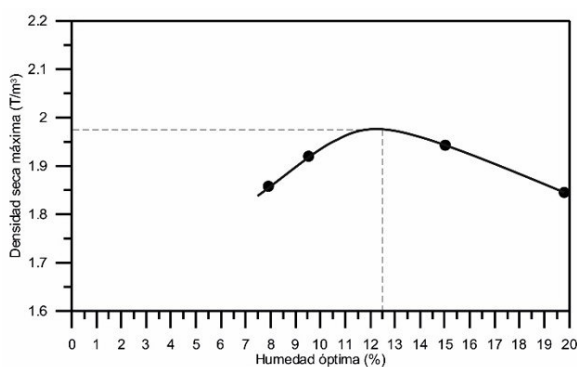


Figura 7.2. Curva p-w Proctor Normal obtenida en la lutita

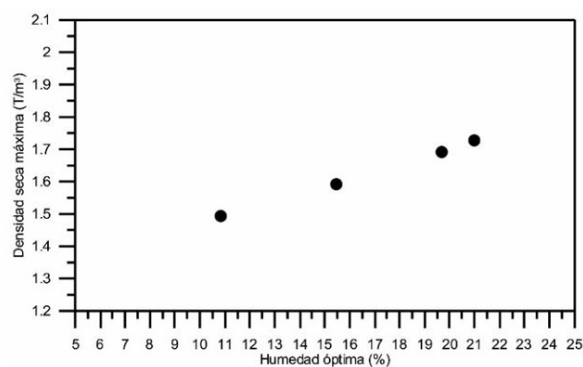


Figura 7.3. Curva p-w Proctor Normal obtenida en el árido reciclado

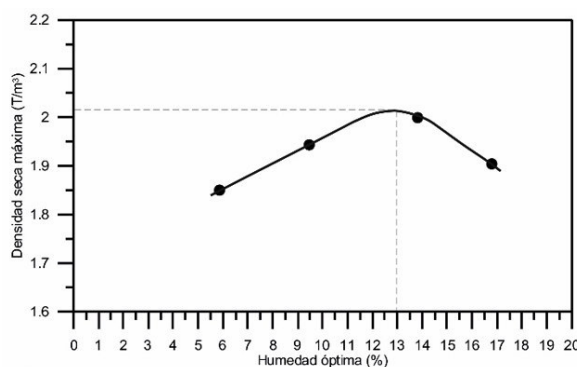


Figura 7.4. Curva p-w Proctor Normal obtenida en la mezcla 1:1

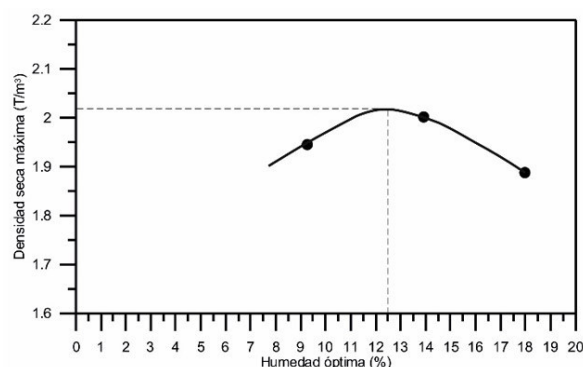
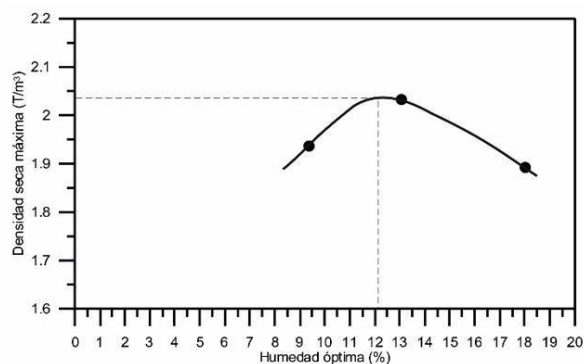
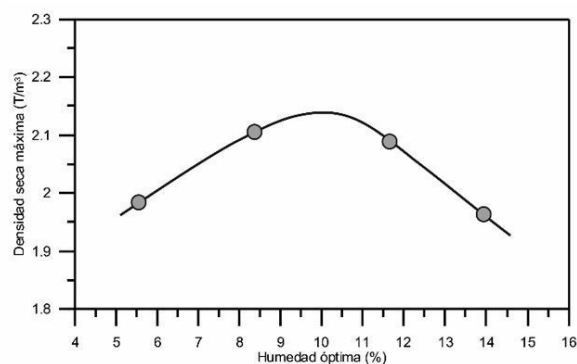


Figura 7.5. Curva p-w Proctor Normal obtenida en la mezcla 2:1



**Figura 7.6. Curva p-w Proctor Normal
obtenida en la mezcla 3:1**



**Figura 7.7. Curva p-w Proctor
Modificado obtenida en la mezcla 3:1**

Tabla 7.8. Resultados de los ensayos Proctor

Ensayos Proctor UNE 103500:1994 / UNE 103501:1994			
Muestra ensayada	Proctor Normal (PN) / Modificado (PM)	Densidad seca máxima ρ_d (t/m³)	Humedad óptima w_{op} (%)
Lutita	PN	1,97	12,4
Árido reciclado	PN	- *1	- *1
Mezcla 1:1	PN	2,01	13
Mezcla 2:1	PN	2,02	12,5
Mezcla 3:1	PN	2,04	12
Mezcla 3:1	PM	2,14	10

*1 No es posible obtener los valores dada la dificultad de realización del ensayo.

7.2.6.2. Discusión

Los resultados de humedad máxima de la presente investigación distan en torno a $\pm 6\%$ de media con respecto a los de la anterior, y los de densidad seca máxima $\pm 2\%$, no obstante, la tendencia de evolución de la humedad óptima en las distintas dosificaciones se mantiene. Los porcentajes de variación son considerados admisibles si se tiene en cuenta que en ambas ocasiones los ensayos de compactación Proctor se han realizado sin repetición.

Si bien es cierto que gran parte de los puntos obtenidos en la anterior investigación pueden incorporarse a las curvas obtenidas en ésta, otros, sin embargo, no guardan una relación evidente, ni con las de la presente investigación ni en ocasiones con la suya propia; esta es la razón por lo que se ha decidido no incluirlos en los gráficos anteriores y presentarlos en su anexo correspondiente (Anexo 3).

Por todo esto, las discusiones que a continuación se presentan se consideran como fidedignas al comportamiento real de las muestras.

Lutita

El carácter cohesivo del suelo le confiere una plasticidad que hace complicada su compactación con el aumento de humedad. Al incrementar el contenido de humedad aumenta de forma considerable este carácter, generando serios problemas a la hora completar los puntos de la rama descendente, tanto en la homogeneización de la humedad como en la efectividad de la maza Proctor.



Fotografía 7.5. Material lutítico amasado con w_{op}

En el proceso de amasado para homogeneización de la humedad, llevado a cabo en los sucesivos incrementos de humedad, se manifestaron todos los fenómenos señalados en el estado del arte para la identificación visual de suelos finos.

Se pone de manifiesto que su granulometría le confiere una impermeabilidad que dificulta la salida de agua y gas en el proceso de compactación. Presentan huecos pequeños por lo que el agua no puede salir fácilmente. Para humedades de la rama descendente apenas disminuye el volumen del conjunto; dada la prácticamente nula compresibilidad del agua, se está en un estado semifluido, que cede bajo la carga, desplazándose toda una masa. Los granos tienden a moverse entre sí, pero sin alcanzar posiciones de mayor compacidad.

La carga sobre terrenos con este comportamiento elevará mucho la presión intersticial. En caso extremos se pueden crear grandes desplazamientos de porciones

de terreno bajo la carga, debido a que los granos del terreno están flotando en el agua que les rodea, produciéndose el "efecto colchón", tan conocido en terrenos saturados (Rojo López, 1988).



Fotografía 7.6. Última tongada P.N. lutita compactada con w_{op}



Fotografía 7.7. Última tongada P.N. lutita compactada con $w=18\%$

En el gráfico se puede observar que a partir de un 13% de humedad la densidad seca máxima empieza a descender, a causa de la plasticidad y la alta deformabilidad. El valor de densidad máxima es de $1,98 \text{ t/m}^3$, siendo el más bajo de todas las muestras ensayadas. Tanto la humedad óptima obtenida, como su densidad seca correspondiente, son valores que entran dentro de los rangos habituales de arcillas de baja plasticidad según Rojo López. (1988).

Árido reciclado

El aspecto de la curva Proctor del árido reciclado no presenta la típica forma de campana con un máximo de densidad. Como se puede observar en el gráfico correspondiente, no se llega a obtener la rama descendente en la que a causa de una elevada humedad el suelo pierde densidad.

El motivo es que, en el momento de realizar el ensayo, en humedades superiores al 20% resultaba muy difícil compactar el suelo, debido a la fluidificación que se encontraba el árido.

El árido reciclado fino procedente de hormigón se caracteriza por tener una gran capacidad de absorción, la cual está causada principalmente por el mortero adherido. Debido a este hecho, al realizar el ensayo Proctor Normal los resultados de densidad aumentan ligeramente a la vez que se incrementa la humedad de forma considerable, llegando a un punto que la excesiva humedad fluidifica la masa y se produce un salpicado del agua fuera de la célula, no permitiendo finalizar el ensayo.

Se puede observar que la variación de la densidad con un 10% y 20 % de humedad es relativamente baja ya que solo varía de 1,57 a 1,70 t/m³.

Los resultados obtenidos muestran que la densidad seca máxima del árido reciclado es de 1,70 para una humedad óptima del 21%. Como se puede observar la densidad seca máxima se obtiene con un contenido de humedad muy elevado.

Mezclas lutita-árido reciclado

La densidad seca máxima para la mezcla arcilla-árido reciclado en la proporción 1:1 es de 2,01 t/m³, para una humedad óptima de compactación del 13%.

Si lo comparamos con los resultados del Proctor de la lutita, cuyos resultados son densidad máxima de 1,97 t/m³ para una humedad óptima del 12,4%, podemos observar un ascenso notable en la densidad seca máxima, así como en la humedad óptima. El ascenso de la densidad seca máxima puede ser ocasionado por una redistribución granulométrica que permite en cierto modo mejorar la trabajabilidad en decremento del carácter cohesivo.



Fotografía 7.8. Última tongada P.N. 1:1 compactada con w_{op}

No obstante, es evidente el ascenso en la humedad óptima, sin duda la explicación se encuentra relacionado con el carácter absorbente del árido reciclado, que unido a su gran contenido en esta muestra, eleva el porcentaje de agua necesario. Lo cual, en cierto modo es contraproducente en el objetivo de compactar la fracción cohesiva existente. Este hecho, unido a que la granulometría de la mezcla no está bien graduada (tiende a la verticalidad), no hace perceptible una mejora sustancial en la trabajabilidad con respecto a la lutita, especialmente en humedades superiores a la óptima.



Fotografía 7.9. Última tongada P.N. 1:1 compactada con $w=20\%$

En lo que respecta a la dosificación 2:1 se observa cómo la densidad seca máxima es de $2,02 \text{ t/m}^3$ para una humedad del 12,5 %. En comparación con los resultados del Proctor de la mezcla 1:1, se aprecia un ligero aumento de la densidad seca máxima a la vez que desciende la humedad óptima. Una granulometría más tendida que la 1:1, unida al efecto regulador de humedad que produce el árido reciclado, mejora sustancialmente la trabajabilidad de la mezcla; lo cual se hace más evidente en humedades elevadas.



**Fotografía 7.10. Última tongada P.N. 2:1
compactada con w_{op}**



**Fotografía 7.11. Última tongada P.N. 2:1
compactada con $w=18\%$**

En lo referente a la mezcla 3:1, ésta obtiene una densidad de $2,04 \text{ t/m}^3$ para una humedad óptima de compactación del 12%, lo que significa que en está dosificación se obtiene la densidad seca más elevada con la humedad óptima más baja. La explicación va en la línea de lo sucedido en la dosificación 2:1, pues la mezcla 3:1 corresponde a la granulometría mejor graduada de todas las muestras analizadas. El descenso de la humedad óptima ya es apreciable en la anterior dosificación, pero en ésta, la proporción de RCD es aún menor y por tanto su efectividad en la absorción también.



**Fotografía 7.12. Última tongada P.N. 3:1
compactada con w_{op}**



**Fotografía 7.13. Última tongada P.N. 3:1
compactada con $w=18\%$**

Los resultados obtenidos indican que al incorporar la proporción de RCD en la mezcla con la lutita se observa un aumento en la densidad seca. Todo ello tiene lugar

para unos valores muy similares de humedad óptima, pero, como se acaba de indicar, el RCD agregado en las mezclas facilita la tarea de compactación, alejando el comportamiento del material de aquél más cohesivo que exhibe la lutita por si sola.

Dado que la situación óptima se ha observado para una proporción 3:1, finalmente, sobre la mezcla 3:1 se ha realizado un ensayo de compactación de tipo Proctor Modificado, que se aproxima más a las condiciones reales de la compactación actual. Se ha obtenido una densidad seca máxima de $2,14 \text{ t/m}^3$, para una humedad óptima del 10%. Lo cual le confiere, en estos términos, según Tiktin. (1997) un comportamiento similar a la zahorra.



**Fotografía 7.14. Última tongada P.M. 3:1
compactada con w_{op}**



**Fotografía 7.15. Maza P.M. 3:1 tras
compactar una tongada con w_{op}**

Además, se dispone de los resultados del Proctor Modificado llevado a cabo en la anterior investigación a la mezcla 2:1. El resultado obtenido en el ensayo ($2,1 \text{ T/m}^3$ para una humedad óptima del 11%) también era razonablemente bueno para su puesta en obra. Además, con este resultado, queda reafirmada la tendencia evolutiva de la densidad y humedad óptimas obtenidas para las distintas dosificaciones en los ensayos Proctor Normal, lo cual no fue posible evidenciar en la anterior investigación.

Con el propósito de cotejar el comportamiento de las distintas dosificaciones de las mezclas ensayadas en la presente investigación, se presenta el siguiente gráfico comparativo.

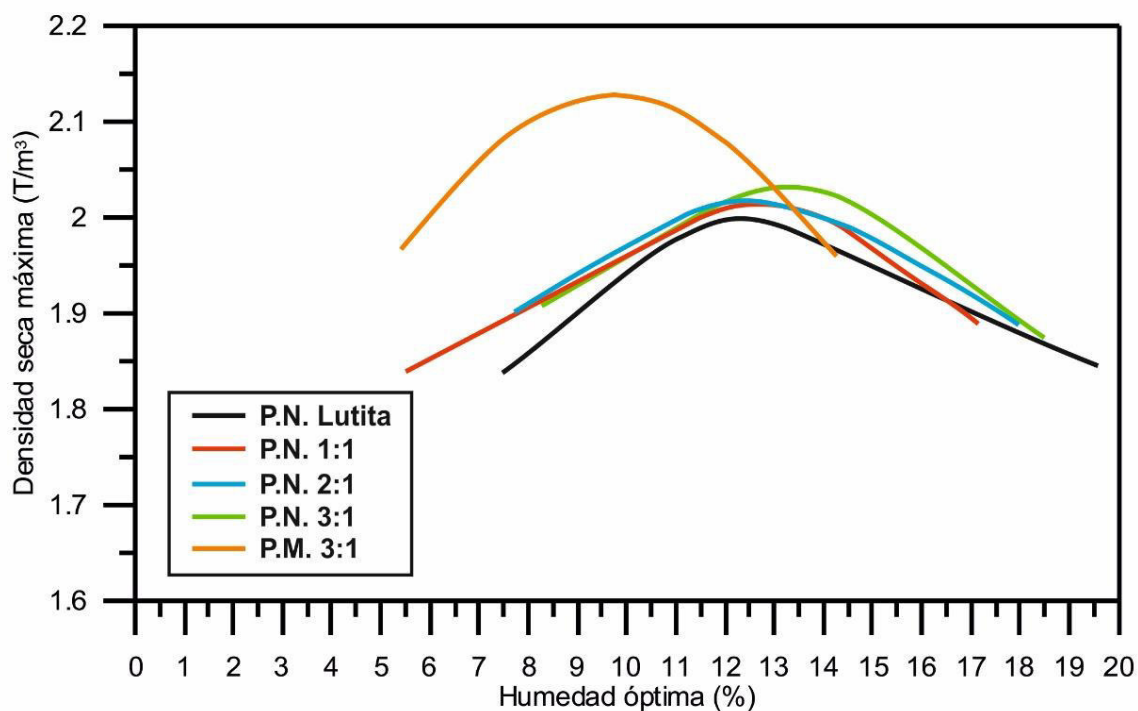


Figura 7.8. Gráfico comparativo de las curvas p-w obtenidas en las distintas muestras ensayadas

Otro aspecto a resaltar es la disminución de angulosidad que adquiere la curva Proctor cuando a la lutita se le implementa el RCD, lo cual corrobora la percepción subjetiva de que en humedades elevadas las mezclas 2:1 y 3:1 no acusan un decremento en su trabajabilidad tan notable como en la 1:1 y la lutita. Cuanto más redondeada es la curva, en general indica un material de buena granulometría y compactabilidad (Tiktin, 1997). De lo contrario en humedades próximas a la óptima la bajada de densidad es importante.

Como se ha visto, en todo momento los resultados numéricos se ven acompañados por las observaciones realizadas durante los ensayos en laboratorio. En esa línea, también es visible cómo la pérdida del carácter cohesivo de las mezclas se ve reflejada en la porción de material que queda adherido en la maza cuando se finaliza la compactación de las distintas tongadas del ensayo.

Es por eso que en el caso de los suelos arcillosos resulta más adecuado utilizar otro ensayo de compactación, el Harvard miniatura, con otra energía y tipo de maza (que aplica la energía por presión y no por impacto) (González Vallejo et al., 2004).



Fotografía 7.16. Maza P.N. 1:1 tras compactar una tongada con w_{op}



Fotografía 7.17. Maza P.N. 3:1 tras compactar una tongada con w_{op}

7.2.7. Rotura a compresión simple

7.2.7.1. Resultados

El resumen de los resultados del ensayo de rotura a compresión simple se muestra a continuación. Cabe recordar que de cada muestra se llevaron a rotura dos probetas. La totalidad de los datos extraídos, proporcionados por el Laboratorio Control 7 S.A.U., se adjuntan en el Anexo 4.

Ensayo de rotura a compresión simple UNE 103400:1993				
Mezcla	Densidad seca (t/m^3)	Resistencia a compresión (kg/cm^2)	Límite elástico (kg/cm^2)	Módulo de Young (kg/cm^2)
1:0	1,98	$14,70 \pm 0,30$	$9,56 \pm 0,35$	$814,61 \pm 245$
1:1	2,01	$13,75 \pm 1,45$	$11,23 \pm 1,13$	$621,28 \pm 133$
2:1	2,02	$13,95 \pm 1,25$	$10,73 \pm 0,63$	$909,20 \pm 26$
3:1	2,04	$10,85 \pm 1,05$	$8,74 \pm 0,59$	$944,64 \pm 10$

Tabla 7.9. Resultados del ensayo de rotura a compresión simple

Los resultados que aquí se muestran se han obtenido a través de las gráficas fuerza-desplazamiento expuestas en el Anexo 4, trazando una recta que indica el campo en el que el material se comporta de forma elástica; es decir, que, al cesar la fuerza aplicada, el material recupera la deformación sufrida.

El límite elástico es el punto en el cual la curva del ensayo de compresión se separa de la recta trazada por el campo elástico. A partir de este punto el material sufre una deformación plástica, es decir, permanente.

Los datos también permiten calcular el módulo de Young, que informa de la relación entre esfuerzo-deformación unitaria dentro del campo de comportamiento elástico.

7.2.7.2. *Discusión*

Cuanto más alto es el valor del módulo de Young mayor será la carga que puede soportar un material sin sufrir una deformación permanente, factor importante a la hora de determinar si un material es apto para una cierta estructura y evitando así futuras deformaciones de la misma.

Desde un punto de vista mecánico, los valores obtenidos para el módulo de Young en cada una de las mezclas, muestran variaciones notables. Se obtiene una variación máxima del 52 %, sin embargo, esta variación no es tan acusada en el límite elástico, en la que la variación no supera el 28 %.

Estos datos sugieren que la mezcla 3:1 presenta un mejor comportamiento mecánico en función de su módulo de Young, aunque presenta un límite elástico más bajo. Lo que indica que la mezcla sufriría una menor deformación dentro del campo elástico, pero se alcanzaría antes el campo de deformación plástica.

Por otro lado, la mezcla 1:1 presenta el módulo de Young más bajo en comparación con el resto de muestras, sin embargo, su límite elástico es el más alto. Lo que permitiría soportar una mayor carga sin sufrir una deformación permanente.

Según el CTE: DB-SE-C la totalidad de las muestras corresponderían con un suelo de roca blanda (según el valor de resistencia a compresión) o medio (según el módulo de Young) (Ministerio de Vivienda, 2006).

Tipo de suelo	N _{SPT}	q _u (kN/m ²)	E (MN/m ²)
Suelos muy flojos o muy blandos	< 10	0 - 80	< 8
Suelos flojos o blandos	10 - 25	80 - 150	8 - 40
Suelos medios	25 - 50	150 - 300	40 - 100
Suelos compactos o duros	50 - Rechazo	300 - 500	100 - 500
Rocas blandas	Rechazo	500 - 5.000	500 - 8.000
Rocas duras	Rechazo	5.000 - 40.000	8.000 - 15.000
Rocas muy duras	Rechazo	> 40.000	>15.000

Tabla 7.10. Valores orientativos de N_{SPT}, resistencia a compresión simple y módulo de elasticidad (módulo de Young) de suelos según el CTE: DB-SE-C (Ministerio de Vivienda, 2006)

Resultan importantes la variación de la resistencia a compresión y el módulo de Young, ya que estos parámetros tienen una buena correlación con otros parámetros importantes como la resistencia al corte del material. Aunque obviamente no permiten determinar los parámetros de resistencia al corte efectivos (c' , ϕ'), sí permiten determinar de forma aproximada la máxima tensión de corte disponible frente a procesos de carga en los que se puedan suponer condiciones sin drenaje.

En línea con el párrafo anterior cabe destacar que, según la resistencia a compresión simple, todas las muestras entran dentro de la consistencia "Dura", que es la más elevada de la clasificación de los suelos finos propuesta por el CTE: DB-SE-C. Si bien es cierto que el valor más bajo es el de la mezcla 3:1.

Por último, cabe señalar que no ha sido posible comparar los resultados obtenidos en el ensayo de rotura a compresión simple con los obtenidos en anteriores investigaciones sobre las mismas muestras, dado que en aquellos se evidencian errores de cálculo que los hacen susceptibles de controversia.

7.2.8. Índice C.B.R.

7.2.8.1. Resultados

ÍNDICE C.B.R. Mezcla 3:1	85% Proctor Modificado	3,7
	95% Proctor Modificado	4,6
	100% Proctor Modificado	5,3
	Hinchamiento (%)	0,3

Tabla 7.11. Resultados del Índice C.B.R. en la mezcla 3:1 según UNE 103502:1995

Índice C.B.R. según el método de Trocchi						
Mezcla	Valores de cálculo característicos del IG				IG	C.B.R.
	a	b	c	d		
1:0	39	40	0	0	8	13
1:1	3	23	0	0	1	20
2:1	15	35	0	0	3	17
3:1	21	41	0	0	4	17

Tabla 7.12. Resultados del Índice C.B.R. según el método de Trocchi

7.2.8.2. Discusión

En lo referente al índice C.B.R. no se observa correlación entre los resultados obtenidos por medio del método Trocchi y el ensayo normalizado. Lo que hace replantear seriamente las conclusiones que de los resultados del ensayo normalizado se puedan extraer, más si cabe cuando el método de Trocchi se considera válido para suelos con valores menores a veinte, dado que en valores superiores el índice que se obtiene es demasiado conservador.

Otro aspecto que puede acreditar al método Trocchi en esta investigación, es la correspondencia entre los índices obtenidos y los resultados de rotura a compresión simple en las escalas comparativas de criterio usuales de clasificación de plataformas IF-3.

En cualquier caso, los valores obtenidos por medio del ensayo normalizado también permiten situar la mezcla en cualquier zona de un terraplén de carreteras, que, por otra parte, en obra civil es el que más volumen de tierras consume. Teniendo en cuenta que por regla general el PG-3 indica que:

- En coronación se utilizarán suelos adecuados o seleccionados siempre que su capacidad de soporte sea la requerida para el tipo de explanada previsto en el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares y su índice CBR, correspondiente a las condiciones de compactación de puesta en obra, sea como mínimo de cinco.
- En el cimiento se utilizarán suelos tolerables, adecuados o seleccionados siempre que las condiciones de drenaje o estanqueidad lo permitan, que las características del terreno de apoyo sean adecuadas para su puesta en obra y siempre que el índice CBR, correspondiente a las condiciones de compactación de puesta en obra, sea igual o superior a tres.

Se utilizarán materiales que satisfagan las condiciones que defina el Proyecto en cuanto a impermeabilidad, resistencia, peso estabilizador y protección frente a la erosión.

Y sabiendo que en caso de omisión se considerará como ensayo de referencia el Proctor modificado. Los suelos clasificados como tolerables, adecuados y seleccionados podrán utilizarse según lo indicado en anteriormente de forma que su densidad seca después de la compactación no sea inferior:

- En la zona de coronación, a la máxima obtenida en el ensayo Proctor de referencia.
- En las zonas de cimiento, núcleo y espaldones al noventa y cinco por ciento (95%) de la máxima obtenida en dicho ensayo.

Otro hecho que se evidencia, esta vez a través del método de Trocchi, es el aumento, como mínimo del 30%, cuando a la lutita se le agrega RCD en las dosificaciones propuestas.

8. EVALUACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA

8.1. INTRODUCCIÓN

El presente capítulo expone de forma resumida los resultados obtenidos en la evaluación técnica del suelo a tratar y las posibles soluciones analizadas en los ensayos. Así como una valoración económica de la dosificación considerada como óptima.

El objetivo principal es ofrecer a los proyectistas que apliquen la normativa vigente una información adicional, en muchos casos relevante, de la capacidad estructural de las diferentes opciones para su aplicación en un proyecto determinado. El estudio económico sólo ofrece una orientación general comparativa, previa al estudio detallado a realizar en cada proyecto con los costes de construcción aplicables, teniendo en cuenta los materiales disponibles para la obra.

8.2. VALORACIÓN TÉCNICA

La valoración técnica llevada a cabo tiene como propósito ir más allá de las condiciones *sine qua non* que la gran mayoría de normativas técnicas aplican en la clasificación de materiales-suelos que van a ser utilizados en estructuras de tierra.

Para ello, e intentando abarcar el espectro más amplio de procedimientos en obras civiles en España, se ha tenido en consideración la siguiente normativa de referencia:

- *Código Técnico de la Edificación (CTE), Documento Básico-Seguridad Estructural-Cimientos (DB-SE-C).*
- *Guía de cimentaciones en obras de carretera. (GCOC).*
- *Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes. (PG-3). Artículo 330. Terraplenes.*
- *Norma 6.1. IC "Secciones de firme" de la Instrucción de Carreteras. (Norma 6.1 IC).*
- *Instrucción para el proyecto y construcción de obras ferroviarias IF-3. Vía sobre balasto. Cálculo de espesores de capas de la sección transversal. (IF-3)*
- *Pliego General de Prescripciones Técnicas tipo para los proyectos de plataforma. (PGP-2011).*

8.2.1. Resultados

Tabla 8.1. Valoración técnica material-suelo: lutita

VALORACIÓN TÉCNICA MATERIAL/SUELO: LUTITA						
Normativa técnica		CTE	PG-3	Norma 6.1-IC	PGP-2011	IF-3
Estructura a formar		Cimiento	Terraplén	Explanada	Terraplén	Plataforma
Parámetro ensayado	Granulometría	Cohesivo	Tolerable	0	Apto * ²	QS1.1
	Límites de Atterberg		Seleccionado	3	Apto	
	Compresión simple	Roca blanda				
	Módulo de Young	Medio				QS2
	C.B.R. Trocchi		* ¹	2	Apto	QS2

*¹ Puede ser utilizado en cualquier zona de un terraplén. El índice C.B.R. no es condicionante en la clasificación de materiales, no obstante, un valor ≥ 5 permite situarlos en cualquier zona del terraplén.

*² "No apto" para la formación de la coronación.

Tabla 8.2. Valoración técnica material/suelo: Mezcla 1:1

VALORACIÓN TÉCNICA MATERIAL/SUELO: MEZCLA 1:1						
Normativa técnica		CTE	PG-3	Norma 6.1-IC	PGP-2011	IF-3
Estructura a formar		Cimiento	Terraplén	Explanada	Terraplén	Plataforma
Parámetro ensayado	Granulometría	Cohesivo	Adecuado * ¹	1	Apto	QS1.3
	Límites de Atterberg		Seleccionado	3	Apto	
	Compresión simple	Roca blanda				
	Módulo de Young	Medio				QS2
	C.B.R. Trocchi		* ²	3	Apto	QS3

*¹ Próximo al límite granulométrico fronterizo con suelos tolerables.

*² Puede ser utilizado en cualquier zona de un terraplén. El índice C.B.R. no es condicionante en la clasificación de materiales, no obstante, un valor ≥ 5 permite situarlos en cualquier zona del terraplén.

Tabla 8.3. Valoración técnica material-suelo: Mezcla 2:1

VALORACIÓN TÉCNICA MATERIAL/SUELO: MEZCLA 2:1						
Normativa técnica		CTE	PG-3	Norma 6.1-IC	PGP-2011	IF-3
Estructura a formar		Cimiento	Terraplén	Explanada	Terraplén	Plataforma
Parámetro ensayado	Granulometría	Cohesivo	Tolerable	0	Apto * ²	QS1.3 * ³
	Límites de Atterberg		Seleccionado	3	Apto	
	Compresión simple	Roca blanda				
	Módulo de Young	Medio				QS3
	C.B.R. Trocchi		* ¹	3	Apto	QS3

*¹ Puede ser utilizado en cualquier zona de un terraplén. El índice C.B.R. no es condicionante en la clasificación de materiales, no obstante, un valor ≥ 5 permite situarlos en cualquier zona del terraplén.

*² "No apto" para la formación de la coronación.

*³ El porcentaje limitante se obtiene del análisis granulométrico realizado al material que pasa por el tamiz de 63 mm.; estos porcentajes pueden ser incrementados hasta el 45 % si se toma un número suficientemente representativo de muestras.

Tabla 8.4. Valoración técnica material-suelo: Mezcla 3:1

VALORACIÓN TÉCNICA MATERIAL/SUELO: MEZCLA 3:1						
Normativa técnica		CTE	PG-3	Norma 6.1-IC	PGP-2011	IF-3
Estructura a formar		Cimiento	Terraplén	Explanada	Terraplén	Plataforma
Parámetro ensayado	Granulometría	Cohesivo	Tolerable	0	Apto * ³	QS1.1
	Límites de Atterberg		Seleccionado	3	Apto	
	Compresión simple	Roca blanda				
	Módulo de Young	Medio				QS3
	C.B.R. Trocchi		* ¹	3	Apto	QS3
	C.B.R. UNE		* ¹	1 * ²	Apto * ⁴	QS2

*¹ Puede ser utilizado en cualquier zona de un terraplén. El índice C.B.R. no es condicionante en la clasificación de materiales, no obstante, un valor ≥ 5 permite situarlos en cualquier zona del terraplén.

*² No apto en la capa superior de las empleadas para la formación de la explanada y cuando sobre él se forme una explanada de categoría E1.

*³ "No apto" para la formación de la coronación.

*⁴ "No apto" para la formación de la coronación. El índice CBR se calcula para la densidad mínima permitida en obra que será, si no se indica específicamente, el 95% de la densidad máxima del Proctor Modificado. Será, por tanto, "apto" si la densidad mínima permitida en obra es la correspondiente al 100%.

8.2.2. Discusión

Tras la valoración técnica, se observa que el aumento de la capacidad portante llevada a cabo en las mezclas 2:1 y 3:1, queda reflejado las normativas consultadas,

situándolas en las categorías más altas. Lo cual indica que podrían ser implantadas en cualquier localización de las estructuras. El módulo de Young de la mezcla 1:1 es la que hace que esta esté en una posición inferior, aunque sólo para formación de plataformas ferroviarias.

En todas las muestras analizadas, incluida la lutita, su capacidad portante y consistencia no sería un limitante a la hora de formar parte de estructuras por si solas con las exigencias más elevadas contempladas en las normativas. No obstante, tal y como ocurre en todas muestras, la granulometría es el factor que las sitúa en los niveles de calidad inferiores de las normativas.

El análisis granulométrico sitúa a todas las muestras, exceptuando a la mezcla 1:1, en el ámbito de los suelos cohesivos. Si bien es cierto que tomando como referente la GCOC, sólo sería considerado como suelo cohesivo la lutita. En cualquier caso, queda evidenciado que el aparente carácter cohesivo es un limitante. Tratando de buscar explicación a este hecho se hace preciso recordar lo expuesto en el Capítulo 4 "Estado del Arte":

- Cuanto mayor es la cohesión, más difícil se hace la compactación, requiriéndose más energía/volumen (mayor carga lineal o nº de pasadas), o menor espesor. Una propiedad fundamental de estos suelos, en lo que a compactación se refiere, es la dificultad que presentan, tanto para reducir como para incrementar su humedad en una capa previamente extendida, siendo preferible en banco o perfil (más costoso reducir que aumentar).

PRECIPITACIÓN /DÍA	TIPOS DE SUELOS			
	Gravas guijarros. Gravas y arenas	Suelos arenosos bien graduados. Arenas	Suelos arenosos mal graduados. Arcilla	Arcilla húmeda. Suelos arcillosos
3 mm.	0 días	0 días	0-0,5 días	0-0,5 días
De 3 a 10 mm.	0	0	1-1,5	1,5-2
De 10 a 30 mm.	0-0,5	0,5-1	1,5-2	2-3
Más 30 mm.	1	1,5-2	2-3	3-5

Tabla 8.5. Días perdidos después de lluvias

- Se pone de manifiesto que su granulometría le confiere una impermeabilidad que dificulta la salida de agua y gas en el proceso de compactación. Presentan huecos pequeños por lo que el agua no puede salir. Para humedades superiores

a la óptima no disminuye el volumen del conjunto; dada la prácticamente nula compresibilidad del agua, se está en un estado semifluido, que cede bajo la carga, desplazándose toda una masa. Los granos tienden a moverse entre sí, pero sin alcanzar posiciones de mayor compacidad. Por lo que, se hace necesario recurrir a la compactación por repetición de ciclos de carga-descarga, por lo general con vibración, siempre y cuando se esté en humedades próximas a la óptima.

- El fenómeno de colapso, debido a la formación de macrohuecos entre los glomérulos duros que no han llegado a disgregarse durante el proceso de elaboración (la mayor problemática de los suelos cohesivos son sus elevados tiempos de consolidación o de expulsión de agua bajo esfuerzos). Esto quiere decir que de cara al apoyo de terraplén y estructuras en este tipo de materiales deberá comprobarse la posible influencia del agua.

Todo lo anterior lleva en la mayoría de los casos a plantear distintas alternativas de puesta en obra. Bien compactar por repetición de ciclos de carga-descarga con o sin vibración, llevar a cabo una estabilización o, en última instancia, sustituir el suelo por otro de mejores prestaciones, dado que la práctica actual es optimizar al máximo la compensación de tierras. Como es lógico, cada obra tiene particularidades que harán decantarse por una u otra opción.

En todo caso, se deben utilizar materiales que permitan cumplir las condiciones básicas siguientes:

- Puesta en obra en condiciones aceptables.
- Estabilidad satisfactoria de la obra.
- Deformaciones tolerables a corto y largo plazo, para las condiciones de servicio que se definan en Proyecto.

En el caso concreto que ocupa a esta investigación, aún en altas humedades, ha quedado probado que las mezclas 2:1 y 3:1 se alejan del carácter cohesivo del suelo tratado, permitiendo a través de una mejora en su trabajabilidad, alcanzar niveles de densidad y resistencia elevados.

A pesar de ello, hay que tener en cuenta que para tratar un volumen grande de suelo la mezcla 3:1 presenta una ventaja a la hora de su aplicación en un caso real, ya que el volumen de suelo tratado con una misma cantidad de RCD sería muy superior en

comparación con las otras mezclas estudiadas. Lo cual va en pro de su viabilidad económica, considerándola por tanto como la dosificación óptima.

Por último, no hay que olvidar que existen otros parámetros evaluables por las normativas estudiadas, que también condicionan la clasificación de los materiales, como son: índice Lambe, presión de hinchamiento, hinchamiento libre, colapso de suelos, módulo de compresibilidad, deflexión patrón y estudio de elementos secundarios. Estos últimos, dado el emplazamiento del afloramiento de la lutita, a priori no deberían ser un condicionante; de hecho, en la proyección de la A-23 se estimaron los siguientes valores:

- Materia orgánica: **MO** = 2,5% (niveles más superficiales)
- Sulfatos: **SO₄** = 0,06 %
- Carbonatos: **CO₃** = 3,4 - 16,57%

Así mismo, de acuerdo con los resultados de Ángel Salesa Bordanaba. (2014), el contenido en sales solubles, incluido el yeso, de los áridos reciclados utilizados (<0,006%), el contenido de sulfatos (<0,5%) y el contenido en humus (negativo), no van a limitar su empleo.

Respecto a los parámetros que evalúan la susceptibilidad a la expansividad, pueden intuirse por medio de la tabla 4.13. "Grados de expansividad y valores medios de parámetros geotécnicos" (González de Vallejo et al., 2004). No obstante, en la investigación de Fuertes Blanco. (2016), se obtuvo una presión de hinchamiento (UNE 103600:1996) de 0 MPa en la lutita, lo que cabe concluir que no presenta expansividad. Hecho ratificado por el hinchamiento obtenido en el ensayo C.B.R. practicado a la mezcla 3:1, donde este ha sido 0,3%.

8.3. VALORACIÓN ECONÓMICA

Este apartado pretende abordar los costes de construcción de las distintas soluciones de puesta en obra del suelo cohesivo estudiado, a efectos de una primera aproximación comparativa con la estabilización propuesta en esta investigación. Por ello, no deben tomarse como referencia los costes aquí empleados, puesto que cada obra tiene sus costes particulares.

Esencialmente, las soluciones existentes para la puesta en obra del suelo cohesivo van a diferir en la preparación del suelo, en caso de que sea necesaria, y en su modo

de compactación. Por ello se ha realizado una evaluación económica, en las situaciones más favorables, de estas unidades de obra en los siguientes casos:

- Terraplén de carretera con material cohesivo de la traza, mediante compactación con ciclos de carga-descarga con vibración.
- Terraplén de carretera con materiales procedentes de préstamo o cantera, desechando el cohesivo de la traza.
- Terraplén de carretera con material cohesivo de la traza estabilizado. Estabilizaciones conformes al PG-3, Artículo 512. Suelos estabilizados in situ.
- Terraplén de carretera con material cohesivo de la traza estabilizado con árido reciclado procedente de hormigón (0-6 mm).

Con el objetivo de que la evaluación económica sea veraz y equivalente a todas las opciones constructivas mencionadas, ésta se ha realizado conforme a la *Orden Circular 37/2016. Base de Precios de Referencia de la Dirección General de Carreteras*. Cuando en ésta no se ha encontrado algún procedimiento constructivo en particular, se ha recurrido, por considerarse semejante, a la *Base de Precios Centro 2016* editada por el Gabinete Técnico del Colegio Oficial de Aparejadores, Arquitectos Técnicos e Ingenieros de Edificación de Guadalajara. En tal caso se indica cuál ha sido el dato consultado.

Antes de abordar la valoración económica, cabe añadir una explicación al hecho de que en ésta no se vayan a incluir costes indirectos. Los costes indirectos son aquellos que no pueden atribuirse a una unidad de obra en particular sino al conjunto de la obra, y por tanto van a depender de sus particularidades (personal técnico, instalaciones, consumos, imprevistos, etc.), y aquí se trata de valorar un reducido número de unidades de la obra de forma generalista, sin tener en cuenta las características globales de la misma.

8.3.1. Resultados

Con las particularidades mencionadas, y mediante la Justificación de Precios de las fuentes consultadas, se ha llegado a los costes reflejados a continuación.

Terraplén de carretera con material cohesivo de la traza, mediante compactación con ciclos de carga-descarga con vibración

Nº Precio	Cantidad	Ud	Descripción	Precio	Subtotal	Importe
*1	m ³		TERRAPLÉN CON MATERIALES COHESIVOS PROCEDENTES DE LA EXCAVACIÓN, i/ EXTENDIDO, HUMECTACIÓN, NIVELACIÓN, COMPACTACIÓN, TERMINACIÓN Y REFINO DE TALUDES TOTALMENTE TERMINADO.			
MO00000002	0,0012	h	Capataz	20,54	0,02	
MO00000006	0,0054	h	Peón especialista	16,77	0,09	
Q040401B01	0,0054	h	Tractores sobre cadenas. De 138 kW de potencia (19,8 t)	94,61	0,51	
Q040601B01	0,0054	h	Motoniveladoras. De 104 kW de potencia	80,28	0,43	
MO8RN050*2	0,0110	h	Compactador vibratorio pata de cabra autopropulsado, de un cilindro. De 17 t de masa	56,93	0,63	
Q050202C01	0,0054	h	Compactador vibrante autopropulsado, de un cilindro, liso. De 16 t de masa	50,62	0,27	
Q090201B01	0,0018	h	Camión cisterna para riego. Para una cantidad de 8000 litros	80,74	0,15	
MT01010001	0,2500	m ³	AGUA	0,58	0,15	
				Mano de obra	0,12	
				Maquinaria	1,99	
				Material	0,15	
				Total partida	2,25 €	

DOS EUROS CON VEINTICINCO CÉNTIMOS

*1 La OC 37/2016 no contempla una unidad de obra específica para suelos cohesivos, por lo que se ha adaptado la N°:01.04.01 330.0020 tomando como referencia la Guía Técnica "Réalisation des remblais et des couches de forme" del LCPC y SETRA el Pliego de Prescripciones Técnicas británico del Department of Transport.

*2 Dato extraído de "Base de Precios Centro 2016".

Terraplén de carretera con material cohesivo de la traza estabilizado con cal. S-EST1

Nº Precio	Cantidad	Ud	Descripción	Precio	Subtotal	Importe
01.07.01 512.0010	m ³		TERRAPLÉN CON SUELO ESTABILIZADO "IN SITU" CON CAL (A PIE DE OBRA), TIPO S-EST1 CON TIERRAS DE LA PROPIA EXCAVACIÓN, EXTENDIDO Y COMPACTADO, HUMECTACIÓN O SECADO, TERMINACIÓN Y REFINO DE TALUDES TOTALMENTE TERMINADO.			
MO00000002	0,0010	h	Capataz	20,54	0,02	
MO00000007	0,0120	h	Peón ordinario	16,60	0,20	
Q040601B05	0,0060	h	Motoniveladoras. De 121 kW de potencia	88,25	0,53	
Q050102A05	0,0060	h	Compactadores de ruedas múltiples, autopropulsados. De 7 ruedas, 35 t lastrado	71,92	0,43	

Nº Precio	Cantidad	Ud	Descripción	Precio	Subtotal	Importe
Q050202C01	0,0120	h	Compactador vibrante autopropulsado, de un cilindro, liso. De 16 t de masa	50,62	0,61	
Q090201B01	0,0020	h	Camión cisterna para riego. Para una cantidad de 8000 litros	80,74	0,16	
Q090003A05	0,0030	h	Estabilización de suelos. Distribuidor de pulverulentos. En seco. Remolcado de 17 m³	34,95	0,10	
Q090002A01	0,0070	h	Estabilizadores de suelos autopropulsados. Para anchura de 2,50 m. De 370 kW de potencia (25 t)	197,70	1,38	
01.07.07 200.0010	0,0400	t	CAL CL 90-S	67,69	2,71	
MT01010001	0,1000	m³	AGUA	0,58	0,06	

Mano de obra	0,22
Maquinaria	3,22
Material	2,77

Total partida	6,20 €
----------------------	---------------

SEIS EUROS CON VEINTE CÉNTIMOS

Terraplén de carretera con material cohesivo de la traza estabilizado con cemento. S-EST1

Nº Precio	Cantidad	Ud	Descripción	Precio	Subtotal	Importe
01.07.01 512.0010	m³		TERRAPLÉN CON SUELO ESTABILIZADO "IN SITU" CON CEMENTO (A PIE DE OBRA), TIPO S-EST1 CON TIERRAS DE LA PROPIA EXCAVACIÓN, EXTENDIDO Y COMPACTADO, HUMECTACIÓN O SECADO, TERMINACIÓN Y REFINO DE TALUDES TOTALMENTE TERMINADO.			
MO00000002	0,0010	h	Capataz	20,54	0,02	
MO00000007	0,0120	h	Peón ordinario	16,60	0,20	
Q040601B05	0,0060	h	Motoniveladoras. De 121 kW de potencia	88,25	0,53	
Q050102A05	0,0060	h	Compactadores de ruedas múltiples, autopropulsados. De 7 ruedas, 35 t lastrado	71,92	0,43	
Q050202C01	0,0120	h	Compactador vibrante autopropulsado, de un cilindro, liso. De 16 t de masa	50,62	0,61	
Q090201B01	0,0020	h	Camión cisterna para riego. Para una cantidad de 8000 litros	80,74	0,16	
Q090003A05	0,0030	h	Estabilización de suelos. Distribuidor de pulverulentos. En seco. Remolcado de 17 m³	34,95	0,10	
Q090002A01	0,0070	h	Estabilizadores de suelos autopropulsados. Para anchura de 2,50 m. De 370 kW de potencia (25 t)	197,70	1,38	
05.02.03 202.0020	0,0400	t	CEMENTO PORTLAND CEM II/B-S/32,5	71,18	2,85	
MT01010001	0,1000	m³	AGUA	0,58	0,06	

Nº Precio	Cantidad	Ud	Descripción	Precio	Subtotal	Importe
-----------	----------	----	-------------	--------	----------	---------

Mano de obra	0,22
Maquinaria	3,22
Material	2,91

Total partida	6,34 €
----------------------	---------------

SEIS EUROS CON TREINTA Y CUATRO CÉNTIMOS

Terraplén de carretera con material cohesivo de la traza estabilizado con árido reciclado procedente de hormigón (0-6 mm)

Nº Precio	Cantidad	Ud	Descripción	Precio	Subtotal	Importe
-----------	----------	----	-------------	--------	----------	---------

*1	m ³		TERRAPLÉN CON SUELO ESTABILIZADO "IN SITU" CON ÁRIDO RECICLADO DE HORMIGÓN (0-6 mm) (A PIE DE OBRA) CON TIERRAS DE LA PROPIA EXCAVACIÓN, EXTENDIDO Y COMPACTADO, HUMECTACIÓN O SECADO, TERMINACIÓN Y REFINO DE TALUDES TOTALMENTE TERMINADO.			
MO00000002	0,0007	h	Capataz	20,54	0,01	
MO00000006	0,0032	h	Peón especialista	16,77	0,05	
Q040401B01	0,0032	h	Tractores sobre cadenas. De 138 kW de potencia (19,8 t)	94,61	0,30	
U13AF090	0,0032	h	Tractor agrícola con rotovator. Para anchura de 2,55 m y profundidad de 25-30 cm *2	44,76	0,14	
Q040601B01	0,0032	h	Motoniveladoras. De 104 kW de potencia	80,28	0,26	
Q050202C01	0,0063	h	Compactador vibrante autopropulsado, de un cilindro, liso. De 16 t de masa *3	50,62	0,32	
Q090201B01	0,0011	h	Camión cisterna para riego. Para una cantidad de 8000 litros	80,74	0,09	
Q060204A01	0,0060	h	Camión. Con caja basculante 6x6. De 258 kW de potencia	87,45	0,52	
P01AR090	0,2972*4	m ³	ÁRIDO RECICLADO DE HORMIGÓN (0-6 mm)	1,80 *5	0,53	
MT01010001	0,2500	m ³	AGUA	0,58	0,15	

Mano de obra	0,07
Maquinaria	1,64
Material	0,68

Total partida	2,38 €
----------------------	---------------

DOS EUROS CON TREINTA Y OCHO CÉNTIMOS

*1 Al tratarse de un método de estabilización no reglamentado por el PG-3, la OC 37/2016 no contempla una unidad de obra de características similares. La unidad se ha compuesto según procedimientos constructivos de una estabilización granulométrica (Dal-Ré Tenreiro, 2001) tomando como referencia rendimientos y precios de la OC 37/2016.

*2 Elección de características según manual "Maquinaria para Estabilización de suelos in situ" (Morilla Abad, 1991).

*³ Elección de máquina y rendimiento en base a los resultados de la investigación, la Guía Técnica "Réalisation des remblais et des couches de forme" del LCPC y SETRA y el Pliego de Prescripciones Técnicas británico del Department of Transport.

*⁴ Volumen estimado para la dosificación considerada como óptima (mezcla 3:1), incluyendo las pérdidas en su manejo.

*⁵ Precio estimado según datos de la Asociación Española de Reciclaje de Residuos de Construcción y Demolición (RCDA)

Terraplén de carretera con materiales procedentes de préstamo o cantera, desechando el cohesivo de la traza en formación de vertedero

Nº Precio	Cantidad	Ud	Descripción	Precio	Subtotal	Importe
01.04.12 330.0060		m ³	RELLENO CERCANO A LA EXCAVACIÓN, EN FORMACIÓN DE VERTEDERO i/ EXTENDIDO DEL MATERIAL Y DEMÁS ACTUACIONES COMPLEMENTARIAS PARA REALIZAR LA UNIDAD.			
MO00000002	0,0006	h	Capataz	20,54	0,01	
MO00000006	0,0011	h	Peón especialista	16,77	0,02	
Q040401B01	0,0011	h	Tractores sobre cadenas. De 138 kW de potencia (19,8 t)	94,61	0,10	
Q040601B01	0,0011	h	Motoniveladoras. De 104 kW de potencia	80,28	0,09	
Q050202C01	0,0011	h	Compactador vibrante autopropulsado, de un cilindro, liso. De 16 t de masa	50,62	0,06	
Q090201B01	0,0006	h	Camión cisterna para riego. Para una cantidad de 8000 litros	80,74	0,05	
Mano de obra					0,03	
Maquinaria					0,30	
Total partida					0,33 €	

TREINTA Y TRES CÉNTIMOS

01.04.02 330.0030		m ³	TERRAPLÉN CON MATERIALES PROCEDENTES DE PRÉSTAMO O CANTERA, i/ EXTENDIDO, HUMECTACIÓN, NIVELACIÓN, COMPACTACIÓN, TERMINACIÓN Y REFINO DE TALUDES TOTALMENTE TERMINADO i/ MATERIAL, CANON DE PRÉSTAMO Y TRANSPORTE HASTA UNA DISTANCIA DE 10 km.			
MO00000002	0,0007	h	Capataz	20,54	0,01	
MO00000006	0,0032	h	Peón especialista	16,77	0,05	
Q040401B01	0,0032	h	Tractores sobre cadenas. De 138 kW de potencia (19,8 t)	94,61	0,30	
Q040601B01	0,0032	h	Motoniveladoras. De 104 kW de potencia	80,28	0,26	
Q050202C01	0,0063	h	Compactador vibrante autopropulsado, de un cilindro, liso. De 16 t de masa	50,62	0,32	

Nº Precio	Cantidad	Ud	Descripción	Precio	Subtotal	Importe
Q090201B01	0,0011	h	Camión cisterna para riego. Para una cantidad de 8000 litros	80,74	0,09	
Q060204A01	0,0060	h	Camión. Con caja basculante 6x6. De 258 kW de potencia	87,45	0,52	
MT01010001	0,2500	m ³	AGUA	0,58	0,15	
MT01030200	1,0000	m ³	CANON TIERRAS DE PRÉSTAMOS	2,46	2,46	

Mano de obra	0,07
Maquinaria	1,49
Material	2,61

Total partida	4,17 €
----------------------	---------------

CUATRO EUROS CON DIECISIETE CÉNTIMOS

Terraplén de carretera con materiales procedentes de préstamo o cantera, desechando el cohesivo de la traza en planta de valorización

Nº Precio	Cantidad	Ud	Descripción	Precio	Subtotal	Importe
10.04 9500040		t	CARGA Y TRANSPORTE DE RCDs CONSTITUIDOS POR TIERRAS A PLANTA DE VALORIZACIÓN POR TRANSPORTISTA AUTORIZADO, A UNA DISTANCIA DE 20 km, INCLUSO CANON DE ENTRADA A PLANTA, SIN MEDIDAS DE PROTECCIÓN.			
Q040201A10	0,0100	h	Retrocargadoras sobre ruedas. De 75 kW de potencia	44,39	0,44	
Q060202A01	0,0500	h	Camión. Con caja basculante 4x4. De 199 kW de potencia	72,23	3,61	
MT13GR0003	1,0000	t	CANON A PLANTA (TIERRAS)	2,50	2,50	

Maquinaria	4,05
Material	2,50

Total partida	6,55 €
----------------------	---------------

SEIS EUROS CON CINCUENTA Y CINCO CÉNTIMOS

01.04.02 330.0030		m ³	TERRAPLÉN CON MATERIALES PROCEDENTES DE PRÉSTAMO O CANTERA, i/ EXTENDIDO, HUMECTACIÓN, NIVELACIÓN, COMPACTACIÓN, TERMINACIÓN Y REFINO DE TALUDES TOTALMENTE TERMINADO i/ MATERIAL, CANON DE PRÉSTAMO Y TRANSPORTE HASTA UNA DISTANCIA DE 10 km.			
MO00000002	0,0007	h	Capataz	20,54	0,01	
MO00000006	0,0032	h	Peón especialista	16,77	0,05	
Q040401B01	0,0032	h	Tractores sobre cadenas. De 138 kW de potencia (19,8 t)	94,61	0,30	

Nº	Precio	Cantidad	Ud	Descripción	Precio	Subtotal	Importe
Q040601B01		0,0032	h	Motoniveladoras. De 104 kW de potencia	80,28	0,26	
Q050202C01		0,0063	h	Compactador vibrante autopropulsado, de un cilindro, liso. De 16 t de masa	50,62	0,32	
Q090201B01		0,0011	h	Camión cisterna para riego. Para una cantidad de 8000 litros	80,74	0,09	
Q060204A01		0,0060	h	Camión. Con caja basculante 6x6. De 258 kW de potencia	87,45	0,52	
MT01010001		0,2500	m ³	AGUA	0,58	0,15	
MT01030200		1,0000	m ³	CANON TIERRAS DE PRÉSTAMOS	2,46	2,46	

Mano de obra	0,07
Maquinaria	1,49
Material	2,61

Total partida	4,17 €
----------------------	---------------

CUATRO EUROS CON DIECISIETE CÉNTIMOS

8.3.2. *Discusión*

Aunque la singularidad de cada obra hará decantarse por una u otra opción, y se trata de una primera aproximación comparativa con la estabilización propuesta en esta investigación, se observa que ésta, económicamente resulta competitiva con todas las soluciones propuestas para la puesta en obra del suelo cohesivo.

La ventaja más evidente se presenta con respecto de las estabilizaciones in situ contempladas en el PG-3, éstas llegan a ser en torno a un 160% más caras. La maquinaria especializada y el valor de los materiales estabilizantes las sitúan como la opción de estabilizado menos ventajosa. Más aún si cabe, teniendo en cuenta que la validez de las estabilizaciones in situ dependen en gran medida de las condiciones ambientales, precisando además del control técnico más exhaustivo de todas las opciones de puesta en obra contempladas.

En relación a la práctica de sustituir el material excavado de la traza, sólo resulta competitiva aquella en la que el suelo a reemplazar se extiende en forma de vertedero próximo a su extracción. No obstante, supera en un 88% el precio unitario de la estabilización con RCD. Cabe decir que la práctica actual destaca por optimizar al máximo la compensación de tierras, además de que la tendencia legislativa va en favor de aumentar las tasas de vertido para desincentivar el depósito de residuos.

A pesar de ello, las dos opciones valoradas anteriormente, en la actualidad, constituyen las soluciones eficientes en situaciones de humedad próxima o superior al límite plástico, puesto que como se ha visto en la tabla 8.5. "Días perdidos después de

lluvias”, la dificultad que presenta el reducir el porcentaje de agua en un suelo cohesivo puede llevar a periodos de inactividad de 5 días, con el consiguiente aumento de costes indirectos. Aunque, también es cierto, que en el caso concreto que ocupa a esta investigación, aún en altas humedades, ha quedado probado que las mezclas 2:1 y 3:1 se alejan del carácter cohesivo del suelo tratado, permitiendo a través de una mejora en su trabajabilidad, alcanzar niveles de densidad y resistencia elevados. Por lo que este hecho ya supondría un punto a valorar en relación a la compactación con medios específicos para suelos cohesivos; pues este último método resulta el más económico; siendo un 5% más barato que la estabilización con árido reciclado.

Asimismo, la opción de compactar por repetición de ciclos de carga-descarga, obliga, si existe amenaza de lluvia, a cerrar la superficie con unas pasadas de rodillo liso al final de jornada, dejándola con pendientes suficientes no inferiores a 4 %, lo que supone precisar de procedimientos, y por ende costes directos, adicionales.



9. CONCLUSIONES

El carácter cohesivo de un suelo debe quedar debidamente definido para estimar su potencial reutilización en obra civil. En el caso del suelo tratado en esta investigación, correspondiente a lutitas terciarias (geotécnicamente son suelos de tipo CL sin problemas específicos de contenidos elevados en materia orgánica o sales solubles, ni riesgo de expansividad ni colapsabilidad), el principal problema radica en la puesta en obra de estos materiales.

La mayor problemática de los suelos cohesivos son sus elevados tiempos de consolidación o de expulsión de agua bajo esfuerzos. En condiciones atmosféricas desfavorables, el problema de exceso de humedad puede no tener más solución que su sustitución por otro en mejores condiciones, o la aplicación de métodos especiales.

Lo que lleva en la mayoría de los casos a plantear distintas alternativas de puesta en obra. Bien compactar por repetición de ciclos de carga-descarga con o sin vibración, llevar a cabo una estabilización o, en última instancia, sustituir el suelo por otro de mejores prestaciones, dado que la práctica actual es optimizar al máximo la compensación de tierras. Por tanto, se precisa también de un control técnico más exhaustivo de lo habitual.

Aunque la normativa técnica española no desarrolla una reglamentación al respecto para obras civiles fuera de las estabilizaciones con cemento o cal, si permite en muchos casos utilizar materiales, en forma natural o previo tratamiento, siempre que cumplan las condiciones de capacidad de soporte exigidas, y previo estudio justificativo aprobado por el Director de las Obras, así como los que en su caso se exijan en el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares.

En todo caso, se deben utilizar materiales que permitan cumplir las condiciones básicas siguientes:

- Puesta en obra en condiciones aceptables.
- Estabilidad satisfactoria de la obra.
- Deformaciones tolerables a corto y largo plazo, para las condiciones de servicio que se definan en Proyecto.

En el caso que ocupa a esta investigación, la adición a las lutitas, a modo de estabilización, de residuos de construcción y demolición (RCD) de hormigón en su fracción fina, en diferentes proporciones de mezcla, ha permitido comprobar una mejora

en la compactabilidad de las mezclas. Aún en humedades altas, ha quedado probado que las mezclas 2:1 y 3:1 se alejan del carácter cohesivo del suelo tratado, permitiendo a través de una mejora en su trabajabilidad, alcanzar niveles de densidad y resistencia elevados. Permitiendo formar estructuras de tierra por sí solas con las exigencias más elevadas contempladas en las normativas técnicas.

La situación óptima se ha observado para una dosificación 3:1, es decir, tres partes de lutita y una parte de RCD, en la cual se ha obtenido el valor más elevado de densidad seca máxima tanto en el ensayo Proctor Normal como Modificado. El resultado obtenido en el ensayo de compactación Proctor Modificado ($2,14 \text{ T/m}^3$ con una humedad óptima del 10%) le confiere, en estos términos, según Tiktin. (1997) un comportamiento similar a la zahorra. Hay que tener en cuenta que para tratar un volumen grande de suelo la mezcla 3:1 presenta una ventaja a la hora de su aplicación en un caso real, ya que el volumen de suelo tratado con una misma cantidad de RCD sería muy superior en comparación con las otras mezclas estudiadas. Lo cual va en pro de su viabilidad económica.

El origen de la mejora del suelo está causado por una mejora granulométrica del material y no por el posible aporte de cemento no fraguado de la mezcla procedente del RCD, ya que la cantidad de éste, por su origen en hormigón con calidad de prefabricado y su notable exposición a la intemperie, se considera ínfima y su efecto poco relevante. Si bien, la gran capacidad de absorción del árido, debida al mortero adherido, podría reducir la cantidad de agua disponible en la mezcla, reduciendo la humedad de la fracción limosa-arcillosa y reduciendo así su plasticidad, lo que a su vez mejoraría la estabilidad de la mezcla en condiciones de humedad.

Los resultados numéricos se ven acompañados por las observaciones realizadas durante los ensayos en laboratorio, en los cuales se evidencia que la adición de RCD a la lutita permite una compactación más fácil y adecuada, mostrando las mezclas 2:1 y 3:1 una reducción evidente en el comportamiento cohesivo para un rango de humedades considerable. Lo que a priori permite una colocación en obra con maquinaria convencional y sin controles técnicos específicos, lo que confiere una ventaja respecto de otros métodos de mejora.

Además, el tratamiento propuesto lleva asociadas una serie de ventajas técnico-económicas, entre las que destacan:

- En una primera aproximación comparativa con la estabilización propuesta en esta investigación, se observa que ésta, económicamente resulta competitiva con todas las soluciones propuestas para la puesta en obra de un suelo cohesivo. La ventaja más evidente se presenta con respecto de las

estabilizaciones in situ contempladas en el PG-3, éstas llegan a ser en torno a un 160% más caras. La maquinaria especializada y el valor de los materiales estabilizantes las sitúan como la opción de estabilizado menos ventajosa. Más aún si cabe, teniendo en cuenta que la validez de las estabilizaciones in situ dependen en gran medida de las condiciones ambientales, precisando además del control técnico más exhaustivo de todas las opciones de puesta en obra contempladas.

- En relación a la práctica de sustituir el material excavado de la traza, sólo resulta competitiva aquélla en la que el suelo a reemplazar se extiende en forma de vertedero próximo a su extracción. No obstante, supera en un 88% el precio unitario de la estabilización con RCD. Además, se evidencia que la legislación va en favor de aumentar las tasas de vertido para desincentivar el depósito de residuos.
- A pesar de ello, las dos opciones valoradas anteriormente, en la actualidad, constituyen las soluciones eficientes en situaciones de humedad próxima o superior al límite plástico, puesto que la dificultad que presenta el reducir el porcentaje de agua en un suelo cohesivo puede llevar a periodos de inactividad de 5 días, con el consiguiente aumento de costes indirectos. Aunque, también es cierto, que en el caso concreto que ocupa a esta investigación, aún en altas humedades, ha quedado probado que las mezclas 2:1 y 3:1 se alejan del carácter cohesivo. Por lo que este hecho ya supondría un punto a valorar en relación a la compactación con medios específicos para suelos cohesivos; pues este último método resulta el más económico; siendo un 5% más barato que la estabilización con árido reciclado.
- La opción de compactar por repetición de ciclos de carga-descarga, obliga, si existe amenaza de lluvia, a cerrar la superficie con unas pasadas de rodillo liso al final de jornada, dejándola con pendientes suficientes no inferiores a 4%, lo que supone precisar de procedimientos, y por ende costes directos, adicionales.

Así pues, la opción de estabilizar un suelo cohesivo con árido reciclado podría constituir una opción válida en condiciones húmedas. Además de hacerse superior en situaciones con fenómenos, naturales o bélicos, con efectos catastróficos, en los que la construcción de una infraestructura civil de tierras tenga carácter de emergencia. Puesto que la disponibilidad de la maquinaria requerida, al ser convencional y la probable

disponibilidad del material estabilizador (RCD) en estos casos, no supondrían un contratiempo.

Esta potencialidad se hace más patente teniendo en cuenta, que a costa de disminuir los rendimientos de ejecución, la maquinaria propuesta para la homogeneización (rotovator), podría ser sustituida por utensilios más comunes si cabe en labores agrícolas, como pueden ser gradas de discos o arados de vertederas. Reduciendo aún más el rendimiento, también cabe la posibilidad de utilizar las hojas de las motoniveladoras como vertederas.

En cualquier caso, la fase de homogeneización también debería ayudar a fraccionar los bolos de material arcilloso que durante el extendido el peso propio de los bulldozer no consigue romper, lo cual indirectamente reduce la posibilidad de colapso. En materiales cohesivos, este fenómeno es usual, debido a la formación de macrohuecos entre los glomérulos de lutita dura que no ha llegado a disgregarse. Por este riesgo, este tipo de materiales no suele ser aconsejable en cimiento de rellenos, salvo que se asegure su insensibilidad al agua.

La pérdida de resistencia de los suelos cohesivos también se produce porque el proceso constructivo moderno de terraplenes es muy rápido, no permitiendo los asientos naturales con el tiempo (la mayor problemática de los suelos cohesivos son sus elevados tiempos de consolidación o de expulsión de agua bajo esfuerzos). Durante la construcción se consiguen densidades altas con humedades reducidas, pero después de las lluvias otoñales, al aumentar la humedad, la capacidad portante (índice C.B.R.) se reduce notablemente. La causa es la inestabilidad del suelo, por el incremento de la presión de agua en sus poros. No obstante, los valores obtenidos por medio del ensayo normalizado (las muestras se saturarán para el ensayo) permiten situar la mezcla en cualquier zona de un terraplén de carreteras, que, por otra parte, en obra civil es el que más volumen de tierras consume.

De igual manera, el tratamiento propuesto lleva asociada una serie de ventajas ambientales evidentes, entre las que destacan tanto la reducción de residuos en obra (volúmenes de suelo excavados, pero no reutilizados) como la potencialidad de la fracción fina de los RCD como subproducto. Lo cual se ve refrendado en los siguientes datos:

- Según los últimos datos públicos del INE sobre generación de RCDs, se estima una producción ascendente que en 2015 alcanzaba los 36 millones de toneladas. La RCDA por su parte, refleja una producción media de 19 millones de toneladas (sin tierras de excavación) en el periodo 2011-2015, manteniéndose ésta con cierta estabilidad.

- El último Informe de Producción y Gestión de RCDs en España publicado por la RCDA, advierte de que todavía se deberían valorizar el 31% de los RCD que producidos antes del año 2020 para cumplir la Directiva Marco 2008 de Residuos para este flujo deshechos. Por otro lado, ese mismo Informe refleja que sólo el 70% de todos los RCD producidos acceden a instalaciones de gestores autorizados.
- Según refleja la Guía Española de Áridos Reciclados Procedentes de Residuos de Construcción y Demolición el 28% los áridos reciclados comercializados corresponden a material procedente de residuos de hormigón. De los cuales sólo es comercializado como árido fino el 0,77%, generalmente, dadas sus aptitudes geotécnicas, como relleno de servicios.
- Teniendo en cuenta que, tras el proceso de trituración, el porcentaje de árido grueso que se obtiene varía del 70% al 90% de la masa total del hormigón original, más de medio millón de toneladas de árido fino no constituyen un subproducto tras la valorización de los residuos de hormigón.
- La fabricación de morteros es la única aplicación constructiva contemplada normativamente en España, en la que se permite el empleo de una fracción fina reciclada. Se considera, sin embargo, que las arenas recicladas son únicamente adecuadas para la fabricación de morteros de baja resistencia.
- La tasa de vertido de RCDs llega en algunas capitales de provincia a los 30€/t, precio que siempre va a estar por encima de las tasas de admisión en plantas de valorización.
- El precio de los áridos, para el caso de las gravas naturales pueden variar entre 6 y 12 euros/t y entre 5 y 13 euros/t para las arenas, mientras que los precios de los áridos reciclados suelen plantear una rebaja entorno al 50% de esos precios.
- El PEMAR 2016-2022 establece objetivos cualitativos y cuantitativos para incrementar para incrementar la consecución de los objetivos del Plan. Entre ellos que las administraciones públicas fomenten que en los proyectos de obra se tengan en cuenta alternativas de diseño y constructivas que generen menos residuos en la fase de construcción o la introducción de criterios en la contratación pública que incluyan porcentajes mínimos de uso de material reciclado en obra pública y privada. Así como el aumento de las tasas de vertido para desincentivar el depósito de residuos de RCD valorizables.

10. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

En este apartado se recogen futuras líneas de investigación surgidas a partir de los resultados obtenidos en el presente trabajo fin de grado. El avance en estas líneas resultaría interesante para ampliar el conocimiento y uso de la fracción fina de RCDs procedentes de hormigón como estabilizante de suelos cohesivos. Las líneas de investigación futuras planteadas son las siguientes:

1. Determinar el poder absorbente del árido reciclado utilizado en condiciones reales de puesta en obra

Según esta investigación se concluye que la gran capacidad de absorción del árido, debida al mortero adherido, podría reducir la cantidad de agua disponible en la mezcla, reduciendo la humedad de la fracción limosa-arcillosa y reduciendo así su plasticidad, lo que a su vez mejoraría la estabilidad de la mezcla en condiciones de humedad.

A modo comparativo la bajada de humedad en una estabilización con cal variará en función de la cal añadida y las condiciones ambientales, pero puede oscilar un 2% y un 5% (Morilla Abad, 1991). Se estima que la adición del 1% de cal viva puede rebajar la humedad del suelo en el 1,5% aproximadamente. Según los resultados de los ensayos existe una diferencia del 18% entre las densidades de la lutita y el RCD, lo cual, en condiciones de proporcionalidad en la distribución de los materiales y una estructura de las partículas favorable al desplazamiento de agua, podría suponer una reducción teórica de humedad del 4,66%.

2. Estudiar la discordancia apreciable entre el índice C.B.R. obtenido por el ensayo normalizado UNE 103502:1995 y el método Trocchi.

En lo referente al índice C.B.R. no se observa correlación entre los resultados obtenidos por medio del método Trocchi y el ensayo normalizado. Lo que hace replantear seriamente las conclusiones que de los resultados del ensayo normalizado se puedan extraer, más si cabe cuando el método de Trocchi se considera válido para suelos con valores menores a veinte, dado que en valores superiores el índice que se obtiene es demasiado conservador.

Además, se observa que los valores obtenidos por el método Trocchi en esta investigación, están relacionados con los resultados de rotura a compresión simple en las escalas comparativas de criterio usuales de clasificación de plataformas IF-3.

3. Realizar tramos de prueba y determinar la producción con distintas dosificaciones y calidades de RCD (preferentemente con la considerada óptima)

La aplicación del tratamiento investigado a un caso real, necesitaría una caracterización del suelo, de los materiales y de las mezclas a realizar, para así determinar la dosificación correcta de RCD para cada tipo de suelo. La realización de un tramo de prueba ayudaría además a verificar, o en su defecto determinar, los posibles procedimientos constructivos, así como en un futuro poder desarrollar una normativa técnica para la implantación del tratamiento.

Por un lado, cabe recordar que la normativa técnica española no desarrolla una reglamentación al respecto para obras civiles fuera de las estabilizaciones con cemento o cal. Por otro lado, que todavía se deberían valorizar el 31% de los RCD que producidos y controlados (4 millones de toneladas), antes del año 2020 para cumplir la Directiva Marco 2008 de Residuos.

4. Uso de las mezclas lutita-árido reciclado como material para núcleo impermeable de presas de materiales sueltos

Para ello habría que verificar que la permeabilidad del material colocado precise de una permeabilidad baja o muy baja, del orden de 10^{-5} cm/s o inferior. Dado que, como se muestra a continuación, el resto de características generalmente exigibles a los materiales del núcleo impermeable las cumple.

Los materiales utilizados en los núcleos, además de impedir el paso de agua a través del cuerpo de presa, no deben ser colapsables, ni contener materia orgánica o ser solubles. Deben ser fácilmente compactables (característica acentuada en las mezclas estudiadas) al objeto de obtener buenos rendimientos de ejecución. Las arcillas y limos son los más característicos, aunque también arenas con contenido arcilloso pueden ser utilizadas (las mezclas analizadas con mejores rendimientos corresponden a suelos CL-ML/SC-SM y SC).

Además, en España, la posibilidad de utilización de las mezclas se ve amparada por la Orden de 12 de marzo de 1996 por la que el Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente aprobó el último Reglamento Técnico sobre Seguridad de Presas y Embalses. Pues en su Artículo 20. Materiales. establece que será el proyecto constructivo quién deberá definir los materiales, fijar las características que deben cumplir y concretar los procedimientos para su comprobación y control.

5. Uso de las fracciones finas recicladas, de un solo ciclo, sin calidad de prefabricado y almacenadas bajo condiciones ideales de temperatura y humedad

De este modo, se plantea la posibilidad de ser utilizadas como tratamiento de explanadas y sub-bases de carreteras buscando similitudes con el suelo-cemento, gracias al posible poder cementante residual del árido reciclado. No hay que olvidar que, tras la exposición ambiental a la que han sido sometidos los sacos de rafia donde se depositaban los áridos reciclados utilizados en esta investigación, ciertas porciones del árido se encontraban agregadas como elementos individuales de tamaños centimétricos a decimétricos. Lo cual puede interpretarse como un indicio de fraguado del cemento que pudiera quedar sin hidratar originalmente.

Por lo que resultaría de gran interés conocer la proporción de cemento potencialmente fraguable. Dado que no existe un ensayo normalizado, y no resulta fácil determinar su cuantía, se propone someter la fracción menor a 10 μm (tamaño máximo de las partículas de cemento Portland comercial) a procesos de fraguado monitorizados en los que extrapolar el calor despendido a los gramos de cemento sin fraguar.



11. LISTADO DE FIGURAS, FOTOGRAFÍAS Y TABLAS

11.1. LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1. Cartografía geológica de España: Expansividad de arcilla (IGME, 2015)	5
Figura 4.1. Composición de los RCDs (Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio de la Comunidad de Madrid, 2006)	11
Figura 4.2. Composición de los RCDs (FEDERACIÓN RCDs, 2018)	11
Figura 4.3. Curvas granulométricas máximas, mínimas y medias de muestras analizadas la Asociación Española de Gestores de Residuos de Construcción y Demolición (GERD, 2011)	13
Figura 4.4. Cantidad de muestras analizadas la GERD en función del contenido de material fino que pasa en el tamiz 0,063 mm (GERD, 2011)	14
Figura 4.5. Ciclo cerrado de los RCDs (Ihobe, 2009)	22
Figura 4.6. Procesamiento de áridos (Tiktin, 1998)	25
Figura 4.7. Machacadora de mandíbulas (FMB Co.Ltd., s. f.)	25
Figura 4.8. Trituradora de impactos (FMB Co.Ltd., s. f.)	25
Figura 4.9. Trituradora de cono (FMB Co.Ltd., s. f.)	26
Figura 4.10. Áridos reciclados comercializados en 2008 según su composición y fracción (GERD, 2011)	28
Figura 4.11. Rangos granulométricos de los áridos reciclados comercializados (GERD, 2011)	28
Figura 4.12. Aplicaciones identificadas para el Todo Uno de Hormigón (GERD, 2011)	29
Figura 4.13. Aplicaciones identificadas para el Árido Grueso de Hormigón (GERD, 2011)	29
Figura 4.14. Aplicaciones identificadas para el Árido Medio de Hormigón (GERD, 2011)	30
Figura 4.15. Aplicaciones identificadas para el Árido Fino de Hormigón (GERD, 2011)	30
Figura 4.16. Gestión RCDs en España en el periodo 2010-2015 (RCDA, 2017)	33
Figura 4.17. Granulometría de partículas (González de Vallejo et al., 2004)	41
Figura 4.18. La envolvente de rotura y el círculo de Mohr (González de Vallejo et al., 2004)	44
Figura 4.19. Carta de Casagrande para clasificar los finos en función de su plasticidad en el USCS. (González de Vallejo et al., 2004)	45

Figura 4.20. Fases del material al compactar. (1) Durante la compactación. (2) Después de la compactación. (Tiktin, 1997)	47
Figura 4.21. Permeabilidad de suelos, porosidad y formas (Tiktin, 1997)	48
Figura 4.22. Familia de curvas γ_s en función de n_a y W (Tiktin, 1997)	48
Figura 4.23. Curva de γ_s función de w sobre la familia de γ_s , función de n_a y W (Tiktin, 1997)	48
Figura 4.24. Variación de la humedad, densidad seca y permeabilidad, según el límite líquido (Tiktin, 1997)	49
Figura 4.25. Pruebas visuales de suelos (Tiktin, 1997)	53
Figura 4.26. Aumento de espesores con la energía (Tiktin, 1997)	60
Figura 4.27. Estimación de los ciclos de carga y descarga en puntos bajo un neumático en traslación uniforme (Rojo López, 1988)	62
Figura 4.28. Esquema de distribución de presiones y ciclos de carga y descarga a diversas profundidades, al pasar el rodillo pata de cabra (Rojo López, 1988)	62
Figura 4.29. Diagramas carga-deformación a diversas profundidades bajo un compactador de neumáticos (Rojo López, 1988)	63
Figura 4.30. Diagramas carga-deformación a diversas profundidades bajo un rodillo de pata de cabra (Rojo López, 1988)	63
Figura 4.31. Compactador pata de cabra (pisones o pies "tamping" (CAT, 2019)	64
Figura 4.32. Compactador vibratorio de tambor único, pata de cabra (CAT, 2019)	66
Figura 4.33. Compactador pata de cabra remolcado (Rojo López, 1988)	66
Figura 4.34. Compactador vibratorio de tambor único liso (CAT, 2019)	67
Figura 4.35. Grafica granulométrica resultante de la mezcla arcilla-RCD considerada óptima en anteriores investigaciones (Fuertes Blanco, 2016)	70
Figura 4.36. Exigencias AASHTO para la granulometría de una estabilización arena-arcilla (Dal-Ré Tenreiro, 2001)	73
Figura 5.1. A) Situación geológica de la toma de muestras (Hernández Samaniego et al., 2005). B) Situación geográfica de la toma de muestras (IGN, 2011)	82
Figura 6.1. Escalas comparativas de criterio usuales de clasificación de plataformas IF-3	100
Figura 7.1. Curva granulométrica correspondiente a las muestras tamizadas	108
Figura 7.2. Curva $p-w$ Proctor Normal obtenida en la lutita	115
Figura 7.3. Curva $p-w$ Proctor Normal obtenida en el árido reciclado	115

Figura 7.4. Curva p - w Proctor Normal obtenida en la mezcla 1:1	115
Figura 7.5. Curva p - w Proctor Normal obtenida en la mezcla 2:1	115
Figura 7.6. Curva p - w Proctor Normal obtenida en la mezcla 3:1	116
Figura 7.7. Curva p - w Proctor Modificado obtenida en la mezcla 3:1	116
Figura 7.8. Gráfico comparativo de las curvas p - w obtenidas en las distintas muestras ensayadas	123

11.2. LISTA DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 5.1. Calicata realizada en la proyección de la A-23. Tramo Paniza-Torrubia	83
Fotografía 5.2. Muestra de lutita extraída	83
Fotografía 5.3. Elementos prefabricados desechados en PRAINSA	84
Fotografía 5.4. Estado del acopio de los áridos de dos ciclos de reciclado en febrero de 2019	86
Fotografía 5.5. Árido tras dos ciclos de reciclado utilizado (0-6 mm)	87
Fotografía 5.6. Muestras de las dosificaciones definidas para la investigación	88
Fotografía 5.7. Lutita extendida tras su extracción	90
Fotografía 5.8. Lutita extendida tras su machaqueo	90
Fotografía 5.9. Machacadora de mandíbulas utilizada en la investigación	90
Fotografía 5.10. Báscula de pesado Gibertini TMB 45N	91
Fotografía 5.11. Amasadora usada en la investigación	92
Fotografía 5.12. Báscula de precisión usada en la investigación	93
Fotografía 5.13. Estufa de desecación usada en la investigación	93
Fotografía 6.1. Probetas elaboradas para la realización del ensayo	100
Fotografía 7.1. Lutita tras su extracción del terreno	104
Fotografía 7.2. Lutita tras su machaqueo en el laboratorio	104
Fotografía 7.3. Árido reciclado (0-6 mm) sedimentado	105
Fotografía 7.4. Árido reciclado (0-6 mm)	105
Fotografía 7.5. Material lutítico amasado con w_{op}	117
Fotografía 7.6. Última tongada P.N. lutita compactada con w_{op}	118
Fotografía 7.7. Última tongada P.N. lutita compactada con $w=18\%$	118
Fotografía 7.8. Última tongada P.N. 1:1 compactada con w_{op}	119
Fotografía 7.9. Última tongada P.N. 1:1 compactada con $w=20\%$	120
Fotografía 7.10. Última tongada P.N. 2:1 compactada con w_{op}	121
Fotografía 7.11. Última tongada P.N. 2:1 compactada con $w=18\%$	121
Fotografía 7.12. Última tongada P.N. 3:1 compactada con w_{op}	121
Fotografía 7.13. Última tongada P.N. 3:1 compactada con $w=18\%$	121

Fotografía 7.14. Última tongada P.M. 3:1 compactada con w_{op} _____	122
Fotografía 7.15. Maza P.M. 3:1 tras compactar una tongada con w_{op} _____	122
Fotografía 7.16. Maza P.N. 1:1 tras compactar una tongada con w_{op} _____	124
Fotografía 7.17. Maza P.N. 3:1 tras compactar una tongada con w_{op} _____	124

11.3. LISTA DE TABLAS

Tabla 4.1. Generación y gestión RCDs en 2012. Fuente: INE (PEMAR 2016-2022)	9
Tabla 4.2. Producción Nacional de RCDs 2011-2015 "oficial" CCAA (RCDA, 2017)	10
Tabla 4.3. Producción Nacional de RCDs (RCD Controlados + RCD Incontrolados) (RCDA, 2017)	10
Tabla 4.4. Densidad de los Áridos Reciclados y Naturales (Salesa Bordanaba, 2014)	16
Tabla 4.5. Absorción en el Árido Reciclado (Salesa Bordanaba, 2014)	17
Tabla 4.6. Mortero adherido en el Árido Reciclado (Salesa Bordanaba, 2014)	19
Tabla 4.7. Composición química de los escombros cerámicos (CEDEX, 2014)	20
Tabla 4.8. Número de instalaciones operativas en 2013 (PEMAR 2016-2022)	23
Tabla 4.9. Costes de admisión de RCDs en una planta de reciclado (CEDEX, 2014)	31
Tabla 4.10. Precio de los áridos reciclados (CEDEX, 2014)	32
Tabla 4.11. Objetivos para RCDs para los años 2016, 2018 y 2020 (PEMAR 2016-2022)	32
Tabla 4.12. Órdenes de magnitud de ϕ' , c' en suelos medianamente densos (Bibliografía)	44
Tabla 4.13. Grados de expansividad y valores medios de parámetros geotécnicos (González de Vallejo et al., 2004)	46
Tabla 4.14. Rango de valores del coeficiente de permeabilidad en suelos (González de Vallejo et al., 2004)	50
Tabla 4.15. Valores de coeficientes de deformación de terrenos cohesivos (Rojo López, 1988)	52
Tabla 4.16. Valores característicos y sugerencias sobre valor relativo para diversas aplicaciones de suelos de grano fino (Rojo López, 1988)	52
Tabla 4.17. Guía de selección de suelos	54
Tabla 4.18. Análisis de la parte fina de un suelo	54
Tabla 4.19. Objetivos de la compactación	56
Tabla 4.20. Resultados de la ecuación Talbot para $D=1\frac{1}{2}$ " comparados con los husos de AASHTO para ese D (Dal-Ré Tenreiro, 2001)	72
Tabla 5.1. Dosificación de los distintos hormigones utilizados en la fabricación de las piezas prefabricadas PRAINSA desechadas	84
Tabla 5.2. Dosificación de los distintos hormigones utilizados en la fabricación de las vigas ensayadas.	85

Tabla 6.1. Ensayos realizados	96
Tabla 7.1. Granulometría de las muestras (%Retenido acumulado)	107
Tabla 7.2. Valores característicos en la granulometría del árido reciclado	109
Tabla 7.3. Granulometría para la fracción que pasa por el tamiz N.º 10 ASTM (%Pasa)	111
Tabla 7.4. Resultados de densidad real de los materiales	111
Tabla 7.5. Resultados del ensayo de absorción de agua en árido reciclado	112
Tabla 7.6. Resultados de los Límites de Atterberg	114
Tabla 7.7. Asignación de símbolos de grupo y nombre según USCS	114
Tabla 7.8. Resultados de los ensayos Proctor	116
Tabla 7.9. Resultados del ensayo de rotura a compresión simple	124
Tabla 7.10. Valores orientativos de N_{SPT} , resistencia a compresión simple y módulo de elasticidad (módulo de Young) de suelos según el CTE: DB-SE-C (Ministerio de Vivienda, 2006)	126
Tabla 7.11. Resultados del Índice C.B.R. en la mezcla 3:1 según UNE 103502:1995	126
Tabla 7.12. Resultados del Índice C.B.R. según el método de Trocchi	127
Tabla 8.1. Valoración técnica material-suelo: lutita	130
Tabla 8.2. Valoración técnica material/suelo: Mezcla 1:1	131
Tabla 8.3. Valoración técnica material-suelo: Mezcla 2:1	131
Tabla 8.4. Valoración técnica material-suelo: Mezcla 3:1	132
Tabla 8.5. Días perdidos después de lluvias	133

12. BIBLIOGRAFÍA

- ADIF. (2011). Pliego General de Prescripciones Técnicas tipo para los proyectos de plataforma (PGP-2011). Recuperado a partir de [http://descargas.adif.es/ade/u18/GCN/NormativaTecnica.nsf/v0/AFC4F51596B963EFC1257E9200410B4B/\\$FILE/PGP+2011+V2.pdf?OpenElement](http://descargas.adif.es/ade/u18/GCN/NormativaTecnica.nsf/v0/AFC4F51596B963EFC1257E9200410B4B/$FILE/PGP+2011+V2.pdf?OpenElement)
- CAT. (2019). Catálogo de equipos compactadores. Recuperado 29 de abril de 2019, a partir de https://www.cat.com/es_ES/products/new/equipment/compactors.html
- CEDEX. (2013). Recomendaciones de utilización de los finos de áridos reciclados procedentes de hormigón. Recuperado a partir de <http://www.cedexmateriales.es/catalogo-de-residuos/35/residuos-de-construccion-y-demolicion/224/referencias.html>
- CEDEX. (2014). Catálogo de residuos utilizables en construcción. Recuperado a partir de http://www.cedexmateriales.es/upload/docs/es_RESIDUOSDECONSTRUCCIONYMOLICIONNOV2014.pdf
- Dal-Ré Tenreiro, R. (2001). Caminos rurales: proyecto y construcción. (3ª ed.) Madrid, España: Ediciones Mundi-Prensa.
- Estrader Bofarull, A. (2015). Estudio de la fracción arena procedente de residuos de construcción y demolición (RCD) como mejora de suelos marginales en obra civil (Trabajo Final de Grado). EUP. de La Almunia de Doña Godina, La Almunia de Doña Godina, España.
- Etxeberria, M., Marí, A. R. y Vázquez, E. (2007). Recycled aggregate concrete as structural material. *Material and Structures*. 40(5), 529-541. Doi:10.1617/s11527-006-9161-5.
- FEDERACIÓN RCDs. (2018). Dossier FEDERACIÓN RCDs, Producción período 2014-2017. Recuperado a partir de <http://federacionrcd.org/wp-content/uploads/Dossier-FEDERACION%20RCDs-04-de-Junio-de-2018-Completo.pdf>
- FMB Co.Ltd. (s. f.). Trituradora de Rocas, Fabricantes de Trituradora de Piedra, Planta de Trituración y Molienda para Rocas y Minerales. Recuperado 3 de abril de 2019, a partir de <http://tritadoras-de-roca.com/>

- Fuertes Blanco, J. (2016). Caracterización y mejora de suelos marginales en obra civil (Trabajo Final de Grado). Univ. de Zaragoza, Zaragoza, España, 28 p.
- GERD. (2011). Guía española de áridos reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición (RCD). Proyecto GEAR. Recuperado a partir de <http://www.gerd.es/>
- González de Vallejo, L. I. (Coord.), Ferrer Gijón, M., Ortuño Abad, L., Oteo Mazo, C. (2004). Ingeniería Geológica. (1ª ed.) Madrid, España: Pearson Educación, S.A.
- Hernández Samaniego, A., Ramírez Merino, J. I., Navarro Julio, J. J., Cortés Gracia, A. L., Rodríguez Santisteban, R., Babiano González, F., Gómez Gras, D., Ramírez del Pozo, J., Cuenca Bescós, G., Pozo Rodríguez, M. y Casas Sainz de Aja, J. (2005). Mapa Geológico de España 1:50.000. Hoja nº 411 (Longares) y memoria. IGME, Madrid, España, 97 p.
- IGME. (2015): Cartografía geológica de España a escala 1:1.000.000, Madrid, España.
- IGN. (2011). Serie cartográfica nacional a escala 1:25.000. Hoja nº 411-1 (Muel), Madrid, España.
- Ihobe. (2009). Manual de Directrices para el uso de los Áridos Reciclados en Obras Públicas de la Comunidad Autónoma del País Vasco (Ihobe, S.A.). Recuperado a partir de http://www.euskadi.eus/contenidos/documentacion/aridos/es_doc/adjuntos/manual_aridos.pdf
- López Julián, P. L., Salesa Bordanaba, A., Pérez Benedicto, J. A. y Pueyo Anchuela, O. (2017). Mejora en la compactabilidad de un suelo limoso mediante la elaboración de mezclas con residuos de construcción y demolición. GEOGACETA, (61), 179-182.
- Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. (2015). Plan Estatal Marco de Residuos (PEMAR) 2016-2022. Recuperado a partir de https://www.aprr.eus/wp-content/uploads/2016/11/20151106PEMAR-2016_2022_apartado-13_pag96.pdf
- Ministerio de Fomento. (1999/00): Proyecto de Construcción Autovía de Levante a Francia por Aragón. N-330. Tramo: Paniza-Torrubia. Documento Anejo 7: Geotecnia del Corredor. Dirección General de Carreteras, Madrid, España.

- Ministerio de Fomento. (2000): Geotecnia vial en lo referente a materiales para obras de la construcción de explanaciones y drenajes. Orden circular 326/00 (PG-3). Serie normativas. Instrucciones de construcción, Madrid, España.
- Ministerio de Fomento. (2001). Pliego de prescripciones Técnicas Generales para Obras de Conservación de Carreteras. Orden circular 8/01 (PG-4). Recuperado a partir de <http://www.carreteros.org/normativa/pg4/pg4.htm>
- Ministerio de Fomento. (2006). Pliego de Prescripciones Técnicas Generales de Materiales Ferroviarios. Subbalasto (PF-7). Recuperado a partir de <https://www.boe.es/boe/dias/2006/05/01/pdfs/A16891-16909.pdf>
- Ministerio de Fomento. (2008). Instrucción Española del Hormigón Estructural 2008 (EHE-08). Recuperado a partir de http://www.fomento.es/MFOM/LANG_CASTELLANO/ORGANOS_COLEGIADOS/CPH/instrucciones/EHE_es/
- Ministerio de Fomento. (2009). Guía de cimentaciones en obras de carretera. Recuperado a partir de https://www.fomento.es/recursos_mfom/0710401.pdf
- Ministerio de Fomento. (2014). Pliego de prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3). Recuperado a partir de <http://www.carreteros.org/normativa/pg3/pg3.htm>
- Ministerio de Fomento. (2015). Instrucción para el proyecto y construcción de obras ferroviarias IF-3. Vía sobre balasto. Cálculo de espesores de capas de la sección transversal (IF-3). Recuperado a partir de <https://www.boe.es/boe/dias/2015/08/04/pdfs/BOE-A-2015-8766.pdf>
- Ministerio de Fomento. (2016). Orden Circular 37/2016. Base de Precios de Referencia de la Dirección General de Carreteras. Recuperado a partir de https://www.fomento.gob.es/recursos_mfom/orden_circular_372016.pdf
- Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino. (2009). Plan Nacional Integrado de Residuos (PNIR) para el periodo 2008-2015. Recuperado a partir de <https://www.boe.es/boe/dias/2009/02/26/pdfs/BOE-A-2009-3243.pdf>
- Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo. (1987). Sistematización de los medios de compactación y su control. Recuperado a partir de <http://www.carreteros.org/normativa/estructuras/otras/pdfs/compactacion.pdf>

- Ministerio de Obras Públicas y Transportes (1989). Terraplenes y pedraplenes. Recuperado a partir de http://www.carreteros.org/tenologia_mopu/1/pdfs/33.pdf
- Ministerio de Vivienda. (2006). Código Técnico de la Edificación. Recuperado a partir de <https://www.codigotecnico.org/index.php/menu-documentoscte.html>
- Morilla Abad, I. (1991). Maquinaria para Estabilización de suelos in situ. (3ª ed.) Madrid, España: España: Asociación Española de la Carretera.
- Pérez Benedicto, J. A. (2011). Estudio experimental sobre propiedades mecánicas del hormigón reciclado con áridos procedentes de la no calidad en prefabricación (pdh). E.U. de Arquitectura Técnica (UPM). Recuperado a partir de <http://oa.upm.es/9055/>
- RENFE. (2001). Obras de tierra. Terraplenes. Materiales a utilizar (N.A.P. 2-2-2.1.). Recuperado a partir de [http://descargas.adif.es/ade/u18/GCN/NormativaTecnica.nsf/v0/A5878B720496490AC12578B70025E6CC/\\$FILE/NAP%202221.pdf?OpenElement](http://descargas.adif.es/ade/u18/GCN/NormativaTecnica.nsf/v0/A5878B720496490AC12578B70025E6CC/$FILE/NAP%202221.pdf?OpenElement)
- RCDA. (2017). Informe de Producción y Gestión de Residuos de Construcción y Demolición (RCD) en España, periodo 2011-2015. Recuperado a partir de <http://www.rcdasociacion.es/images/documents/Informe-RCDA-11-15.pdf>
- RILEM. (1994). Specifications for concrete with recycle aggregates. Materials and Structures. 27(9), 557,559. Doi:10.1007/BF02473217.
- Rojo López, J. (1988). Teoría y práctica de la compactación. (I) Suelos. Móstoles, España: Dynapac, S.A (España).
- Salesa Bordanaba, A. (2014). Propiedades físico-mecánicas del hormigón tras dos ciclos de reciclado (Tesis Doctoral inédita). Univ. Alfonso X el Sabio, Madrid, España, 438 p.
- Sánchez de Juan, M. y Alaejos Gutiérrez, P. (2009). Estudio sobre las propiedades del árido reciclado: utilización en hormigón estructural. 23(2), 872-877. Doi:10.1016/j.conbuildmat.2008.04.012.
- Tiktin, J. (1997). Procedimientos Generales de Construcción: Movimiento de tierras. (3ª ed.) E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Madrid, España.

- Tiktin, J. (1998). Procedimientos Generales de Construcción: Procesamiento de áridos, instalaciones de hormigonado, puesta en obra de hormigón. (1ª ed.) E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Madrid, España.

