



INDICE

<b>1.- PRESENTACIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>2.- FICHAS TÉCNICAS DE LOS RESIDUOS.....</b>	<b>3</b>
<b>Residuos de la industria del carbón</b>	
<b>1.1. Estériles de carbón.....</b>	<b>4</b>
<b>Residuos de la industria metalúrgica</b>	
<b>2.1. Escorias de horno alto.....</b>	<b>21</b>
<b>2.2. Escorias de acería de LD.....</b>	<b>41</b>
<b>2.3. Escorias de acería de horno eléctrico.....</b>	<b>51</b>
<b>2.4. Humo de sílice.....</b>	<b>65</b>
<b>Residuos de la industria no metalúrgica</b>	
<b>3.1. Cenizas volantes de central térmica de carbón.....</b>	<b>77</b>
<b>3.2. Residuos procedentes de la fabricación de hormigón preparado....</b>	<b>101</b>
<b>3.3. Fosfoyeso.....</b>	<b>115</b>
<b>Residuos municipales</b>	
<b>4.1. Residuos de construcción y demolición.....</b>	<b>121</b>
<b>4.2. Neumáticos fuera de uso.....</b>	<b>158</b>
<b>4.3. Escorias y cenizas de incineradoras de residuos sólidos urbanos..</b>	<b>177</b>
<b>4.4. Lodos de depuradoras.....</b>	<b>197</b>
<b>4.5. Residuos de plásticos urbanos.....</b>	<b>222</b>
<b>Residuos procedentes de carreteras</b>	
<b>5.1. Reciclado de pavimentos asfálticos.....</b>	<b>251</b>
<b>5.2. Reciclados de pavimentos de hormigón.....</b>	<b>264</b>
<b>5.3. Residuos plásticos procedentes del balizamiento de carreteras.....</b>	<b>273</b>
<b>Residuos de dragados</b>	
<b>6.1. Materiales de dragado.....</b>	<b>301</b>





## 1.- PRESENTACIÓN

La ley 10/1998 de Residuos y el Plan Nacional Integrado de Residuos 2008-2015 constituyen dos instrumentos fundamentales de la política española en materia de residuos. Ambos instrumentos pretenden contribuir a la protección del medio ambiente y la salud humana, en particular mediante la aplicación del principio de jerarquía de residuos, es decir poniendo el acento en primer lugar en la prevención de su generación, y dando prioridad al reciclado y otras formas de valorización sobre su eliminación.

La actividad de construcción es una gran demandante de recursos y materiales, lo que la convierte en un sector con enorme potencial de aprovechamiento de residuos, tanto de los derivados de su propia actividad como de los procedentes de otros sectores.

La utilización en construcción de materiales procedentes de reciclado de residuos permite, por un lado, reducir la demanda de recursos naturales no renovables, y por otro reducir la cantidad de residuos que se destinan a vertedero sin aprovechamiento.

En el año 2002, el entonces Ministerio de Medio Ambiente publicó la monografía “El Catálogo de Residuos Utilizables en Construcción”. Su objetivo era contribuir al conocimiento público de los residuos que podían tener su utilidad en las actividades de construcción, buscando contribuir con ello a la demanda de productos reciclados.

En esta página web se pone a disposición del público el Catálogo de Residuos Utilizables en Construcción en formato electrónico. En la pestaña “Catálogo de Residuos” en esta misma página se puede acceder a su contenido mediante distintos criterios de búsqueda, como puede ser el tipo de residuo o el tipo de aplicación. Por otra parte, también se ha incluido una pestaña con un buzón de sugerencias a través del cual los interesados pueden remitir información en relación con los datos, referencias y demás extremos incluidos en el Catálogo.

Con esta aplicación se va un paso más allá de la clásica publicación de una monografía, y se pretende disponer de un instrumento que permita:

- dar una mayor difusión de la información contenida en el Catálogo, facilitando el acceso a cualquier persona interesada a los distintos materiales potencialmente utilizables, los volúmenes producidos y reciclados, así como a las principales aplicaciones de destino, normativa que las regula, etc
- facilitar que cuando el equipo encargado del Catálogo actualice la información, ésta esté accesible al público sin esperar a nuevas ediciones de la monografía en formato papel

La utilización de los residuos contemplados en el Catálogo se encuentra en distintas fases de desarrollo. Para algunos de ellos existe normativa nacional que regula su empleo, y que se relaciona en cada caso. Existen también residuos en los que, en ausencia de normativa española, se citan normas internacionales que pueden consultarse a título orientativo. Asimismo, la aplicación de algunos de los residuos se encuentra aún en fase experimental, y en estos casos se comentan los resultados hasta ahora obtenidos.

El Catálogo que aquí se presenta, al igual que la monografía publicada en 2002, ha sido realizada en el Marco de un Convenio de colaboración entre la Dirección de Calidad y Evaluación Ambiental del Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino y el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX).



**CEDEX**

El contenido de la información reflejada en el Catálogo ha sido desarrollado por los siguientes centros del CEDEX:

**LABORATORIO CENTRAL DE ESTRUCTURAS Y MATERIALES**

- Residuos procedentes de la fabricación de hormigón preparado
- Lodos de depuradoras
- Humo de sílice
- Escorias de horno alto
- Residuos de construcción y demolición
- Residuos plásticos urbanos
- Residuos plásticos procedentes del balizamiento de carreteras

**CENTRO DE ESTUDIOS DEL TRANSPORTE**

- Reciclado de pavimentos asfálticos
- Reciclados de pavimentos de hormigón
- Escorias de acería de horno de arco eléctrico
- Escorias y cenizas de incineradoras de residuos sólidos urbanos.

**LABORATORIO DE GEOTECNIA**

- Cenizas volantes de carbón
- Neumáticos fuera de uso
- Estériles de carbón
- Escorias de acería LD
- Fosfoyesos

**CENTRO DE ESTUDIOS DE PUERTOS Y COSTAS**

- Materiales de dragado

El equipo técnico del CEDEX encargado de la redacción de las fichas ha estado formado por D<sup>a</sup> Pilar Alaejos Gutiérrez (coordinadora), D<sup>a</sup> Marta Sánchez de Juan y D<sup>a</sup> Francisca Castillo Rubí, del Laboratorio Central de Estructuras y Materiales, D<sup>a</sup> Herminia Cano Linares, del Laboratorio de Geotecnia, D. Francisco Sinis Fernández y D. José Ignacio Cuñado Arroyo, del Centro de Estudios del Transporte y D<sup>a</sup> Ana Lloret Capote, del Centro de Estudios de Puertos y Costas.

En los trabajos realizados por el Laboratorio de Geotecnia, ha colaborado D. Miguel Celemin Matachana, de la Universidad de León.

En la revisión y actualización de las fichas se ha tenido en cuenta las observaciones recibidas de la Subdirección General de Producción y Consumo Sostenibles del MARM.



## 2.- FICHAS TÉCNICAS DE LOS RESIDUOS

A continuación se incluyen las fichas actualizadas.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 1.1	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>ESTÉRILES DE CARBÓN</b>		
Nombre en inglés: collera Spoil		



ESTÉRILES DE LAVADERO



ESTÉRILES ROJOS



MAQUINARIA PARA TODO UNO DE ESTÉRILES

## 1.- ORIGEN

Se entienden como estériles de carbón, a efectos de esta ficha técnica, al residuo procedente de la separación entre el carbón y el estéril. Se originan en la explotación de los pozos y minas de hulla y antracita, así como en los procesos del lavado del carbón. En general se almacenan en escombreras <sup>(1)</sup>.

Al primer tipo de residuos se les denomina **estériles de mina** y están constituidos por rocas encajantes de las capas de carbón, fundamentalmente pizarras y areniscas. Los del segundo tipo reciben el nombre de **estériles de lavadero**, y representan, aproximadamente, el 90% de la producción total de estériles. Los estériles de lavadero se obtienen como residuo de la

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 1.1	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>ESTÉRILES DE CARBÓN</b>		

operación de lavado del carbón, obtenido a partir de la hulla y la antracita, separando el carbón por flotación en líquidos densos. Se denominan “finos”, “menudos”, “granos” y “gruesos”y, están constituidos fundamentalmente por pizarras y areniscas.

Los **estériles de escombrera** son los resultantes del almacenamiento de los estériles de mina y de lavadero en una escombrera. El 90% del material acopiado en escombrera son los residuos del lavado del carbón y un 10% suele ser estéril de mina. En general, se caracterizan por presentar una granulometría que varía según los tipos de estériles originales y estar normalmente degradados y disgregados. Los estériles de escombrera pueden a su vez diferenciarse en **estériles rojos** y **estériles negros**. Los estériles negros son los residuos de la minería del carbón que se encuentran depositados en una escombrera. Al todo uno de estériles negros se le denomina *formoschiste* en Francia. Los estériles rojos son los materiales resultantes de la autocombustión del carbón que contienen los estériles negros; se caracterizan por presentar un color rojizo, no contener carbón, poseer una mayor resistencia que los no calcinados y por estar, a veces, “soldados” unos a otros.

En Francia se utiliza la clasificación siguiente<sup>(2)</sup>: todo uno de estériles negros, estériles negros clasificados, todo uno de estériles rojos y estériles rojos clasificados.

## **2.- VOLUMEN Y DISTRIBUCIÓN**

En España se viene produciendo un lento pero continuo proceso de reducción de los volúmenes de producción de carbón, al igual que en otros países de Europa occidental (en los países de Europa del Este la tendencia es la contraria) Del mismo modo, el número de empresas productoras de carbón está descendiendo progresivamente. El total de empresas mineras en 1995 era de 105 y en el año 2005 ha pasado a 35. La aplicación del Plan 1998-2005 de la Minería del Carbón está suponiendo la reestructuración de este sector.

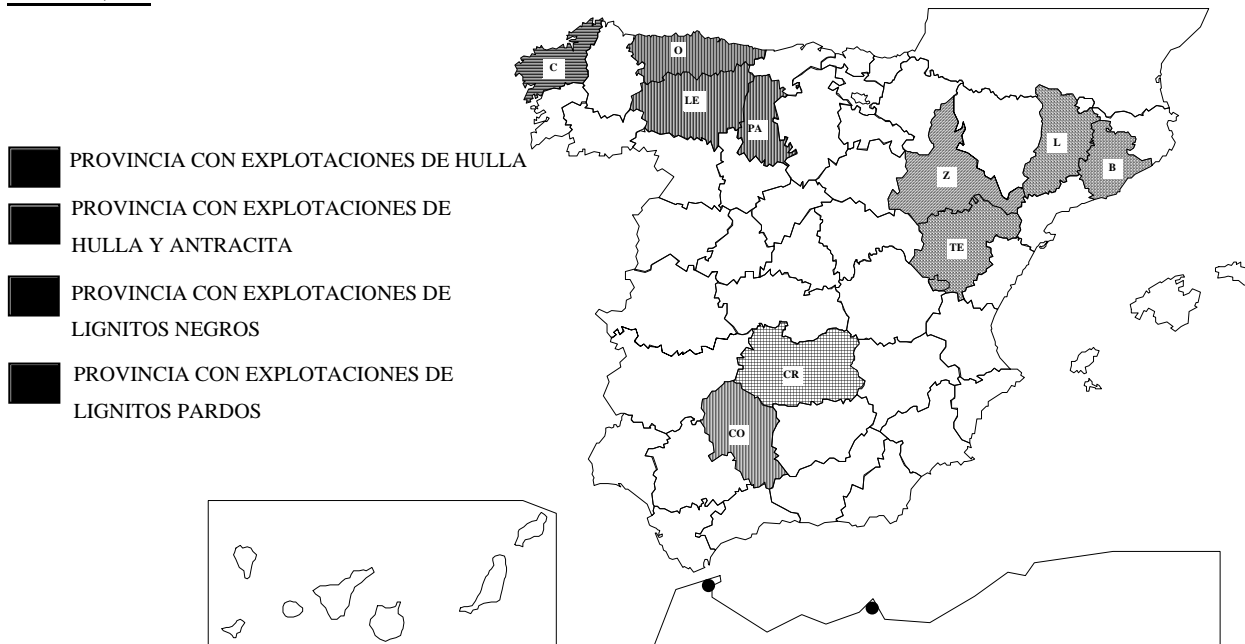
Así, durante el año 2000 la producción bruta de carbón en España se estimó en unos 23,5 millones de toneladas, distribuidas según los tipos de carbón en: lignito pardo 8,5, lignito negro 3,5, hulla y antracita 11,5 millones de toneladas. El segmento de la hulla y la antracita sigue siendo el de mayor importancia. En la tabla 1 se recogen los datos brutos de producción de carbón en España y en Europa en los últimos años. La producción de estériles de carbón representa aproximadamente el 10-12% de la producción de carbón.

<i>Producción bruta carbón (x10<sup>6</sup>t)</i>		
<i>Año</i>	<i>España</i>	<i>Europa (unión 25)</i>
2000	23,5	573
2002	22,5	563
2004	22,0	543
2005	21,6	522
2006	21,2	504

Fuente: Carbounion. Informe anual 2005 y British Petroleum: Statistical review of World Energy June 2007

**Tabla 1:** Datos brutos de producción de carbón en España y en Europa

**LEYENDA**





<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 1.1	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>ESTÉRILES DE CARBÓN</b>		

### 3.- VALORIZACIÓN

#### 3.1.- PROPIEDADES

##### Propiedades físicas <sup>(3 y 4)</sup>

En general, los estériles del carbón están constituidos por fragmentos de diversas rocas, con una granulometría 0-200, siendo difícil la presencia de bloque de tamaño métrico, procedente de los estériles de mina. El peso específico medio de los estériles de carbón en España está comprendido entre 23,5 y 28,5 kN/m<sup>3</sup>. La plasticidad suele estar comprendida entre de tipo media-baja a inexistente.

Los **estériles de mina** se caracterizan por tener una granulometría más irregular, no estar degradados y, en general, no poseer carbón.

Los **estériles de lavadero** poseen una granulometría y una composición mineralógica y química muy regulares, y no suelen estar degradados ni disgregados a la salida de los lavaderos. Su contenido en carbón es variable, en función de los tamaños correspondientes a los diferentes cortes granulométricos que se realizan en los lavaderos. Son de color gris y tienen un cierto porcentaje de lajas. Se suelen clasificar en gruesos (>150 mm), granos (150 a 10 mm), menudos (10 a 1 mm) y finos (<1mm). El peso específico de las partículas de los granos y menudos es del orden de 2,5 t/m<sup>3</sup>, mientras que la de los finos es algo inferior, del orden de 2,2 t/m<sup>3</sup>.

Los **estériles de escombrera**, tanto los estériles rojos como los estériles negros, presentan una granulometrías muy variables, que son función de los tipos de estériles originales, con porcentajes importantes de partículas superiores a 50 mm. En el caso de los **estériles negros**, se pueden encontrar en las escombreras tamaños decimétricos hasta en algún caso métrico. El tamaño medio de las partículas está comprendido entre 0,5-1 mm a 34-40 mm, y el porcentaje de finos entre el 2% y el 75%. La densidad aparente puede variar desde 1,26 t/m<sup>3</sup>, en los escombros más flojos, hasta 1,80 t/m<sup>3</sup> en los más compactos. El peso específico relativo de las partículas está comprendido entre 2,4 y 2,8. En general, los finos suelen ser poco plásticos, con valores del límite líquido (LL) de 18 a 30 y con índices de plasticidad (IP) de 3 a 10. La densidad Proctor normal se sitúa en el intervalo 1,55-2,02 t/m<sup>3</sup>, con humedades óptimas de compactación comprendidas entre 12% y 8%, respectivamente. El CBR para la densidad Proctor normal suele estar comprendido entre 9 y 16, mientras que para la densidad Proctor modificado, el CBR varía entre 11 y 29.

En cuanto a los **estériles rojos**, se trata de un material que tiene naturaleza granular con una distribución continua de tamaños, con un cierto porcentaje de material lajoso y quebradizo; el tamaño máximo de los estériles rojos puede ser del orden de 300 mm, mientras que el porcentaje de finos suele ser inferior al 10%, siendo dicho material no plástico. La densidad máxima Proctor Modificado suele ser del orden de 1,8 t/m<sup>3</sup>, con una humedad óptima en torno al 11%. El CBR presenta valores altos, habiéndose alcanzado algunos del orden de 40, e incluso superiores. Por otra parte, los estériles rojos son susceptibles al hielo, por lo que, si es preciso prever la influencia de la helada, se aconseja la utilización de aquéllos a una profundidad superior a la de la penetración de la helada.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 1.1	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>ESTÉRILES DE CARBÓN</b>		

En cuanto a la **petrografía** de los estériles del carbón, estudios realizados en nuestro país, muestran que existe una gran variación debido a la diversidad y complejidad de su geología. Los estériles de la mayoría de las cuencas carboníferas son rocas sedimentarias –areniscas, pizarras arenosas y carbonosas- con una relación cuarzo/arcilla muy variable; las rocas de los minerales arcillosos son, generalmente, más frecuentes que las rocas de cuarzo<sup>(4)</sup>. En los estériles de mina predominan normalmente las areniscas y en los estériles de lavadero son más abundantes las pizarras. Asimismo, los estériles también presentan, aunque en menor proporción, rocas ferruginosas, carbonosas, etc.

En lo relativo a su **composición mineralógica**, los estériles son mezclas de diferentes componentes que pueden variar considerablemente de una cuenca a otra, aunque predominan los de las rocas arcillosas, tales como illita, caolinita, clorita, etc. Los porcentajes de cuarzo oscilan entre el 20% y el 50%, disminuyendo el contenido a medida que se reduce el tamaño y encontrándose los menores valores en los estériles de antracita. Otros minerales presentes son piritas, carbonatos, etc<sup>(4)</sup>.

En la tabla 2 se recogen, a modo de resumen, las propiedades del todo-uno menor de 50 mm de los estériles de carbón, según estudios realizados en nuestro país<sup>(5)</sup>.

	<b>ESTÉRIL ROJO</b>	<b>ESTÉRIL NEGRO</b>
Granulometría	Continua <5% inf.0,08mm	Continua <5% inf.0,08mm
Densidad (t/m <sup>3</sup> )	[2,70-2,73]	[2,74]
Absorción (%)	[5,6-5,8]	
Forma Índice de Lajas Índice de Agujas	[36-42] [46-51]	
Desgaste Los Ángeles	[36-39] granulometría B [31-46] granulometría A [21-25] arenisca	[31-36]
Equivalente de arena	[30-51]	[38]
Plasticidad	No plástico	LL-[26-29];LP:[19-20];LP:[7-9]
Proctor Modificado Densidad máxima (t/m <sup>3</sup> ) Humedad óptima	>1,9 [10,2%-15,5%]	[1,99-2,09] [7,0%-10%]
CBR	>50	<20

**Tabla 2:** Características del todo-uno menor de 50 mm de los estériles de carbón

### **Propiedades químicas**

Los estudios realizados<sup>(6)</sup> ponen de manifiesto que los estériles en general poseen un elevado porcentaje de SiO<sub>2</sub> (40-70%) y una importante proporción de alúmina, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (10-25%),

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 1.1	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>ESTÉRILES DE CARBÓN</b>		

siguiéndoles en importancia el  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  y  $\text{Na}_2\text{O}$ . El contenido de azufre es variable, en general inferior al 2% (en algún caso 3,6%) y se puede presentar bajo diversos compuestos químicos, siendo el más frecuente la pirita. Asimismo, los estériles contienen carbono fijo en porcentajes que, una vez descontadas las cenizas y los volátiles, pueden llegar al 16% en los estériles de hulla y el 27% en los de antracita.

En los **estériles rojos**, el porcentaje de sílice está entorno al 55% y el de alúmina al 25% y suelen ser superiores al que presentan los estériles negros. El contenido de óxido férrico es bastante variable, con valores medios cercanos al de los estériles negros (5%). Los estériles rojos contienen sulfatos; dependiendo del porcentaje de éstos pueden presentar pH ácido. A veces se ha detectado presencia de carbonatos. También pueden aparecer contenidos de materia orgánica, en función de la norma que se aplique en su determinación (si se determina según la norma UNE 103204, es decir la materia orgánica oxidable los valores que se obtienen pueden ser superiores al 2%, que es el valor que en el PG3, art.333, se considera para rocas marginales, lo que impide la valorización de este residuo. Si se determina el porcentaje de materia orgánica descomponible, los valores que han obtenido son muy bajos, del 0,1 a 0,36%).

En los **estériles negros** el porcentaje de sílice es del 50%, aproximadamente, el de alúmina es del 20% aproximadamente y el óxido de hierro está entorno al 7%. La composición química de los estériles negros es, pues, similar a la de la arcilla. Pueden presentar contenidos de materia orgánica, según la norma que se aplique para su determinación.

El contenido medio de carbón de los estériles de escombrera del Norte de España es del orden del 5%, pudiendo dicho porcentaje llegar a ser hasta del 30% en las escombreras más antiguas.

Los estériles suelen ser neutros o ligeramente alcalinos, pero en contacto con agua y en presencia de piritas, pueden dar lugar a lixiviados ácidos; no obstante, éstos pueden ser neutralizados rápidamente por reacción con los elementos alcalinos presentes en los estériles.

En la tabla 3 se recoge a modo de resumen la composición química media de los estériles de carbón españoles<sup>(1)</sup>.

$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{K}_2\text{O}$	MgO	$\text{TiO}_2$	CaO	$\text{S}_{\text{total}}$
43-49	22-24	5-7	2,9-3,2	1,2-1,5	1,1-1,2	1,1-2,0	0,6-1,4

**Tabla 3:** Composición química media de los estériles de carbón españoles

### Propiedades mecánicas<sup>(1 y 5)</sup>

Los valores medios de compactación dan valores de densidad seca máxima superiores a  $17 \text{ kN/m}^3$ , con unas humedades medias óptimas comprendidas entre 6 y 12%. Una particularidad de estos materiales es su degradabilidad por efecto de la compactación, aumentando con la energía aplicada. Las consecuencias de este fenómeno se limitan a aumentar el porcentaje de los tamaños más pequeños (significativa en el intervalo 10-20 mm), sin que varíe notablemente ni el porcentaje ni la plasticidad de los finos <sup>(1)</sup>. Sin embargo, una compactación muy intensa

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 1.1	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>ESTÉRILES DE CARBÓN</b>		

puede afectar negativamente a las propiedades físicas y mecánicas del material (pe. el ángulo de rozamiento obtenido en ensayo triaxial pasa de 29-32° a 13°) <sup>(5)</sup>.

El índice CBR está comprendido entre 8 y 29, con un valor medio del orden de 10. Los parámetros de resistencia al corte en muestras del Reino Unido han dado valores del ángulo de rozamiento entre 25 y 40°, aunque puede disminuir hasta 20° en los residuos más meteorizados; la cohesión es del orden de 9kPa en residuos no meteorizados e incluso nula, pero puede llegar hasta 50 kPa y por encima de este valor en condiciones de mayor alteración ambiental.

### 3.2.- PROCESADO

El tratamiento que cabe dar a los estériles de carbón es mecánico, consistiendo en machaqueo más o menos intenso y posterior clasificación. Para su empleo en la construcción de carreteras se requiere un machaqueo previo y la clasificación de los áridos, con el fin de cumplir los husos granulométricos. Para su utilización como material en capas de rellenos y terraplenes no se requiere en principio ningún procesado; no obstante, en ocasiones, puede ser necesario realizar un cribado para eliminar los tamaños grandes. En cuanto al empleo de estériles negros en la explanada puede ser preciso eliminar también los tamaños inferiores a 20 mm, para reducir la sensibilidad al agua del material extendido, ya que en el proceso de compactación se produce una cierta degradación del material, particularmente del comprendido entre 10 y 19 mm. No se ha observado un incremento apreciable del material inferior a 80 µm por efecto de la degradación debida a la compactación

### 3.3.- PROPIEDADES DEL MATERIAL PROCESADO

#### Propiedades físicas

Los **estériles de lavadero** suelen clasificarse granulométricamente en gruesos (>150 mm), granos (10-150 mm) menudos (1-10 mm) y finos (<1 mm). Los **estériles rojos** suelen prepararse en fracciones 0-10 (Izqda. de la fotografía 2) y 10-20 (Dcha. de la fotografía 2), obtenidas a partir de la trituración y clasificación del rechazo obtenido en el tamiz 20-25 mm. La densidad de las partículas del material procesado es del orden de 2,7 gr/cm<sup>3</sup>.

El *formoshiste* es un material obtenido generalmente *in situ*, con maquinaria como la que se muestra en la fotografía 3, por cribado con cortes en 16 y en 160 mm, rechazo nulo en 250 mm, admitiéndose hasta un 20% mayor de 160 mm y no más del 20% por debajo de 16 mm. El porcentaje de material inferior a 0,08 mm no debe ser superior al 5%.

Estudios realizados en nuestro país con muestras de estériles rojos y negros, tratados para su utilización en carreteras, han mostrado las características que figuran en la tabla 4 <sup>(5)</sup>.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 1.1	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>ESTÉRILES DE CARBÓN</b>		

	<b>ESTÉRIL ROJO TRITURADO</b>	<b>ESTÉRIL NEGRO TRITURADO (ELIMINANDO ANTES &lt;25 mm)</b>
Granulometría	Continua 8 al 10% de tamaño inferior a 0,08mm	Continua 6 al 8% de tamaño inferior a 0,08mm
Densidad (t/m <sup>3</sup> )	2,74	2,71-2,75
Absorción (%)	3,2	1,28-2
Forma		
Índice de Lajas	32	
Índice de Agujas	43	
Desgaste L.A.	28-29	23-28
Equivalente de Arena	50-87	33-50
Plasticidad	No plástico	
Proctor Modificado		
Densidad máxima (t/m <sup>3</sup> )	2,14	2,22-2,31
Humedad (%)	8,5	6,5
CBR	>50	≈20

**Tabla 4:** Características de los estériles de carbón tratados

Uno de los aspectos más reseñables de estos materiales desde el punto de vista químico es el de su capacidad para la generación de problemas derivados de la presencia de sulfatos. Esta cuestión tiene un doble aspecto, por un lado hay que hablar de la eventualidad del denominado "drenaje ácido de minas, (DAM)", frecuente en la minería<sup>(7)(8)(9)</sup>, y particularmente, en la metálica y por otro, el de los sulfatos solubles. El primero de los aspectos no reviste gran interés en ingeniería civil pero sí el segundo<sup>(22)</sup>. Ambos problemas se presentan tanto en los estériles negros como en los rojos, con mayor incidencia en estos últimos.

Cuantitativamente, el 71% de los estériles negros y el 49% de los rojos, presentan contenidos de sulfatos solubles en agua inferiores a 2g/l y de sulfatos solubles en medio ácido por debajo del 1%. El pH, para el *National Coal Board (NCB)*, presenta un valor modal de 7, aunque los estériles negros muestran cierto sesgo hacia la acidez<sup>23</sup>. No obstante, el rango de valores de pH de una suspensión acuosa de estériles se puede situar entre 4,2 y 8,5<sup>(22)</sup>, mientras que el de contenido en sulfatos solubles se encuentra entre 0,6-7,0 g SO<sub>3</sub>/l. Por último, la composición química de SiO<sub>2</sub> presenta valores entre 38 y 60%, el contenido de alúmina entre el 14 y el 30% mientras que el de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> se encuentra entre el 3 y el 11%<sup>22</sup>. Hay que señalar que los porcentajes de alúmina de estos residuos les ha hecho objeto de estudios destinados a recuperar el aluminio existente en ellos.

### **Propiedades Mecánicas**

Las densidades obtenidas con diferentes porcentajes de menudos y granos varían entre 1,98 y 2,12 g/cm<sup>3</sup>, mientras que el índice CBR varió entre 8 y 21<sup>(3)</sup>. Por lo que respecta al *formoshiste*, las propiedades mecánicas aportadas son un coeficiente Deval húmedo superior a 1,2 y un

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 1.1	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>ESTÉRILES DE CARBÓN</b>		

coeficiente de los Ángeles inferior a 55, propiedades ambas medidas sobre la fracción 25/50<sup>(2)(4)</sup>. Los **estériles rojos** españoles alcanzan densidades entre 1,77 y 1,98 g/cm<sup>3</sup> con humedades en el rango 11-17. Los CBRs (Proctor Normal) estuvieron comprendidos entre 28 y 82 y el coeficiente de los Ángeles de 31<sup>(5)</sup>. Con densidad máxima de Proctor Modificado (PM), los resultados varían entre 1,82 y 2,14 g/cm<sup>3</sup> y humedad óptima entre 6,5 y 16,5, CBR (PM) entre 44 y 113 y desgaste de los Ángeles entre 25 y 31. Para estos estudios, en los estériles rojos se realizó una molienda del todo-uno a tamaños inferiores a 50 mm, con la finalidad de mejorar su índice de forma. En los estériles negros, debido a su plasticidad y baja capacidad portante, se realizó un corte a 25 mm, desechándose la fracción inferior a dicho tamaño que es la de mayor contenido de material carbonoso. El material mayor de 25 mm se trituró a tamaño inferior a 50 mm, según lo exigido para materiales granulares.

### 3.4.- APLICACIONES

Los estériles de carbón se pueden emplear como materiales para la construcción de carreteras y se están empleando en países como Alemania, Reino Unido y Francia<sup>(7)</sup>, como:

1. Terraplenes y rellenos
2. Materiales granulares y zahorras
3. Materiales estabilizados con cemento

Para ello se montan plantas de tratamiento de los estériles para la obtención de los correspondientes materiales, separados o no por tamaños, o de mezcla de los estériles con conglomerantes hidráulicos, fundamentalmente cemento.

En nuestro país<sup>(8)</sup>, de los resultados obtenidos en ensayos realizados se ha deducido que los estériles de carbón, además de poderse emplear como **materiales para terraplenes y rellenos**, también se pueden utilizar en capas de coronación de éstos, y, con el adecuado tratamiento en capas de firme.

#### 3.4.1 CARRETERAS

##### **Estériles rojos**

El todo-uno tratado de los estériles rojos se puede utilizar en **subbases granulares** para todo tipo de tráfico. Si en las instalaciones que se monten para el tratamiento del material se logra mejorar su forma y reducir el coeficiente de desgaste Los Angeles por debajo de 35, podrá también emplearse este material en las aplicaciones de **zahorra artificial**, para tráfico medios y ligeros.

En Francia, el todo uno de estériles rojos ha sido utilizado en la construcción de firmes para caminos rurales (20-30 cm de estériles rojos debajo de un tratamiento superficial), para vías con poca circulación (20-30 cm de estériles rojos más unos 6-8 cm de aglomerado) así como en los arcenes de carreteras. En este último caso, encima de los estériles rojos se colocaban unos 12 cm de grava-escoria y 6 cm de aglomerado.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 1.1	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>ESTÉRILES DE CARBÓN</b>		

Los estériles rojos pueden utilizarse también en la fabricación de otras unidades para capas de subbase como en gravas con cenizas y cal, y en grava con cal.

La **grava con ceniza y cal** se obtiene triturando el estéril y separándolo en dos fracciones 0/5 mm y 5/20 mm, lo que permite componer una buena granulometría continua, se le añade 12% de ceniza volante silicoaluminosa, 3% de cal apagada y agua. Con esta mezcla se alcanza a los 90 días elevadas resistencias mecánicas a tracción (más de 1 Mpa) y compresión (más de 9 Mpa).

La **grava con cal** aprovecha el carácter puzolánico de los finos del estéril rojo y se obtiene mezclando el estéril triturado 0/20 mm con 3% de cal apagada. El estéril debe tener más del 6% de finos (partículas menores de 80 µm). Se obtienen resistencias a compresión a 90 días mayores de 6 Mpa.

Estudios realizados en nuestro país<sup>(9)</sup>, han confirmado la experiencia existente en otros países europeos, como Francia y el Reino Unido<sup>(10)(11)</sup>, de utilizar como suelo cemento para subbases de carreteras a los estériles de carbón, rojos o negros, estabilizados con cemento en porcentajes entre el 5 y el 6%.

Los estériles rojos clasificados 0/6 y 6/20 son los más adecuados para la fabricación de mezclas con ligantes hidráulicos. Este tipo de empleo presupone un conocimiento bastante preciso de las características mecánicas de las mezclas. Hay que señalar la conveniencia de proyectar ese tipo de firmes en vías de tráfico moderado. Así, en la cuenca Nord Pas-de-Calais en Francia, se utilizaron ampliamente, en tiempos de abundancia de escombreras quemadas, mezclas de estériles rojos con escorias de alto horno, con cenizas volantes silico-aluminosas o mixtas de estos dos residuos. En la actualidad, con una paulatina desaparición de este tipo de préstamos y la consiguiente disminución en su calidad, se está generalizando la tendencia a sustituir la fracción 6/20 por áridos calizos.

La fracción 0/20 de los estériles rojos clasificados se utiliza como material para firmes, de acuerdo con la normativa francesa.

### **Estériles negros**

Los estériles negros de escombrera pueden ser utilizados en **subbases para tráfico ligeros**, siempre y cuando se eliminen por cribado los tamaños inferiores a 20-25 mm y se machaque la fracción retenida. Si el material así tratado cumple las especificaciones correspondientes, en particular, el CBR y la plasticidad de los finos, podrá ser utilizado en la ejecución de **subbases granulares**.

El cribado del material resultante del tratamiento descrito en el párrafo anterior por el tamiz 50 mm proporciona un "todo uno" 0/50 que puede ser empleado como **explanada mejorada**. Los estériles negros con un tratamiento mecánico que permita conseguir la granulometría apropiada, también pueden ser utilizados como **suelo-cemento**.

En Francia, por ejemplo, se han agotado, prácticamente, todos los estériles rojos porque vienen siendo habitualmente utilizados en la construcción de explanadas. Hoy en día, se están utilizando para este fin los estériles negros de escombrera, constituidos, en su mayor parte, por

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 1.1	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>ESTÉRILES DE CARBÓN</b>		

estériles de lavadero. Para ello, se criban dichos materiales y se utiliza la fracción 20/25. Las características mecánicas son evaluadas mediante el coeficiente de Los Ángeles y el Deval húmedo, determinados ambos sobre la fracción 25/50. También se pueden utilizar estériles negros clasificados a partir de la fracción 50/150 del “todo uno” para la fabricación de mezclas con ligantes hidráulicos (ej. cuenca de la Lorena en Francia, con características mecánicas muy competentes).

Las tendencias esperadas para los próximos años en la región *Nord Pas-de-Calais* (Francia) son las de profundizar en el conocimiento de los estériles negros, principalmente en su utilización para la ejecución de explanadas. Los estudios de laboratorio efectuados sobre estériles de lavadero, con poca presencia de sulfatos, han resultado prometedores. La preocupación se centra en dos aspectos: controlar la homogeneidad del préstamo y la arcillosidad de las partículas minerales, aspecto éste de gran importancia, además de otros aspectos como: el tiempo necesario para la apertura al tráfico de la explanada, por su incidencia en los plazos de ejecución, la determinación de la resistencia temprana a la inmersión, la resistencia a la helada de la capa, el estudio de las resistencias a largo plazo.

En la normativa británica, los estériles rojos son aceptados como material para sub-base granular y sub-base granular con cemento, mientras que los estériles negros sólo son propuestos como sub-base granular con cemento <sup>(22)</sup>.

### 3.4.2. TERRAPLENES Y OBRAS DE TIERRA<sup>(12, 13 y 14)</sup>

Se ha realizado un estudio en nuestro país para determinar la viabilidad técnica de la utilización de los estériles en terraplenes y rellenos de carreteras, en el que, además de la realización de ensayos de laboratorio y pruebas de compactación a gran escala, se construyó un terraplén experimental a escala natural con estériles del carbón. Como fruto de este estudio, en Asturias se han empleado desde 1989 hasta la fecha unos 6 millones de toneladas para dicha aplicación.

También se han realizado estudios en nuestro país, entre 1993 y 1995 para demostrar la validez de la técnica de utilización de estériles del carbón como material de relleno en estructuras de tierra reforzada. Se construyó un relleno experimental a escala real con muros de tierra reforzada, empleando como material de relleno estériles de escombrera. Se controló la estructura durante y después de su construcción, siendo el comportamiento de los estériles totalmente satisfactorio.

Se ha observado que la utilización de estériles de producción reciente, pueden ser ventajosamente utilizados en la ejecución de terraplenes, debido a que los tamaños grandes generan los finos que rellenarán los huecos. La excepción a esta observación la proporcionan los estériles con elevada presencia de bloques de arenisca, ya que éstos no sufren este efecto.

Analizando concretamente los tipos de estériles, el todo uno de **estériles negros** se pueden utilizar en la construcción de terraplenes y rellenos, como material de relleno general. A este respecto se hacen recomendaciones tales como la eliminación de los elementos más pizarrosos, especialmente, en condiciones de lluvia, para facilitar la puesta en obra. De igual forma, debe evitarse la utilización de estos materiales en zonas inundables, a menos que se interponga una capa de material insensible al agua. Los estériles del carbón cribados podrían



<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 1.1	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>ESTÉRILES DE CARBÓN</b>		

utilizarse en zonas inundables, así como en la del núcleo del relleno. En principio no son considerados susceptibles de experimentar combustión espontánea si su contenido en sulfuros oxidables es inferior al 0.06 % de sulfato, expresado como  $SO_4^{=}$ . Debido a las propiedades resistentes, pueden construirse taludes 3H:2V.

Los **estériles rojos** se citan como relleno y como material seleccionado granular para relleno con usos en arranque de terraplén, material de drenaje y en contacto con agua<sup>(2)</sup>. La utilización de los estériles en explanada requiere cierto tratamiento, aunque sea somero, como el que da lugar al *formoshiste*. Los estériles rojos “todo uno” están también muy indicados para este empleo. En Francia se ha recurrido a la utilización de sesenta centímetros de estériles rojos “todo uno” sobre un geotextil como apoyo del firme sobre terrenos limosos húmedos de poca capacidad portante<sup>(2)</sup>. En la normativa del Reino Unido, los estériles rojos se proponen como material para explanada.

### 3.5.- OBRAS REALIZADAS

Los estériles de carbón han sido utilizados masivamente en el Reino Unido, Francia Alemania y Holanda especialmente, en rellenos y terraplenes, y en cantidades del orden de decenas de millones de metros cúbicos. Los usos en firmes han registrado una intensidad mucho menor <sup>(1)(2)(15)(17)(18)</sup>.

En España se han llevado a cabo estudios para la aplicación de estériles de carbón en terraplenes y carreteras de forma conjunta por Hunosa, el Ministerio de Obras Públicas, Transporte y Medioambiente y el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. Después de analizar la aplicación en terraplenes dirigieron sus esfuerzos a las mejoras del material para su empleo en capas de firme. Así, en el 1993 se montó en Asturias una planta para el tratamiento de los estériles de carbón como materiales para capas de firmes. En dicha planta, el material se somete a determinados procesos de cribado y machaqueo selectivos hasta conseguir un producto que cumpliera las especificaciones para capas granulares de subbases y algunas aplicaciones de capa de base, y para capas tratadas con cemento y emulsión. Paralelamente se realizaban las comprobaciones pertinentes para asegurar la inalterabilidad del material y la ausencia de problemas por lixiviados.

Como ejemplos de obras en las que se han empleado estos materiales se pueden citar:

- **Autovía Oviedo-Campomanes:** se han utilizado del orden de 128.000 t de estériles de lavadero en la construcción de terraplenes y se han construido 4,5 km de subbase empleando estériles de lavadero estabilizados con un 6% de cemento (1992).
- **Autovía Oviedo-S. Miguel de la Barreda:** se colocaron más de 1500 m<sup>3</sup> de estériles negros de escombrera y lavadero para la construcción de terraplenes.
- **Carretera Ujo-Moreda (Asturias):** se han utilizado estériles rojos, machacados y clasificados en el huso 0/50 como subbase y también han sido empleados estériles negros sin tratar en un terraplén de dicha carretera.
- **Autovía Mieres-Campomanes:** sin tratar o con un ligero tratamiento mecánico, consistente en la eliminación de los tamaños grandes, en la construcción de 17 km de la explanada, en

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 1.1	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>ESTÉRILES DE CARBÓN</b>		

una capa de un espesor de 1,2 m, sobre los que se colocaron 22cm de grava-escoria y 17cm de mezcla bituminosa.

- **Carretera de Fabero a Berlanga (León):** se han utilizado estériles rojos en la constitución de la explanada así como en la del camino vecinal de Toreno a Vega de Espinareda.
- **Autovía del Noroeste (tramo S. Román de Bemibre-Villafranca del Bierzo):** en el Proyecto de Construcción estaban autorizados algo más de un millón de metros cúbicos de estériles de relavado de la denominada "montaña de carbón de Ponferrada" para construcción de terraplenes, pero no llegaron a emplearse. Solo se emplearon unos 2800 en la construcción de un pequeño terraplén de acceso a la Autovía Cubillos-Toreno, situado cerca de esta última localidad.

Entre las más recientes cabe citar:

- **Rellenos de los estribos del puente sobre el río Sil y acceso al Campus Universitario de Ponferrada:** empleo de estériles negros (2005).
- **Autovía Cubillos-Toreno** Estériles negros procedentes de la escombrera de Toreno para trasdosar alguna de las estructuras y en caminos de servicio de esta misma infraestructura. Los estériles de relevado de la "Montaña de carbón de Ponferrada" fueron empleados en núcleo de terraplén en la autovía Cubillos-Toreno (Ramal 85, p.k. +060 a +0160), año 2000, por FCC. Esta misma empresa realizó un estudio sobre la utilización de los estériles de relavado en suelo cemento.

La utilización de estos residuos en terraplenes y carreteras en España es relativamente reciente. Hasta 1989 se empleaban únicamente en zonas mineras, para el relleno de minas y pozos, canteras abandonadas, huecos o terrenos hundidos, etc.

En Francia, la primera obra en la que se utilizaron estériles rojos tratados fue la de la **carretera Hersin-Coupigny**, en la región Nord-Pas de Calais, en 1969. Desde aquel año, los estériles rojos fueron utilizados abundantemente. Otras carreteras francesas en las que se han utilizado estériles rojos tratados son: la **R.N. 39**, en el Paso de Calais, para tráfico T<sub>1</sub> francés (1976), la carretera **C.D. 28** (Moselle), para tráfico T<sub>3</sub> francés, en 1975 y la carretera C.D. 919, en el **Paso de Calais**, para tráfico T<sub>3</sub>, en 1977.

#### **4.- CONSIDERACIONES MEDIOAMBIENTALES**

##### Generalidades

La Decisión del Consejo, 2000/532/CE, de la Comisión, aprobó la Lista Europea de Residuos, que refunde el Catálogo Europeo de Residuos (CER) y la Lista de Residuos Peligrosos. Los estériles del carbón constituyen el residuo de código 01 01 02. Se trata de un residuo perteneciente al capítulo 01, correspondiente a los residuos de la prospección, extracción de minas y canteras y tratamientos físicos y químicos de minerales y subcapítulo 01 01 residuos de la extracción de minerales.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 1.1	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>ESTÉRILES DE CARBÓN</b>		

En cuanto a la caracterización medioambiental no se conocen estudios relativos al impacto ambiental causado por la utilización de los residuos de la minería del carbón en la construcción de carreteras. En Francia se ha publicado una tesis doctoral<sup>7</sup> relativa al impacto sobre las aguas de las escombreras de carbón por su exposición a las condiciones atmosféricas. Se centra su estudio en grandes acumulaciones de residuos en superficies reducidas, lo que favorece la concentración de los compuestos lixiviados. Estudia el drenaje ácido de los residuos de la minería del carbón, que como es sabido es uno de los impactos de la minería en general, particularmente, de la minería metálica<sup>(8)(9)(10)(11)</sup>. La tesis citada propone dos fuentes de información para evaluar los efectos potenciales del drenaje ácido: ensayos de lixiviación a pH determinado y análisis de las acumulaciones de agua a pie de escombrera.

### Ventajas

El empleo de materiales acopiados en escombreras supone una serie de beneficios de carácter global:

- Permite disminuir parcial o totalmente el volumen de residuos existente en las escombreras y, en el segundo de los casos, liberar el terreno ocupado por los acopios para otros usos. Adicionalmente, se reducen algunos o todos de los numerosos impactos que ocasionan las escombreras. Por ejemplo, la mejora que se logra en la estabilidad de las escombreras y por tanto, en la seguridad, al disminuir el volumen de material acopiado.
- El empleo de residuos en la construcción de firmes permite reservar los áridos naturales para usos que requieran especificaciones técnicas más exigentes y con ello, contribuir a la conservación de los recursos naturales.
- En el caso de valorizar residuos del carbón, los beneficios económicos que se pudieran obtener podrían servir para financiar, al menos parcialmente, costes de la recuperación medioambiental de los terrenos afectados por las labores mineras.
- El empleo de los estériles de lavadero en la construcción de firmes permite reducir o eliminar en su caso, alguna de las diversas modalidades que adopta el impacto ambiental causado por las escombreras.

### Inconvenientes

- Hay que prestar atención al posible riesgo de su combustión espontánea debido a la presencia de carbón en los estériles y en la reacción exotérmica de oxidación de las piritas. Dados los contenidos habituales de carbón (< 5%), si los rellenos están adecuadamente compactados, y por tanto el contenido de aire es muy bajo, puede excluirse de combustión espontánea.
- Los estériles de lavadero pueden contener sulfatos, por lo que puede ser necesario utilizar cementos resistentes a ellos, cuando se emplean mezclados con cemento, así como estudiar la producción de lixiviados.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 1.1	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>ESTÉRILES DE CARBÓN</b>		

## 5. NORMATIVA TÉCNICA

- UNE 146130. “Áridos para mezclas bituminosas y tratamientos superficiales de carreteras, aeropuertos y otras áreas pavimentadas”. Diciembre, 2000.
- UNE PNE 146 131: “Áridos para mezclas con o sin ligantes hidráulicos para aplicar en trabajos de ingeniería civil y construcción de carreteras”. La norma europea correspondiente es: prEN 13242 “Aggregate for unbound and hydraulically bound materials for use in civil engineering work and road construction”. CEN Europäisches Komitee für Normung.
- Manual of Contract Documents for Highway Works (MCDH), Vol. 1, Specification for Highway Works (SHW); Series 0600 “Earthworks”, Amendment, November 2006.
- Design Manual for Roads and Bridges (DMRB), The Highways Agency, The Scottish Office Development Department, The Welsh Office, The Department of the Environment from Northern Ireland, Amendment, February 2007.
- BS 6543 British Standard guide to use of industrial by-products and waste materials in building and civil engineering, 1985.
- SETRA-LCPC, “Guide Technique pour la réalisation des terrassements et couches de forme, GTR », juillet, 2000, 2<sup>ème</sup> édition.
- NF P 11-300 : Classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d’infrastructures routières.
- NF EN 12457-2 : Déchets-Essai de lixiviation (anteriormente NF X 31-210).
- NF EN 12457 (1-2-3-4), Caractérisation des déchets. Lixiviation, décembre 2002. Esta norma ha sustituido a la XP X 31 210, Déchets. Essai de lixiviation, que fue anulada en diciembre de 2002.
- SETRA-LCPC, «Guide Technique pour la réalisation des terrassements et couches de forme », GTR, juillet 2000, 2<sup>ème</sup> edition.

## 6.- REFERENCIAS

- [1] Instituto Tecnológico y Geominero de España, “Manual de Reutilización de residuos de la industria minera, siderometalúrgica y termoeléctrica”, Madrid, 1995.
- [2] <http://ofrir.lcpc.fr>
- [3] HINOJOSA CABRERA, J.A.; GONZÁLEZ CAÑIBANO, J. “Utilización de los estériles del carbón en carreteras”, XII Congreso Mundial de la IRF, Tomo II. Madrid, mayo, 1993.
- [4] GONZÁLEZ CAÑIBANO, J.; LEINNINGER, D. “The characteristics and use of coal wastes”,

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 1.1	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>ESTÉRILES DE CARBÓN</b>		

- 2nd International Symposium on the Reclamation, Treatment and Utilization of Coal Mining Wastes, Nottingham, U.K., September, 1987.
- [5] Skarzynska, K. M., « Reuse of coal mining wastes in civil engineering- Part 1 : properties of minestone, Waste Management, Vol. 15, N° 1, pp.3-42, 1995.
- [6] Ibarzábal, J.L. y Fernández Valcarce, J.A., “Los estériles de lavadero de hulla como material para la NCB. “Utilization of Colliery Spoil in Civil Engineering”, Final Report Research Project 6220-EC/8/808 to the European Coal and Steel Community, July, 1978.
- [7] GONZÁLEZ CAÑIBANO, J. “Composición mineralógica de los estériles de hulla y antracita en España”, IX Congreso Internacional de Minería Industria Minera, mayo, 1991.
- [8] ESTERAS GONZÁLEZ, S.; JIMÉNEZ SÁEZ, R.; IBARZÁBAL OSET, J.L.; GONZÁLEZ CAÑIBANO, J.; RUIZ RUBIO, A. “Utilización de los estériles del carbón como materiales para capas de firmes. I Características y ensayos de lixiviación”, Ingeniería Civil, CEDEX, Núm. 95, 1994.
- [9] GONZÁLEZ CAÑIBANO, J.; FERNÁNDEZ VALCARCE, J.A. “Composición química de los estériles de hulla y antracita de España”, Industria Minera, Mayo, 1991.
- [10] DAC CHI, N.; “Empleo de los desechos de minas de carbón y escorias metalúrgicas en Europa”, Carreteras, Núm. 69, 71-76. 1994.
- [11] GONZÁLEZ CAÑIBANO, J.; GARCÍA, M.; FERNÁNDEZ, J.M.. “Utilización de los estériles del carbón en la construcción de firmes de carreteras”, VII Congreso Internacional de Minería y Metalurgia. Barcelona, 1994.
- [12] KETTEL, R.J.; RAINBOW, AKM..”the stabilization of Colliery spoil”, Symposium on the utilization of waste from Coal Mining and Preparation.Vol. III. Tatábanya, Hungary, 17-23 October (1993).
- [13] GONZÁLEZ CAÑIBANO, J.; PÉREZ VALLE, J.J.; ESTERAS GONZÁLEZ, S.; JIMÉNEZ SÁEZ, R.; RUIZ RUBIO, A.. “Utilización de los estériles del carbón como materiales para capas de firmes. II Empleo de los estériles del carbón tratados con cemento”, Ingeniería Civil, CEDEX, Núm. 103, 1996.
- [14] GONZÁLEZ CAÑIBANO, J. “Construction of an experimental embankment using coal mining wastes”.4th International Symposium on the Reclamation, Treatment and Utilization of Coal Mining Wastes. Poland, September 1993.
- [15] GONZÁLEZ CAÑIBANO, J.; SOPEÑA, L.; “Los estériles del carbón como material para estructuras de tierra reforzada”. I Congreso Hispano-Lusoy IV Sipoisium Español sobre Carreteras y Medio Ambiente. Junio, 1998.
- [16] GONZÁLEZ, J. Y GARCÍA, M., “Utilización de los estériles negros de escombreras de carbón en la construcción de terraplenes”, Boletín de Información del Laboratorio de Carreteras y Geotecnia, núm. 165, 1984, pp. 3-13.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 1.1	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>ESTÉRILES DE CARBÓN</b>		

- [17] GONZÁLEZ, J., RODRÍGUEZ, J.M., HINOJOSA, J.A., FALCÓN, A. IBARZÁBAL, J.L. Y FERNÁNDEZ, J.A., “Los estériles de lavadero de hulla como material para la construcción de terraplenes”, Canteras, Noviembre 1990, pp.63-69.
- [18] CELEMÍN, M., MARTÍNEZ, A. Y SÁNCHEZ-ALCITURRI, J.M., “Problemática del uso de los estériles de relavado en la autovía del Noroeste”, Actas del IV Simposio Español sobre Carreteras y Medio Ambiente, Asociación Técnica de la Carretera, 1998, pp. 777-783.
- [19] BARNETT, S.A., “Recent Case Histories using Minestone in Construction of Railway Embankments in United Kingdom”, Sym. on the Reclamation Treatment and Utilisation of Coal Mining Wastes, Durham, England, Sept. 1984, pp.14.1-14.22.
- [20] ITGE, “Manual de reutilización de residuos de la industria minera, siderometalúrgica y termoeléctrica”, Madrid, 1995.
- [21] ITGE, “Inventario Nacional de Balsas y Escombreras”, Ministerio de Industria y Energía. 1989.
- [22] JIMÉNEZ, S., “Utilización de estériles de carbón en terraplenes de carreteras de la comunidad de Castilla y León”, Actas del V Congreso Nacional de Firmes, pp.197-202. 2000.
- [23] MIERSMAN, M., “Schistes: co-produits de l’industrie charbonnière”, Valorisation des déchets et sous-produits dans les travaux de génie civil, École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 1992.

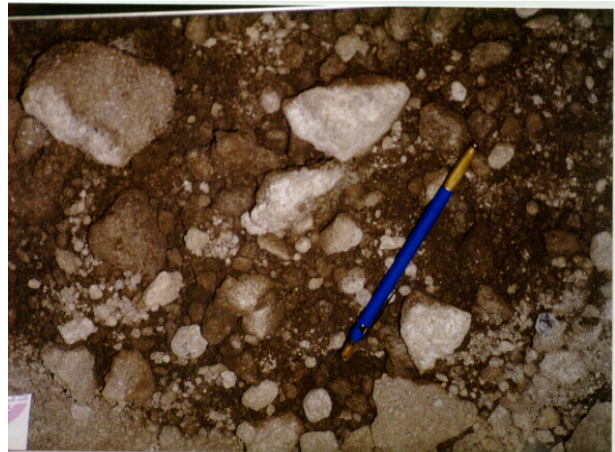
## **7.- ENTIDADES DE CONTACTO**

- Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT).  
Programa I+D OCICARBÓN  
Avda. Complutense, 22, 28040 Madrid  
Tel.: 91. 3466741/6343  
Fax.: 91.346 64 55
  
- HUNOSA  
Avda. de Galicia, nº 44  
33005 Oviedo  
Tel.: 98.510 78 32  
Fax.: 98. 523 41 09

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 2.1	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>ESCORIAS DE HORNO ALTO</b>		
Nombre en inglés: Blast Furnace Slag		



ESCORIA GRANULADA



ESCORIA CRISTALIZADA

## 1.- ORIGEN

Dentro de una fábrica de siderurgia integral, el horno alto es la instalación base para la obtención de arrabio, el cual, a su vez constituye la materia prima para la fabricación de acero. El horno alto es un horno de cuba en el que se introduce un gas reductor a presión (generalmente CO) por la parte inferior, y una carga de materia constituida por minerales de hierro, coque y fundentes por la parte superior, separándose dos productos: el hierro y las impurezas con los fundentes (escoria primaria), que van evolucionando en su composición hasta llegar a la parte baja del horno (crisol), formándose los dos productos finales: arrabio y escoria. Estos productos fluyen juntos en estado líquido, a través de un orificio situado en la parte baja del crisol denominado piqueta, a una especie de balsa, produciéndose la separación definitiva del arrabio y la escoria por diferencia de densidad.

La escoria que sale por la piqueta del horno a una temperatura cercana a los 1500 °C, puede ser sometida a distintas técnicas de enfriamiento, obteniéndose materiales con características de utilización claramente diferenciadas: escoria cristalizada, escoria vitrificada (granulada o peletizada) y escoria dilatada.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 2.1	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>ESCORIAS DE HORNO ALTO</b>		

## 2.- VOLUMEN Y DISTRIBUCIÓN

Los únicos hornos altos existentes en nuestro país se encuentran en Gijón (Asturias). El volumen total de escorias de horno alto generadas durante el año 2005 se estima en 1.283.000 t, de las cuales 614.000 t fueron granuladas y 669.000 t cristalizadas<sup>(2)</sup>.

Actualmente se está utilizando la totalidad de las escorias que se producen. En épocas en las que la demanda es alta, se utilizan los excedentes acumulados des escoria cristalizada, que alcanzan la cifra de 700.000 t.

Producción de arrabio (año 2005)	Producción total de escorias	Consumo de escorias	% Utilizado
4.187.000 t	1.283.000 t	Escorias granuladas: 614.000 t	48%
		Escorias cristalizadas: 669.000 t	52%

**Tabla 1:** Producción de escorias de horno alto

El consumo en toneladas por comunidades (año 2005) es el siguiente <sup>(3)(4)</sup>:

Asturias	Cantabria	Castilla León	Navarra	País Vasco
537.000	26.000	6.000	15.000	30.000

**Tabla 2:** Consumo de escorias de horno alto

En Asturias, aunque se han venido utilizando tradicionalmente tanto la escoria cristalizada como la granulada, la explotación industrial del residuo/materia prima secundaria no se organizó hasta 1988, año en que se creó una empresa especializada<sup>(4)</sup> que comercializa las escorias y realiza los distintos tratamientos.

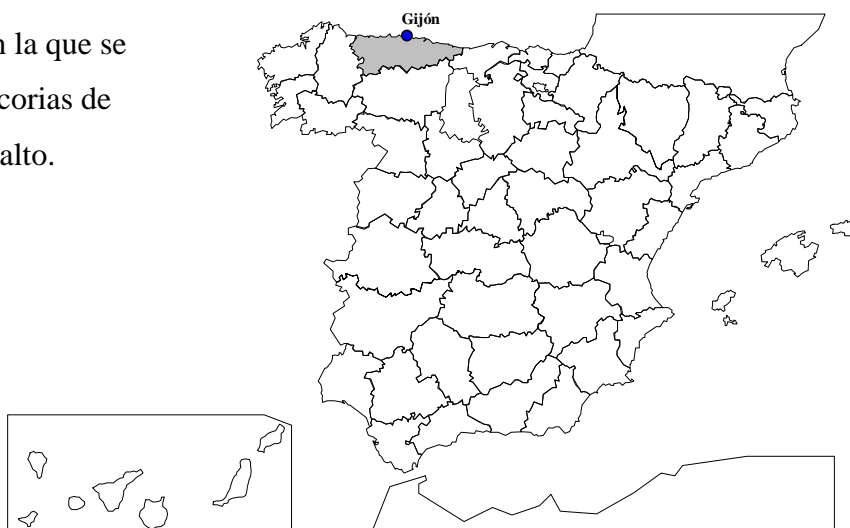
Debido al encarecimiento del producto por los costes de transporte, en algunas comunidades situadas a gran distancia del centro de producción, actualmente se están importando las escorias.

En el año 2007 entrarán en funcionamiento 2 sistemas granuladores tipo INBA (Tecnología Paul Wurth) con cual la relación entre escoria granulada y cristalizada producida en los Hornos Altos de Gijón será la siguiente: 95 % (granulada) - 5% (cristalizada).



**ESCORIAS DE HORNO ALTO****LEYENDA**

- Provincia en la que se generan escorias de horno alto.

**3.- VALORIZACIÓN****3.1.- PROPIEDADES<sup>(1)</sup>**

La composición química de la escoria fundida de horno alto depende de los minerales de hierro, de las cenizas del coque utilizado como combustible y de los óxidos de los fundentes empleados. La homogeneidad de la carga, así como la regularidad en la marcha de los hornos altos, ha contribuido a que las variaciones de la composición de la escoria sean mínimas.

Los principales componentes de la escoria son: CaO, SiO<sub>2</sub>, MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, S, FeO, MnO, K<sub>2</sub>O, siendo los índices más utilizados el Índice de Basicidad ( $I_b = \text{CaO} + \text{MgO} / \text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ ) y el Índice de Basicidad Simple ( $I_{bs} = \text{CaO} / \text{SiO}_2$ ).

Los resultados medios de análisis químicos realizados en la factoría de Gijón muestran los siguientes resultados orientativos<sup>(2)(4)</sup>:

COMPUESTO	PORCENTAJE (%)
Ca O	38 – 42
SiO <sub>2</sub>	32 – 37
MgO	7 – 9
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10 – 14
S	< 1
FeO	0,4 – 0,8
Mn O	0,2 – 0,6
TiO <sub>2</sub>	0,3 – 0,5
I <sub>b</sub>	≤ 1,2
I <sub>bs</sub>	≤ 1,3
Producción de escoria arrabio	306 kg/t de arrabio

**Tabla 3:** Composición química de las escorias de horno alto

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 2.1	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>ESCORIAS DE HORNO ALTO</b>		

### 3.2.- PROCESAMIENTO <sup>(5)</sup>

La escoria que sale por la piquera del horno a una temperatura próxima a los 1500°C, se puede enfriar siguiendo diferentes técnicas, obteniéndose materiales con características de utilización claramente diferenciadas:

- Escoria cristalizada
- Escoria vitrificada (granulada o peletizada)
- Escoria expandida

**La escoria cristalizada** se obtiene por enfriamiento lento de la escoria líquida en grandes fosos. La materia cristaliza formando distintos componentes quedando únicamente una pequeña parte de ella en estado vítreo. Una vez enfriada, la escoria se transporta mediante camiones a la planta de trituración y cribado para su preparación en las granulometrías adecuadas.

**La escoria granulada** se obtiene por enfriamiento brusco de la escoria líquida, dejándola caer sobre un potente chorro de agua fría, de forma que expanda y sirviendo el propio chorro como vehículo de transporte hasta las balsas de decantación. Este proceso se denomina granulación, porque la escoria se descompone en pequeñas partículas más o menos alveolares con aristas cortantes, obteniéndose un producto similar a una arena. La granulación vitrifica la escoria, convirtiéndola en un sólido cuyas moléculas no han tenido tiempo de orientarse al estado cristalino por la rapidez del enfriamiento.

Una vez producida la escoria granulada, para su empleo en la industria del cemento se debe secar y posteriormente moler hasta obtener una finura similar a la del cemento Portland. Las escorias se secan al llegar a fábrica en tambores rotatorios. El molido se lleva a cabo, junto con el clinker y el yeso, para la producción de cemento y de forma aislada para las escorias de adición al hormigón. Se realiza en molinos de bolas, prensas de rodillos o con un sistema combinado de molino y prensa. El molino de bolas consiste en un tambor de acero, horizontal y giratorio que contiene una carga muy importante de bolas de acero con un tamaño entre 25 y 50 mm, posteriormente, el material molido es arrastrado por una corriente de aire, cuya velocidad regulable, permite que el tamaño de las partículas extraídas sea mayor o menor.

**La escoria peletizada** se obtiene dejando caer la escoria fundida sobre un tambor giratorio, regado con agua, que lanza la escoria al aire, formando una pila al caer al suelo. Mediante los oportunos ajustes en los equipos de peletización (velocidad del tambor, relación agua/escoria, etc.) es posible controlar las proporciones producidas de los tamaños de partículas, así como su grado de vitrificación.

**La escoria expandida** se obtiene añadiendo a la escoria fundida una pequeña cantidad de agua. El vapor producido por el contacto del agua con la escoria, produce una espuma plástica que, una vez enfriada y tras un proceso de machaqueo, proporciona un árido ligero de estructura celular.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 2.1	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>ESCORIAS DE HORNO ALTO</b>		

### 3.3.- PROPIEDADES DEL MATERIAL PROCESADO <sup>(1) (5)</sup>

#### 3.3.1.- La escoria cristalizada

##### Propiedades físicas

El enfriamiento lento y controlado de la escoria fundida genera un material pétreo, la escoria cristalizada, de características similares a las rocas ígneas de origen volcánico: textura rugosa, color gris oscuro, forma predominantemente cúbica y estructura con abundantes poros externos e internos. Presenta una granulometría 0/200, y una absorción de agua del orden del 6%, aunque la escoria se seca con facilidad. Este material se conoce en Asturias como “escoria de foso”.

En la tabla siguiente figuran los valores medios de algunas características físicas de dos fracciones de muestras de escoria cristalizada de los hornos altos de la factoría de Gijón<sup>(4)</sup>.

	Fracción 0-40	Fracción 0-50
Densidad aparente (kg/dm <sup>3</sup> )	2,38	2,32
Densidad real (kg/dm <sup>3</sup> )	2,63	2,60
Absorción (%)	3,70	4,20
Peso específico real (<80µm)	2,98	2,94
Porosidad aparente (%)	8,80	9,80
Porosidad real (%)	20,4	20,80

**Tabla 4:** Propiedades físicas de la escoria cristalizada

La gran porosidad del material favorece el drenaje y la reactividad química, reduciendo la sensibilidad a la helada y la resistencia mecánica.

La textura rugosa le proporciona un gran rozamiento interno y una capacidad de soporte elevado, pero perjudica su trabajabilidad.

Otras propiedades físicas interesantes de este material son su baja conductividad térmica y su insensibilidad al agua.

##### Propiedades químicas

Como puede apreciarse de la composición química que figura en el apartado 3.1, hay cuatro óxidos principales –cal, sílice, alúmina y magnesia– que constituyen más del 95%. La composición química de la escoria procedente de un determinado horno alto es bastante constante en el tiempo, como consecuencia de la exigencia de que las distintas coladas proporcionen una fundición homogénea.

La escoria cristalizada puede tener una cierta capacidad de autofraguado debida a la pequeña parte de escoria que no cristaliza y queda en estado vítreo.

Existe la denominada inestabilidad debida al disilicato de calcio que corresponde al cambio de fase entre la forma metaestable “beta” y la forma “gamma”. Este cambio de fase viene acompañado de un aumento de volumen del orden del diez por ciento. El disilicato de calcio no se forma en cantidades significativas si la relación entre CaO y MgO a SiO<sub>2</sub> permanece por debajo de ciertos límites<sup>(6)</sup>.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 2.1	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>ESCORIAS DE HORNO ALTO</b>		

Otro tipo de inestabilidad es la debida a la reacción de los compuestos de hierro.

En la tabla siguiente figuran datos sobre los contenidos de azufre, sulfatos y óxido de hierro de la escoria que se produce en nuestro país<sup>(4)</sup>:

	Fracción 0-40	Fracción 0-50
Azufre total (expresado en S)	1,16%	1,02%
Sulfatos (expresado en S)	0,62%	0,59%
Óxido de hierro (FeO)	0,40%	0,38%

**Tabla 5:** Propiedades químicas de la escoria cristalizada

### **Propiedades mecánicas**

La escoria cristalizada es un material no plástico, no susceptible a la helada y con un buen comportamiento drenante. Se extiende y compacta fácilmente y tiene una densidad de compactación frecuentemente inferior a la de los materiales convencionales para terraplén. Es adecuada para su empleo en la estabilización de suelos húmedos y blandos en las primeras etapas de la construcción del terraplén. Las placas de carga efectuadas sobre este material dan valores superiores a 1.000 kg/cm<sup>2</sup>.

La resistencia mecánica de la escoria cristalizada varía notablemente en relación directa con su porosidad, que es función del método de apagado empleado.

A continuación se presentan los datos sobre algunas propiedades mecánicas típicas de las escorias cristalizadas de los altos hornos de Gijón<sup>(4)</sup> y algunos datos obtenidos de bibliografía norteamericana<sup>(7) (8)</sup>.

Propiedades	Datos españoles		Datos americanos
	Fracción 0-40	Fracción 0-50	
Desgaste Los Ángeles	42%	39%	35-45%
Estabilidad frente al sulfato sódico	-	-	12%
Ángulo de rozamiento interno	45°	45°	40°-45°
Dureza (escala de Moh's)	-	-	5-6
CBR	56	133	>250

**Tabla 6:** Propiedades mecánicas de la escoria cristalizada

### **3.3.2.- La escoria granulada**

#### **Propiedades físicas**<sup>(7) (8)</sup>

La escoria granulada se presenta como una arena 0/6 mm, con un tamaño medio del grano de 1 mm cuando se granula en cubeta. La cantidad de finos (tamaños inferiores a 80 µm) que presenta es pequeña, del orden del 5 al 10%, aunque en el caso de escorias muy activas este porcentaje puede aumentar durante los procesos de manipulación.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 2.1	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>ESCORIAS DE HORNO ALTO</b>		

La fracción superior a 5 mm se caracteriza por la presencia de elementos inertes de color oscuro y gran dureza, que no están vitrificados sino cristalizados.

La densidad aparente de la escoria granulada es muy variable, entre 0,5 y 1,5 t/m<sup>3</sup>, y su peso específico es aproximadamente 2,86.

La densidad de la escoria granulada está en cierto modo ligada a su actividad, de manera que las escorias más activas presentan densidades más bajas, mientras que las escorias más densas son también las menos activas.

La escoria granulada presenta un ángulo de rozamiento interno de 60°. Es alveolar y friable. La friabilidad se mide por la cantidad de finos producidos en un ensayo de molienda normalizado. Esta propiedad interviene directamente en la determinación del coeficiente de reactividad ( $\alpha$ ) y en la reactividad de la escoria, es decir, en su velocidad de fraguado.

El contenido de agua varía del 5 al 25% e incluso más para las escorias granuladas más activas.

Una vez molidas, las escorias presentan una finura Blaine de 400 a 500 m<sup>2</sup>/kg cuando van a ser utilizadas para la fabricación de cemento, y un tamaño máximo de 0,2 mm si se van a emplear en hormigón.

En el año 2004 se realizó un convenio con el CEDEX (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas) para el desarrollo de un cemento para carreteras con escoria granulada molida (conglomerante hidráulico "Asturcón").

### **Propiedades químicas**

La composición química de la escoria granulada es idéntica a la de la escoria cristalizada, al obtenerse la escoria granulada por enfriamiento brusco de la misma escoria líquida con agua a presión. En este caso los iones no tienen tiempo de ordenarse según una red cristalina y solidifican en estado vítreo. En su aspecto exterior esto se manifiesta por la angulosidad y friabilidad de la superficie de las partículas.

La escoria granulada, al conservar su calor de cristalización, tiene una gran riqueza energética y una hidraulicidad latente que permite formar, en contacto con el agua, una serie de productos hidratados que cristalizan dando origen a un cuerpo sólido y estable frente a la acción del agua. La reacción es mucho más lenta que en el caso del cemento, existiendo tres vías para acelerarla: utilización de activantes químicos, aumento de la superficie específica y aumento de la temperatura. De las dos primeras posibilidades (la tercera solo es factible en elementos prefabricados), la más utilizada es la primera y en especial la activación básica, que consiste en la utilización de elementos que aumentan el pH de la fase acuosa por encima de 12, con lo que se acelera la disolución de componentes. Los activantes básicos más utilizados son el cemento y sobre todo la cal.

#### **3.3.3.- La escoria peletizada <sup>(9)</sup>**

A diferencia de la escoria cristalizada y expandida, la escoria peletizada tiene una forma redondeada y textura lisa, siendo su porosidad y capacidad de absorción de agua mucho más bajas que las de ellas.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 2.1	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>ESCORIAS DE HORNO ALTO</b>		

El tamaño de los granos puede estar comprendido entre 13 y 0,1 mm, siendo más habituales los valores comprendidos entre 9,5 mm y 1 mm. La densidad aparente, o de conjunto, del material es aproximadamente 0,85 t/m<sup>3</sup>.

### 3.3.4.- La escoria expandida<sup>(9)</sup>

Los granos de escoria expandida machacados, son angulares, sensiblemente cúbicos, más rugosos y porosos, y menos densos que los de la escoria cristalizada.

La densidad aparente, o de conjunto, de este tipo de escoria es aproximadamente el 70% de la densidad de la escorias cristalizada, tomando valores comprendidos entre 0,80-1,04 t/m<sup>3</sup>

## 3.4.- APLICACIONES

### 3.4.1.- Obras de tierra y terraplenes<sup>(20)</sup>

#### Escoria cristalizada

Los criterios a tener en cuenta para la utilización de las escorias de horno alto en obras de tierra son los mismos que los de aplicación para materiales convencionales. Para su valorización en terraplenes puede ser necesario, en algún caso, un machaqueo primario. En cuanto a la compactación de las escorias cristalizadas, no se han encontrado ninguna prevención específica, pudiéndose utilizar los equipos convencionales de compactación.

Es conveniente estudiar previamente si existe riesgo con los lixiviados y adoptar las medidas necesarias para que no se produzcan acumulaciones de agua dentro o en contacto con las escorias, siendo muy recomendable disponer de un buen sistema de drenaje.

No obstante, hay que señalar que las escorias de horno alto resultarían desaprovechadas de ser utilizadas en terraplén, dadas sus excelentes propiedades mecánicas que las hacen más apropiadas para usos en firmes, previo tratamiento mecánico. En el Reino Unido las escorias cristalizadas son clasificadas como relleno granular seleccionado.

### 3.4.2.- Carreteras

#### Escoria cristalizada<sup>(5)</sup>

La escoria cristalizada de horno alto es un material que puede utilizarse como árido artificial en la construcción de carreteras. En países como Estados Unidos se emplea ampliamente en este campo en bases granulares y mezclas asfálticas en caliente<sup>(7)</sup>.

La principal ventaja de la utilización de estas escorias se deriva de la gran cantidad de poros internos que poseen, que las confieren una gran permeabilidad, por lo que es un material muy adecuado para la construcción de **capas granulares de subbase o drenantes**.

Su principal desventaja es su baja resistencia a la fragmentación que hace que se tienda a no utilizarlas en capas que reciban fuertes solicitaciones del tráfico, prefiriéndose su empleo en **capas inferiores del firme**. En ciertas ocasiones, dependiendo de la especial composición química de la escoria, pueden producirse fenómenos de descomposición, falta de durabilidad y de

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 2.1	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>ESCORIAS DE HORNO ALTO</b>		

expansión que lleguen a arruinar las obras. Por esta razón, en países como Bélgica, Francia o el Reino Unido, y en la nueva normativa europea sobre áridos para carreteras, se han impuesto especificaciones adicionales que tienen en cuenta la composición química de la escoria, principalmente los contenidos en CaO, MgO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y S(total), y las inestabilidades debidas a la presencia de hierro.

En su aplicación en **capas tratadas** con conglomerantes, presenta ventajas frente a los materiales de cantera o gravera utilizados en granulometría densa, en los que cualquier exceso de agua de amasado puede originar acolchamientos en la compactación. Un ejemplo de esta utilización es el material “**todo escoria**”, en el que se emplea la escoria cristalizada machacada como árido-de granulometría continua y densa- y la escoria granulada como conglomerante. Este material se fabrica, pone en obra, compacta y termina en forma análoga a la grava-cemento, siendo sus campos de aplicación en carreteras en bases y subbases, arcenes y refuerzos de firmes<sup>(1) (5) (10) (11)</sup>.

### **Escoria granulada** <sup>(5) (7) (12) (13)</sup>

En carreteras, la utilización más importante de la escoria granulada es en la fabricación del material “**grava-escoria**”, recogido en el artículo nº 515 del “Pliego de Prescripciones Técnicas Generales por Obras de Carreteras y Puentes” (PG 3). Consiste en una mezcla homogénea de materiales granulares (áridos), 15 a 20% de escoria granulada de horno alto (conglomerante), catalizador de fraguado (normalmente cal) y agua, que convenientemente compactada, se puede utilizar en la construcción de firmes de carreteras. Este material tiene una resistencia inicial baja y crece después de forma continua con el tiempo, consiguiendo valores a los 90 días, parecidos a los que se obtienen con la grava-cemento a los 7 días, y estabilizándose, en un crecimiento ya muy lento, al cabo del año. La aplicación fundamental de este material es como capa de base para todo tipo de tráfico.

La grava-escoria es un material muy utilizado en Europa, especialmente en Francia, por las ventajas técnicas, económicas y ecológicas que su empleo representa y la experiencia existente es superior a 20 años.

A pesar de sus ventajas, las capas de grava-escoria han sido poco utilizadas en España, entre otras razones porque la producción de escoria ha estado localizada únicamente en tres zonas (Sagunto, Vizcaya y Asturias), y actualmente sólo en Asturias, concentrándose su consumo principalmente en la zona norte del país.

### **3.4.3.- Edificación y obra pública.**

#### **Escoria cristalizada**

##### *Árido para hormigón*

La escoria cristalizada se puede emplear como árido tanto para mortero como para hormigón.

Para su uso en mortero, además de cumplir las especificaciones generales que se establecen para los áridos naturales, se debe prestar atención a la pérdida por calcinación y sustancias solubles en agua.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 2.1	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>ESCORIAS DE HORNO ALTO</b>		

Tanto para mortero como para hormigón se ha de comprobar que las escorias cristalizadas carecen de compuestos que afecten a la estabilidad de volumen.

La Instrucción de Hormigón Estructural, EHE, permite la utilización de escorias siderúrgicas apropiadas, y dentro de éstas se pueden incluir las escorias siderúrgicas enfriadas por aire según UNE-EN 12620, siempre y cuando se compruebe previamente que son estables, es decir, que no contienen silicatos inestables ni compuestos ferrosos.

En otros países existen normas específicas para la utilización de escorias cristalizadas como árido para hormigón, como la norma inglesa BS 1047 que recoge los requisitos que deben cumplir estas escorias para ser empleadas como árido grueso. Estas normas, además de exigir la estabilidad de las escorias, establecen otros requisitos como la granulometría, el contenido máximo de sulfatos, absorción y la densidad de conjunto. Según esta norma se deben realizar algunos ajustes en la dosificación del hormigón para conseguir una permeabilidad de valores similares a los que se obtienen cuando se utiliza árido natural rodado.

### **Escoria granulada**

#### **Fabricación de cemento**

Una de las aplicaciones más extendidas de la escoria granulada es la fabricación de cemento. Según la norma UNE-EN 197-1<sup>(14)</sup>, las escorias de horno alto deben cumplir las siguientes condiciones:

- Deben estar constituidas, al menos en dos tercios de su masa, por fase vítrea.
- Así mismo deben estar compuestas, al menos en dos tercios de su masa, por CaO, MgO y SiO<sub>2</sub>. El resto debe estar formado por compuestos de óxido aluminico (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) y pequeñas cantidades de otros óxidos.
- La relación (CaO% + MgO%) / SiO<sub>2</sub>% debe ser mayor que 1.

En España estos cementos se clasifican, en función del contenido de escoria en<sup>(15)</sup>:



<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 2.1	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>ESCORIAS DE HORNO ALTO</b>		

Tipo de cemento	Denominación	Contenido de escorias de horno alto
Cemento Portland con escoria	CEM II/A-S	6 a 20%
	CEM II/B-S	21 a 35%
Cemento Portland mixto	CEM II/A-M	6 a 20% <sup>(*)</sup>
	CEM II/B-M	21 a 35% <sup>(*)</sup>
Cemento con escorias de horno alto	CEM III/A	36 a 65%
	CEM III/B	66 a 80%
	CEM III/C	81 a 95%
Cemento compuesto	CEM V/A	18 a 30%
	CEM V/B	31 a 50%
Cementos para usos especiales	ESP VI-1	45 a 75% <sup>(**)</sup>

<sup>(\*)</sup> Contenido total de escoria, humo de sílice, puzolana, cenizas volantes, esquistos calcinados y caliza.

<sup>(\*\*)</sup> Contenido total de escoria, puzolana y cenizas volantes.

**Tabla 7:** Tipos de cementos con escorias

El cemento Portland con escoria (CEM II) son adecuados para hormigones en masa o armados, incluido en grandes volúmenes. Están recomendados para cimentaciones, obras portuarias y marítimas y tubos de hormigón, canales y otras aplicaciones hidráulicas. En cambio está prohibida su utilización en hormigón pretensado. El cemento CEM II/B-S es muy adecuado para su utilización con áridos potencialmente reactivos (se recomienda que tengan bajo contenido en alcalinos) y adecuado CEM II/B-M.

Los cementos de horno alto (CEM III) se pueden utilizar en hormigón en masa y armado, excepto el CEM III/C, siendo muy adecuados CEM III/B y adecuados CEM III/A para grandes volúmenes. El hormigón en masa se puede utilizar en obras portuarias y marítimas, además de tubos hormigón, canales y otras aplicaciones hidráulicas. El hormigón armado tiene las mismas usos del hormigón en masa, además de ser adecuado en cimentaciones (excepto el CEM III/B). Es muy adecuado para hormigones con áridos potencialmente reactivos (se recomienda que tengan bajo contenido en alcalinos).

El cemento compuesto (CEM V) es recomendable para hormigón en masa y armado, excluyendo el cemento CEM V/B que no es recomendado para hormigón armado. El cemento CEM V/A es adecuado para para grandes volúmenes. Es recomendado para presas de hormigón compactado.

La utilización de los cementos que incorporan escorias de alto horno en hormigón estructural se regula según la Instrucción EHE.

#### *Adición al hormigón*

Las escorias granuladas molidas de horno alto no están permitidas como adición al hormigón por la EHE<sup>(16)</sup>, aunque existen una serie de normas UNE experimentales sobre las recomendaciones de uso de las escorias granuladas utilizadas en hormigones y morteros fabricados con cemento portland tipo I.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: <b>2.1</b>	Mes: <b>DICIEMBRE</b> Año: <b>2007</b>
<b>ESCORIAS DE HORNO ALTO</b>		

La cantidad de escoria molida que se puede adicionar al hormigón suele expresarse según<sup>(17)</sup>:

$$P_s = 100 \times \frac{S}{S + C}$$

donde:

$P_s$  es el porcentaje de escoria molida añadida como adición al hormigón.

$S$  es el contenido de escoria molida en  $\text{kg/m}^3$ .

$C$  es el contenido de cemento en  $\text{kg/m}^3$ .

Los porcentajes máximos de escorias molidas a añadir según el tipo de hormigón o mortero son<sup>(17)</sup>:

- Hormigón en masa: 70%
- Hormigón armado: 50%
- Mortero: 70%

Las principales especificaciones que deben cumplir las escorias como adición al hormigón se resumen en la siguiente tabla<sup>(18)</sup>:

<b>Características físicas</b>			
Humedad		Norma UNE 83488	$\leq 2\%$
Finura	F1	Norma UNE 83496 EX	$\geq 200\mu\text{m} \rightarrow 0\%$ $\geq 90\mu\text{m} \rightarrow \leq 10\%$ $\geq 45\mu\text{m} \rightarrow \leq 30\%$
	F2		$\geq 90\mu\text{m} \rightarrow 0\%$ $\geq 63\mu\text{m} \rightarrow \leq 5\%$ $\geq 45\mu\text{m} \rightarrow \leq 20\%$
Índice de actividad resistente <sup>(*)</sup>		Norma UNE 83485 EX	$\geq 70\%$
Límites para el principio y final de fraguado <sup>(**)</sup>	Principio de fraguado	Norma UNE 83488 EX	$\geq 60 \text{ min.}$
	Final de fraguado		$\leq 12 \text{ h.}$
Estabilidad al volumen <sup>(***)</sup>		Norma UNE 83487 EX	$\leq 10 \text{ mm.}$

(\*) Este índice se basa en la comparación de la resistencia a compresión alcanzada a los 28 días por un mortero de control y otro mortero de ensayo con el mismo tipo de cemento, pero en el que el 50% del mismo es sustituido por la escoria molida que se quiere ensayar.

(\*\*) Ensayo realizado con una mezcla seca de escoria (50% en peso) y cemento portland tipo I (50% en peso).

(\*\*\*) Ensayo realizado con una mezcla de escoria (50% en peso) y cemento portland tipo I (50% en peso).

**Tabla 8:** Especificaciones físicas que debe cumplir la escoria granulada para su incorporación al cemento

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 2.1	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>ESCORIAS DE HORNO ALTO</b>		

<b>Características químicas (expresadas en tanto por ciento en masa y referidas a la muestra seca)</b>		
Pérdida por calcinación	Norma UNE 83489	≤ 3
Trióxido de azufre (SO <sub>3</sub> )	Norma UNE 83490	≤ 4
Sulfuros (S <sup>=</sup> )	Norma UNE 83491	≤ 2
Cloruros (CL <sup>-</sup> )	Norma UNE 83492	≤ 0,1
Óxido de magnesio (MgO)	Norma UNE 83496	≤ 14
Óxido de manganeso (MnO)	Norma UNE 83497	≤ 4
Masa compuesta por (CaO+MgO+SiO <sub>2</sub> )		≥2/3
Relación de los contenidos en porcentaje de calcio, magnesio y silicio, expresados como óxidos(CaO+MgO)/SiO <sub>2</sub>		> 1
Producto de los contenidos en porcentaje de calcio y aluminio, expresados como óxidos		≥325
El índice de actividad hidráulica <sup>(*)</sup>	Norma UNE 83498 EX	Método de referencia ≥8 N/mm <sup>2</sup>
		Método acelerado ≥4 N/mm <sup>2</sup>

(\*) La actividad hidráulica se obtiene midiendo la resistencia a compresión alcanzada por un mortero de escoria molida tras haber acelerado los procesos de fraguado y endurecimiento.

**Tabla 9:** Especificaciones químicas que debe cumplir la escoria granulada para su incorporación al cemento

Como regla general, el uso de escorias molidas como adición al hormigón, mejora la trabajabilidad y condiciones de puesta en obra respecto al hormigón que no las incorpora, permitiendo una mejor compactación. Así mismo, se incrementa el plazo de trabajabilidad de la mezcla al aumentar el tiempo de principio de fraguado, aproximadamente 1,5 horas.

Además, la adición de escorias mejora la resistencia de los hormigones frente a los ataques causados por agentes y medios agresivos externos (sulfatos, cloruros, carbonatación, etc.).

Las resistencias mecánicas de estos hormigones y morteros, tanto a compresión simple como a flexión, pueden tener un amplio rango de variación que dependerá, entre otros factores, de la categoría resistente del cemento utilizado, del porcentaje de escoria molida, de la relación agua/(cemento+escoria molida), de las condiciones de curado y de las condiciones medioambientales. La contribución de las escorias molidas como adición al hormigón a la resistencia mecánica de éste, es pequeña a las primeras edades, aumentando significativamente con la edad.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 2.1	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>ESCORIAS DE HORNO ALTO</b>		

### 3.5.- OBRAS REALIZADAS

#### 3.5.1.- Obras de tierra y terraplenes.

En el Principado de Asturias se han utilizado escorias cristalizadas en la construcción de terraplenes sobre suelos blandos, por sus buenas propiedades mecánicas.

#### 3.5.2.- Carreteras

En España la grava-escoria se ha utilizado fundamentalmente en Asturias y en el País Vasco; también se han realizado algunas obras en Cantabria y en León.

Prácticamente todas las obras de carreteras que se realizan en la zona central de Asturias utilizan escorias en las capas de firmes. Las obras más importantes en las que se ha utilizado grava escoria como base de carretas son:

- San Miguel-Marcenado (1991)
- Variante de Avilés (1991)
- Accesos a Mieres (1992)
- Dupont (1992)
- La Vegona-Vegarrozadas(1992)
- Cueto-Latores (1999)
- Parque Principado (1999-2000)
- Autovía minera (2003)
- Variante de Antromero (2005)
- A-8 Tamón (Villalegre) (2005)
- Explanada de Aboño (2005)
- Desdoblamiento AS-17 AS-18 (Oviedo – Gijón) – 2006
- Carretera Luanco – Candás (2006)

#### 3.5.3.- Edificación y obra pública

A continuación se enumeran algunas de las obras que se han realizado en nuestro país en las que se han empleado cementos con escorias granuladas<sup>(19)</sup>:

- Ampliación de Puerto de Bilbao, donde se utilizaron unas 90.000 t de CEM III-B con una dosificación de 300 kg/m<sup>3</sup>.
- Obras de saneamiento y abastecimiento del Consorcio de Aguas de Bilbao, para las que se emplearon 24.000 t de cemento tipo CEM III-A.
- Recrecimiento del Canal de Lodosa (puesta en obra de 60.000 t de hormigón con un contenido de cemento de 300 kg/m<sup>3</sup>).
- Cimentaciones en La Ribera del Ebro en Navarra y La Toja.
- Canales de riego en Los Monegros, (Zaragoza-Huesca).
- Presa de Laboteta en Gayur (Zaragoza).
- Obras de pavimentación y ampliación del Puerto de Pasajes.

## 4.- CONSIDERACIONES MEDIOAMBIENTALES

La Ley 10/1998, de Residuos, de 21 de abril, establecía en su artículo 3 que tendrían consideración de residuos todos aquellos que figurasen en el Catálogo Europeo de Residuos

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 2.1	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>ESCORIAS DE HORNO ALTO</b>		

(CER). Este Catálogo fue aprobado por la Decisión 94/3/CE de 20 de diciembre de 1993, y complementado con la Decisión 94/904/CE, ambas aprobadas en el Real Decreto 952/1997.

Las Decisiones Comunitarias 94/3/CE y 94/904/CE han sido derogadas por la Decisión 2000/532/CE mediante la que se aprueba La Lista Europea de Residuos. La orden MAM/304/2002 de 8 de febrero (con corrección de errores de 12 de marzo), publica en su Anejo 2 la mencionada Lista Europea de Residuos.

Las escorias de horno alto vienen incluidas en la Lista Europea de Residuos en el Capítulo 10 correspondiente a "Residuos de procesos térmicos" con el siguiente código:

- 19 02 01 Residuos del tratamiento de escorias, y están caracterizadas como residuos no peligrosos.
- 19 02 02 Escorias no tratadas, y están caracterizadas como residuos no peligrosos.

### **Ventajas**

- Disminución parcial o total del volumen de residuos existentes en las escombreras, liberando el terreno ocupado por los acopios para otros usos.
- La valorización de residuos y materias primas secundarias mediante su empleo en la construcción contribuye a la conservación de los recursos naturales.
- Ahorro energético y reducción de las emisiones a la atmósfera generadas en el proceso de fabricación del cemento.
- Disminución de las materias primas utilizadas para la fabricación de cemento.
- Obtención de cementos y hormigones de características mejoradas para determinadas aplicaciones.
- Disminución de las emisiones de gases con efecto invernadero (CO<sub>2</sub>) : La utilización de escoria de Horno Alto granulada para la fabricación de cemento puede reducir hasta 700 kg CO<sub>2</sub> por tonelada de cemento fabricado (potencial reducción de 800.000 t CO<sub>2</sub>/año desde el año 2007 por el uso de las escorias granuladas producidas en España).

### **Inconvenientes**

- Desde el punto de vista medioambiental, se ha estudiado la posibilidad de contaminación producida por las aguas de escorrentía que atraviesen acopios o capas granulares de escoria. Los resultados obtenidos arrojan un resultado favorable para el material, pues únicamente se ha observado una ligera alcalinización de la aguas fácilmente neutralizada por la acción del CO<sub>2</sub> del aire y la acidez de las lluvias<sup>(8)</sup>.
- El consumo de energía en el procesado de la escoria para su utilización en el cemento y el hormigón es bastante elevado ya que es un material que debe molerse muy finamente.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 2.1	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>ESCORIAS DE HORNO ALTO</b>		

## 5.- ASPECTOS ECONÓMICOS

Aunque el precio de las escorias puede ser muy variable, según algunas bases de datos de precios de la construcción, en el año 2007 éste osciló entre 70-90 euros/tonelada <sup>(21)</sup>.

A continuación se muestran algunos precios de los cementos en los que se utilizan escorias granuladas, junto con el precio del cemento común sin adiciones CEM I del año 2007<sup>(21)</sup>.

Tipo de cemento	Denominación	Contenido de escorias granuladas de horno alto	Precio euro/t
Cemento Pórtland común	<b>CEM I</b>	<b>0%</b>	<b>104,05</b>
Cemento Portland con escoria	CEM II/A-S	6 a 20%	100,31
	CEM II/B-S	21 a 35%	-
Cemento de horno alto	CEM III/A	36 a 65%	116,36
	CEM III/B	66 a 80%	116,36
	CEM III/C	81a 95%	-

**Tabla 10:** Precios de distintos cementos que incorporan escorias granuladas

## 6.- NORMATIVA TÉCNICA

### 6.1.- CARRETERAS

- AFNOR. "Norme Française P18-302"
- BSI. "British Standard Specification for Air-Cooled Blastfurnace Slag Aggregate for Use in Construction", BS 1047:1983, British Standards Institution, 1983.
- MOPU. "Pliego de Prescripciones Técnicas generales para obras de carreteras y puentes (PG 3). Artículo nº 515: Grava-escoria". 1975.
- NLT-309/89. "Evaluación de la actividad de una escoria granulada de horno alto".
- UNE-EN 13242/AC:2004 Áridos para capas granulares y capas tratadas con conglomerados hidráulicos para uso en capas estructurales de firmes
- UNE-EN 13242:2003 Áridos para capas granulares y capas tratadas con conglomerados hidráulicos para uso en capas estructurales de firmes.
- UNE-EN 13043/AC:2004 Áridos para mezclas bituminosas y tratamientos superficiales de carreteras, aeropuertos y otras zonas pavimentadas.
- UNE-EN 13043:2003 Áridos para mezclas bituminosas y tratamientos superficiales de carreteras, aeropuertos y otras zonas pavimentadas
- EN 1744-4:2005 Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos. Parte 4: Determinación de la susceptibilidad al agua de los fillers para mezclas bituminosas

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 2.1	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>ESCORIAS DE HORNO ALTO</b>		

- UNE-EN 1744-1:1999 Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos. Parte 1: Análisis químico
- Design Manual for Roads and Bridges, The Highways Agency, The Scottish Office Development Department, The Welsh Office, The Department of the Environment from Northern Ireland, Amendment, February 2007.
- Manual of Contract Document for Highway Work, Specification for Highway Works, Series 0600 "earthworks", November 2006

## **6.2.- EDIFICACIÓN Y OBRA PÚBLICA**

Existen una serie de normas UNE sobre las especificaciones que deben cumplir las escorias para la fabricación de cementos y recomendaciones de uso de los distintos tipos de cementos. Las prescripciones que han de cumplir los cementos con escorias granuladas de horno alto están especificadas en la "Instrucción para la recepción de cementos, RC-08".

El uso de las escorias granuladas de horno alto molidas por separado y añadidas directamente al hormigón está regulada por una serie de normas UNE experimentales que recogen las recomendaciones de uso de las escorias granuladas utilizadas en hormigones y morteros fabricados con cemento portland tipo I.

Su utilización en hormigón estructural se regula según la Instrucción EHE, en la que no se permite la adición de escorias granuladas al hormigón y se acepta la utilización de los cementos estipulados en la RC-08 para hormigón en masa o armado.

### **NORMATIVA PARA CEMENTOS CON ESCORIAS GRANULADAS DE HORNO ALTO**

- Ministerio de Fomento. "Instrucción para la recepción de cementos (RC-08)". 2008.
- UNE 80300 IN: 2000. "Cementos: Recomendaciones para el uso de los cementos".
- UNE-EN 197-1:2000. "Cemento. Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes".
- UNE 80303-1:2001/1M: 2006. "Cementos con características adicionales. Parte 1: Cementos resistentes a los sulfatos".
- EN 15167-1 Escorias granuladas molidas de alto horno para su uso en hormigón, mortero y lechadas. Parte 1: Definiciones, especificaciones y criterios de conformidad.
- EN 15167-2 Escorias granuladas molidas de alto horno para su uso en hormigón, mortero y lechadas. Parte 2: Evaluación de la conformidad.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 2.1	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>ESCORIAS DE HORNO ALTO</b>		

**NORMAS UNE EXPERIMENTALES SOBRE HORMIGONES CON ADICIÓN DE ESCORIAS GRANULADAS MOLIDAS DE HORNO ALTO**

- UNE 83480 EX. "Adiciones al hormigón. Escorias granuladas de horno alto. Definición, especificaciones, transporte y almacenamiento de las escorias molidas utilizadas en los hormigones y morteros fabricados con cemento portland Tipo I". 1996.
- UNE 83481 EX. "Adiciones al hormigón. Escorias granuladas de horno alto. Recomendaciones de uso para las escorias granuladas molidas utilizadas en los hormigones y morteros fabricados con cemento portland tipo I". 1996.

**NORMATIVA DE ÁRIDOS PARA MORTERO Y HORMIGÓN**

- Ministerio de Fomento. "Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08)". 2008.
- UNE-EN 13139:2003/AC: 2004. "Áridos para morteros".
- UNE-EN 12620:2003/AC: 2004 "Áridos para hormigón".
- UNE 146121:2000. "Áridos para la fabricación de hormigones. Especificaciones para los áridos utilizados en los hormigones destinados a la fabricación de elementos de hormigón estructural".
- BS 1047. "Air-cooled blastfurnace slag aggregate for use in construction". 1983.
- UNE-EN 12620/AC:2004 Áridos para hormigón.
- UNE-EN 12620:2003 Áridos para hormigón

**OTRAS NORMATIVAS**

- UNE-EN 13383-1/AC: 2004 Escolleras. Parte 1: Especificaciones.
- UNE-EN 13383-1:2003 Escolleras. Parte 1: Especificaciones.
- UNE-EN 13383-2:2003 Escollera. Parte 2: Métodos de ensayo.

**7.- REFERENCIAS**

- [1] RUIZ-CUEVAS LOPEZ-PARA, F.; IBARZABAL, J.L. "Presentación del producto escoria-escoria. Materiales básicos, fabricación, características y propiedades", Jornadas sobre Escorias Tratadas. Oviedo, noviembre, 1988.
- [2] ARCELOR ESPAÑA, S.A. Información facilitada por Arcelor España, S.A.



<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 2.1	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>ESCORIAS DE HORNO ALTO</b>		

- [3] OFICEMEN. Información facilitada por OFICEMEN.
- [4] ESCORIAS Y DERIVADOS, S.A. Información facilitada por EDERSA.
- [5] RUÍZ RUBIO, A.; VAQUERO GARCÍA, J.J. “Aplicaciones de las escorias de horno alto en la técnica de carreteras”, Revista Ingeniería Civil, CEDEX, nº 71. 1989.
- [6] AFNOR. “Norme Française P18-302”.
- [7] COLOMBIER, G. “Caracterisation de la qualité des laitiers granulés par le coefficient d’activité”, Bull. Liaison Labo P. et Ch. special Q. 1970.
- [8] PIRET, J. “Travaux effectués avec l’aide financière de la CECA durant les 10 dernières années”, Centre de Recherches Métallurgiques. 1978.
- [9] FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (FHWA). “User guidelines for waste and by-product materials in pavement construction”. 1997.
- [10] GUTIÉRREZ, M. “Presentación del producto escoria-escoria. Características y clasificación de la mezcla”, Jornadas sobre Escorias Tratadas. Oviedo, noviembre, 1988.
- [11] PÉREZ-HOLANDA, F. “Presentación del producto escoria-escoria. Fabricación y puesta en obra”, Jornadas sobre Escorias Tratadas. Oviedo, noviembre, 1988.
- [12] COMMISSION DES COMMUNAUTÉS EUROPEENNES. “Utilisation du laitier granulé en construction routière”. 1978.
- [13] OCDE. “Use of waste materials and by-products in road construction”. Paris, 1977.
- [14] UNE-EN 197-1. “Cemento. Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes”. Diciembre, 2000.
- [15] Ministerio de Fomento. “Instrucción para la recepción de cementos (RC-08)”. 2008.
- [16] Ministerio de Fomento. “Instrucción de Hormigón Estructural (EHE)”. 2000.
- [17] UNE 83481 EX. “Adiciones al hormigón. Escorias granuladas de horno alto. Recomendaciones de uso para las escorias granuladas molidas utilizadas en los hormigones y morteros fabricados con cemento portland tipo I”. 1996.
- [18] UNE 83480 EX. “Adiciones al hormigón. Escorias granuladas de horno alto. Definición, especificaciones, transporte y almacenamiento de las escorias molidas utilizadas en los hormigones y morteros fabricados con cemento portland tipo I”. 1996.
- [19] IECA. Información facilitada por IECA.
- [20] Turner-Fairbanks Highway Research Center and Federal Highway Administration. “ User Guidelines for waste and by-product materials in pavement construction” 2002

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 2.1	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>ESCORIAS DE HORNO ALTO</b>		

[21] BEDEC. Banco de precios BEDEC PR/PCT. CONSTRUMÁTICA: Arquitectura, Ingeniería y Construcción. <http://www.construmatica.com/>

### **8.- ENTIDADES DE CONTACTO**

- UNESID. (Unión de Empresas Siderúrgicas)  
c/ Castelló nº 128-3º  
28006 Madrid  
Tel. 91 5624010 - 91 5624725  
Fax 91 5626584
  
- IECA (Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones)  
c/ José Abascal nº 53-2º  
28003 Madrid  
Tel. 91 4429311  
Fax 91 4427294

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 2.2	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>ESCORIAS DE ACERÍA LD</b>		
Nombre en inglés: Basic Oxygen Furnace Slag (BOF-slag)		



ESCORIA DE ACERÍA LD

### 1.- ORIGEN<sup>(1)(2)</sup>

Las escorias de acería LD se originan en el proceso de afinado del arrabio obtenido en el alto horno, eliminándose por oxidación, en todo o en parte, las impurezas existentes.

En el procedimiento Linz-Donawitz (LD) para la transformación de la fundición de hierro procedente del horno alto en acero, el afino se lleva a cabo inyectando oxígeno a presión en el baño que contiene las materias primas y las adiciones para la formación de escoria (fundamentalmente cal, dolomía y espato). El oxígeno, se insufla mediante una lanza refrigerada hasta conseguir eliminar del arrabio el exceso de carbono y las impurezas que lo acompañan. El carbono se elimina por oxidación en forma de gas (CO y CO<sub>2</sub>) y el resto de impurezas en forma de escoria semipastosa que sobrenada por encima del acero, lo que permite separarla de este y enviarla a un foso donde se riega hasta alcanzar temperaturas inferiores a 50°C.

La escoria tiene, por tanto, como misión fundamental atrapar las impurezas, principalmente fósforo y azufre. Por cada carga de fundición se añade 75-80 kg de cal y dolomía, y se retiran de 120 a 130 kg de escoria.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: <b>2.2</b>	Mes: <b>DICIEMBRE</b> Año: <b>2007</b>
<b>ESCORIAS DE ACERÍA LD</b>		


Finalizada la operación, el acero colado es transportado para su completo afinado y ajuste de composición química y temperatura. En estas operaciones finales se añaden las ferroaleaciones (manganeso, cromo, níquel, etc.), según el acero que se quiera fabricar.

## **2.- VOLUMEN Y DISTRIBUCIÓN**

Los únicos hornos altos en nuestro país se encuentran en Gijón (Asturias) y pertenecen a ARCELOR ESPAÑA, S.A., que es también la propietaria de las dos acerías de tipo LD existentes, localizadas en Avilés y Gijón.

La producción total de escorias de acería LD durante el año 2.005 se estimó en 585.000 t, de las cuales 485.000 t corresponden a la acería LD de Avilés y 100.000 t a la de Gijón. La totalidad de la escoria procedente de la acería de Gijón después de los tratamientos de separación magnética, molienda y cribado tiene un tamaño menor de 10 mm El 85 % de la originaria de Avilés sólo sufrió tratamiento de separación magnética y no fue clasificada granulométricamente posteriormente. (Fuente: Arcelor España S.A.)

### **LEYENDA**

 Provincia con hornos altos y acerías LD.



<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: <b>2.2</b>	Mes: <b>DICIEMBRE</b> Año: <b>2007</b>
<b>ESCORIAS DE ACERÍA LD</b>		

### 3.- VALORIZACIÓN

#### 3.1.- PROPIEDADES<sup>(1y 2)</sup>

##### **Propiedades Físicas**

La escoria de acería LD es un material de tipo granular, de color gris claro en estado seco que tiene una cierta porosidad y textura rugosa. Las partículas tienen forma cúbica, con escasa presencia de lascas. Tiene una densidad aparente elevada, del orden de 3 t/m<sup>3</sup> o algo superior, consecuencia de su contenido en hierro, que se da tanto en la forma de metal libre como combinado en óxidos. La granulometría aproximada es 0/300. La absorción de agua es moderada (inferior al 3%).

##### **Propiedades Químicas**

La escoria de acería LD tiene una composición química muy diferente de la de las escorias de alto horno; en particular, contiene menos alúmina y sílice y bastante más cal, una parte de ella en forma libre; además, contiene una importante proporción de óxidos de hierro. El contenido en CaO está comprendido entre el 45 y 50%, siendo ésta, quizá, la propiedad química más importante desde el punto de vista de su utilización en la construcción de carreteras, pues hace que las escorias presenten alta higroscopicidad, lo que favorece la hidratación de la cal y su posterior expansión. Las escorias de acería contienen más hierro, tanto en su forma libre como combinada en óxidos, que las escorias de alto horno, lo que incrementa la densidad de este material. Por el contrario, el contenido de azufre total es bajo. El pH de las escorias de acería LD es alcalino.

##### **Propiedades Mecánicas**

Las escorias de acería tienen muy buena angulosidad y una elevada dureza (6-7 en la escala de Mohs), así como una elevada resistencia al corte y a la abrasión

#### 3.2.- PROCESAMIENTO<sup>(1)(2)</sup>

La escoria, que se encuentra en forma semipastosa sobrenadando por encima de acero, se separa de éste y se envía a un foso, donde se riega hasta alcanzar temperaturas inferiores a 50°C, y se transporta a la planta de procesado. Allí se separan, mediante electroimanes, las chatarras superiores a 80 mm, pasando el material restante a la instalación de machaqueo. Mediante machacadoras de mandíbulas y molinos de conos se reducen a tamaños inferiores a 50 mm. De esta escoria se elimina de nuevo el hierro mediante electroimanes y se clasifica en distintos tamaños. El procesado se completa, en su caso, con el envejecimiento de la escoria en parque, regándola con agua para conseguir hidratar los elementos inestables.

#### 3.3.- PROPIEDADES DEL MATERIAL PROCESADO<sup>(2)</sup>

##### **Composición química y mineralógica**

En la tabla 1 se presenta la composición química media de la escoria de la acería LD-III, que fue objeto de un estudio encargado por ENSIDESA al CEDEX en 1990. Estos datos

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: <b>2.2</b>	Mes: <b>DICIEMBRE</b> Año: <b>2007</b>
<b>ESCORIAS DE ACERÍA LD</b>		

corresponden al análisis medio de 1000 coladas y la variación que se encontró entre los valores puntuales no fue muy importante.

	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Fe TOTAL	MnO	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Cu	Mo	As	Cd	B
%	48,00	16,00	1,20	5,20	16,04	5,90	0,20	0,50	0,03	0,08	< 1 ppm	< 0,5 ppm	0,17

**Tabla 1:** Composición química media de la escoria de la acería LD-III

Desde el punto de vista mineralógico la escoria LD presenta en su composición diferentes fases: silicatos bi, tricálcico, la wustita —combinación de óxido de hierro, manganeso (FeO y MnO)—, ferrito bicálcico y cal, más o menos impregnada de óxidos metálicos, responsable de la presencia de cal libre.

### **Inestabilidad volumétrica**

La presencia en la escoria de cal libre, y de magnesia en menor medida, constituye un factor potencial de inestabilidad. Estos óxidos tienden a hidratarse desprendiendo calor y produciendo un hinchamiento que puede provocar la disgregación del material, evolucionando la granulometría de la escoria hacia tamaños más pequeños. Este fenómeno puede producirse en el transcurso de pocas semanas o de varios meses, según se produzca la hidratación de la cal o magnesia libre.

El procedimiento más utilizado para reducir al mínimo los fenómenos de inestabilidad volumétrica es el de envejecer la escoria en parte, machacada y en su estado final, regándola con agua natural, salada, acidulada o agua caliente para conseguir hidratar los elementos inestables. Se ha comprobado que el envejecimiento al aire sin riego de agua no ofrece garantías y que los montones deben tener una altura máxima de 1,5 – 2 m.

El contenido de la cal libre puede variar para distintas escorias entre el 1% y el 15%. Los límites por debajo de los cuales puede considerarse segura la utilización de la escoria dependen de en que se vaya a emplear. Si se utiliza en capas granulares, los límites oscilan, según los países, entre el 4% y el 7%; para aplicaciones en capas bituminosas, en las que los áridos quedan impermeabilizados por una película de betún, algunos países permiten el empleo de escoria sea cual sea el contenido de cal.

Es muy importante poder caracterizar en laboratorio las escorias de acería en relación con su posible expansión. El año 1990, el Centro de Estudios de Carreteras del CEDEX puso a punto la norma NLT-361/91, "Determinación del grado de envejecimiento en escorias de acería".

### **Propiedades físicas**

La escoria de acería LD se caracteriza por ser un árido muy limpio, pesado, anguloso, poco pulimentable y de gran dureza.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: <b>2.2</b>	Mes: <b>DICIEMBRE</b> Año: <b>2007</b>
<b>ESCORIAS DE ACERÍA LD</b>		

En la tabla 2 se resumen las características físicas de la escoria LD-III ensayada en el CEDEX, sobre las fracciones 5/10 y 10/20 suministradas por ENSIDESA, adecuadamente combinadas para obtener las granulometrías y tamaños especificados en los ensayos. Los resultados que se presentan no son de aplicación general a todas las escorias de acería, que si bien tienen en común su gran dureza pueden presentar coeficientes de pulido acelerado mucho menores.

ENSAYO	RESULTADO
Partículas con dos o más caras de fractura	100 %
Limpieza superficial	0,02 %
Resistencia al desgaste de los áridos por medio de la máquina de Los Angeles	14,6 %
Pulimento acelerado de los áridos	0,55 %
Índice de lajas	7 %
Peso específico de las partículas	3,45 t/m <sup>3</sup>
Porosidad (Aceite de parafina)	4,33 %

**Tabla 2:** Características físicas de la escoria LD-III ensayada en el CEDEX, sobre las fracciones 5/10 y 10/20

### 3.4.- APLICACIONES

Las escorias de acería LD están siendo utilizadas en nuestro país y en otros países con acerías como: Alemania, Austria, Bélgica, Canadá, Francia, Inglaterra, Japón y USA(3) a (10). En Japón, la tasa de reciclado es cercana al 100% (fuente: Nippon Slag Association)

Las aplicaciones más importantes de la escoria de acería LD son en agricultura y en obra civil como árido de calidad.

#### 3.4.1.- Obras de tierra y terraplenes

El escombros de acería LD se utiliza en la construcción de rellenos y terraplenes.

#### 3.4.2.- Carreteras <sup>(2)(3)</sup>

En la técnica de carreteras, las escorias de acerías LD se utilizan como áridos para bases y subbases granulares, mezclas bituminosas, lechadas o tratamiento superficiales.

Este material no debe emplearse en capas tratadas con conglomerantes hidráulicos o en aplicaciones donde vaya rígidamente confinado en las que pequeñas expansiones producirán deterioros importantes.

En su aplicación como árido en capas granulares, y especialmente en bases de carreteras, debe someterse el material a un proceso de envejecimiento previo, con la granulometría con la que vaya a ser empleado, de forma que el contenido de cal libre no rebase un porcentaje entre el 4% y 5%; antes de su utilización deberá controlarse la estabilidad volumétrica de la escoria mediante un ensayo de hinchamiento.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: <b>2.2</b>	Mes: <b>DICIEMBRE</b> Año: <b>2007</b>
<b>ESCORIAS DE ACERÍA LD</b>		

La aplicación más clara en la técnica de carreteras es como árido en capas de rodadura de mezclas bituminosas o tratamientos superficiales, donde no sólo saca el mayor partido a su gran dureza y alto coeficiente de pulimento acelerado, sino que el riesgo de desperfectos por expansión se reduce sensiblemente.

El proceso de dosificación en laboratorios de las mezclas bituminosas con escorias, así como su fabricación y puesta en obra, es análogo al de las mezclas convencionales. No obstante, se pueden resaltar varios aspectos que las diferencian:

- Las mezclas bituminosas fabricadas con estos áridos han demostrado que su adhesividad al ligante es buena (superior al obtenido generalmente con áridos silíceos), el coeficiente de resistencia al deslizamiento se conserva mejor que en otros áridos y la resistencia mecánica de las mezclas es superior a la obtenida con los áridos silíceos de referencia.
- El elevado peso específico de las partículas hace que la incidencia del transporte en la unidad terminada sea mayor que en las mezclas convencionales. Este problema, así como una cierta dificultad de compactación, puede reducirse en gran parte utilizando únicamente una porción de árido de acería en la granulometría final, especialmente los áridos más gruesos que son los que más contribuyen a dotar de esqueleto mineral a la mezcla y proporcionan microtextura para la mejora de la resistencia al deslizamiento en capas de rodadura.
- Debido al elevado peso específico de la escoria de acería, hay que adoptar precauciones a la hora de dosificar el porcentaje de betún en las mezclas, siendo recomendable, para poder comparar dosificaciones, referirlas a porcentaje sobre volumen de áridos.
- La mayor porosidad de las escorias respecto a los áridos convencionales hace que para conseguir unos contenidos adecuados de huecos en mezcla se deba ir a una dosificación superior de ligante que en la mezcla de referencia.

Aunque en los distintos países hay una amplia gama de planteamientos en relación con la necesidad, o no, de que la escoria que se utilice como árido en mezcla bituminosa esté envejecida, la experiencia habida en nuestro país señala su conveniencia, de acuerdo con lo indicado en el apartado 3.3.

### **3.5.- OBRAS REALIZADAS**

La escoria de acería LD, molida y clasificada, se ha utilizado como árido para mezclas bituminosas en numerosos tramos de todo tipo de carreteras en Asturias. A continuación, se citan como ejemplo algunas de ellas:

- Autopista del Huerna,
- Carretera Candás-Tabaza (AS-110),
- Grado-Avilés (AS-237),
- Cancienes-Llanera (AS-17).



<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: <b>2.2</b>	Mes: <b>DICIEMBRE</b> Año: <b>2007</b>
<b>ESCORIAS DE ACERÍA LD</b>		

El escombros de acería LD se ha utilizado como relleno en algunos tramos de carreteras en Asturias, como por ejemplo:

- Cueto-Matalablima,
- Moreda-Puerto del Musel,
- Riaño-Olloniego.

#### **4.- CONSIDERACIONES MEDIOAMBIENTALES**

##### **Generalidades**

La Ley 10/1998, de Residuos, de 21 de abril, establecía en su artículo 3 que tendrían consideración de residuos todos aquellos que figurasen en el Catálogo Europeo de Residuos (CER). Este Catálogo fue aprobado por la Decisión 94/3/CE de 20 de diciembre de 1993, y complementado con la Decisión 94/904/CE, ambas aprobadas en el Real Decreto 952/1997.

Las Decisiones Comunitarias 94/3/CE y 94/904/CE han sido derogadas por la Decisión 2000/532/CE mediante la que se aprueba La Lista Europea de Residuos. La orden MAM/304/2002 de 8 de febrero (con corrección de errores de 12 de marzo), publica en su Anejo 2 la mencionada Lista Europea de Residuos.

Las escorias LD pueden ser sometidas a distintos tratamientos para ser acondicionadas a los requerimientos de los clientes o necesidades internas, como son, por ejemplo, enfriamiento y recuperación magnética u otros tratamientos adicionales como clasificación, molienda y cribado para alcanzar las granulometrías demandas.

Las escorias LD que son sometidas a los tratamientos de enfriamiento y recuperación magnética, pero que no se reciclan internamente en las instalaciones productoras o no se procede a su comercialización, tienen la consideración en la Lista Europea de Residuos en el Capítulo 10 correspondiente a "Residuos de procesos térmicos" en el subapartado 10 02 correspondiente a "Residuos de la industria del hierro y del acero", con el siguiente código:

- 10 02 01 "Residuos del tratamiento de escorias" y están caracterizados como residuos no peligrosos.

##### **Ventajas**

- Las escorias de acerías LD están compuestas principalmente por Ca, Si, Fe, Mg y Mn junto con cantidades menores de otros elementos. No están presentes en las escorias producidas en España cantidades representativas de elementos considerados como nocivos en las legislaciones ambientales, como el arsénico, el cadmio, el cobalto y el mercurio.
- En nuestro país existe una amplia experiencia en la utilización de la escoria de acería LD como corrector de suelos de cultivos. La escoria no solo es capaz de aportar una serie de micronutrientes necesarios para el crecimiento de las plantas sino que también mejora la densidad, porosidad y permeabilidad de los suelos.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: <b>2.2</b>	Mes: <b>DICIEMBRE</b> Año: <b>2007</b>
<b>ESCORIAS DE ACERÍA LD</b>		

- El aprovechamiento de las escorias LD, produce un ahorro importante de otros recursos naturales que serían necesarios para las distintas aplicaciones a las cuales se destina.
- La escorias es producida simultáneamente con el acero, y permitir su aprovechamiento evita la gestión de las mismas por otro medio, como por ejemplo, destino vertedero.

#### Inconvenientes

- Los lixiviados de las escorias de acerías pueden llegar a tener un pH superior a 11. No obstante si se usa en áreas en contacto con aguas de flujo lento o estancadas, se debe airear el agua para evitar que debido al pH de escoria, pueda afectar a la fauna y la flora. En otros casos, no se ve afectado por su uso.
- En la bibliografía técnica se han recogido casos de obstrucción de tuberías del sistema de drenaje del firme, al precipitarse el carbonato cálcico procedente de la combinación de los lixiviados de la escoria con el dióxido de carbono del aire.
- Las escorias de acería, especialmente las producidas en el procedimiento basado en el empleo de oxígeno, tienen cal libre (CaO) y magnesia (MgO). Estos óxidos pueden reaccionar con el agua y formar hidróxidos en una reacción expansiva. La expansibilidad hidráulica de las escorias de acería es más frecuente que la que puede producirse en las escorias de alto horno por la presencia de sulfatos solubles. La primera expansión en el tiempo corresponde a la hidratación de la cal, y tiene lugar en el plazo de semanas, mientras que la hidratación del óxido de magnesio se efectúa a más largo plazo, y después de la anterior. Para reducir el riesgo de expansión de las escorias de acería, en EE.UU. se recomienda una maduración o envejecimiento de entre 3 y 12 meses. A este respecto conviene señalar que, en nuestro país, la práctica habitual con las escorias 5/10 y 10/20 es regar con agua y dejar madurar de 3 a 6 meses.

#### **5.- NORMATIVA TÉCNICA**

- UNE-EN 13383-1/AC:2004 Escolleras. Parte 1: Especificaciones.
- UNE-EN 13383-1:2003 Escolleras. Parte 1: Especificaciones.
- UNE-EN 13383-2:2003 Escollera. Parte 2: Métodos de ensayo.
- UNE-EN 13242/AC:2004 Áridos para capas granulares y capas tratadas con conglomerados hidráulicos para uso en capas estructurales de firmes
- UNE-EN 13242:2003 Áridos para capas granulares y capas tratadas con conglomerados hidráulicos para uso en capas estructurales de firmes.
- UNE-EN 12620/AC:2004 Áridos para hormigón.
- UNE-EN 12620:2003 Áridos para hormigón
- UNE-EN 13043/AC:2004 Áridos para mezclas bituminosas y tratamientos superficiales de carreteras, aeropuertos y otras zonas pavimentadas.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: <b>2.2</b>	Mes: <b>DICIEMBRE</b> Año: <b>2007</b>
<b>ESCORIAS DE ACERÍA LD</b>		

- UNE-EN 13043:2003 Áridos para mezclas bituminosas y tratamientos superficiales de carreteras, aeropuertos y otras zonas pavimentadas
- EN 1744-4:2005 Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos. Parte 4: Determinación de la susceptibilidad al agua de los fillers para mezclas bituminosas
- UNE-EN 1744-1:1999 Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos. Parte 1: Análisis químico
- NLT – 361/91. “Determinación del grado de envejecimiento en escorias de acería”.

## **6.- REFERENCIAS**

- [1] SHI, CAIJUN, “Steel Slag- Its Production, Processing, Characteristics and cementitious properties”, Journal of Materials in Civil Engineering, May-June 2004, pp.230-235.
- [2] LÓPEZ F. A.; MEDINA F. “Escorias LD: co-productos de la industria siderúrgica”, C y E. 1989.
- [3] RUIZ RUBIO A.; GARCÍA CARRETERO J. “La aplicación de las escorias de acería en carreteras”, Ingeniería Civil, CEDEX, Núm. 80,5-9. 1991.
- [4] EMERY J.J.”Slag Utilization in Pavement Construction” in ASMT Special Technical Publication 774: “Extending Aggregate Resources”. Washington, DC, 1982.
- [5] FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (FHWA). “User guidelines for waste and byproduct materials in pavement construction”. 1997.
- [6] OZEKI, S. “Properties and usage of steel plant slag”, ENCOSTEEL- Steel for Sustainable Development-135. Stockholm, June, 1997.
- [7] PIRET J. “Valorisation de la scorie LD. Aspects généraux du probleme et réalisation dans le domaine de la constrution routière”, Revue de Metallurgie nº 75, 331-338.1978.
- [8] PIRET J.; LESGARDEUR A. “Route experimental en scorie LD”, Excavator nº 444-1. 1981.
- [9] PIRET J.; WILLEMIJNS K.; CLAVERT J.; GESTMANS A. “Les propietés antidérapants de la scorie LD. Essais de laboratoire et réalisation pratique”. Day on Utilization of Blast Furnace and Steelmaking Slags CEC. Liege, 1988.
- [10] THOMAS G.H. “Expériences Britanniques d’utilisation des scories LD comme revêtement routier”, Revue de la Métallurgie, 329-334. Mai, 1978.
- [11] VERHASSELT A.; CHOQUET F. “Steel slags as unbound aggregate in road construction; Problems and recommendations” in “Unbound Aggregates in Roads”, ed. Jones and Dawson, 204 –209. Butterworths, London, 1989.
- [12] IHOBE S.A, Sociedad Pública de Gestión Ambiental. Departamento de Ordenación del Territorio, Vivienda y Medio Ambiente del Gobierno Vasco. “Libro Blanco de Minimización de Residuos y Emisiones de Escorias de Acería”.Febrero, 1999.
- [13] OCDE. “Utilisation des déchets et sous-produits en technique routière”. París, 1977.
- [14] ITGME. “Manual de reutilización de residuos de la industria minera, siderometalúrgica y termoeléctrica”. Madrid, 1995.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 2.2	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>ESCORIAS DE ACERÍA LD</b>		

## **7.- ENTIDADES DE CONTACTO**

- ARCELOR ESPAÑA S.A.  
Dirección de Medio Ambiente Arcelor Asturias  
Apartado de Correos nº 90  
33480 Avilés (Asturias)  
Tel. 985 126032  
www.arcelor.com
- EDERSA (Escorias y Derivados S.A)  
Carretera de Avilés al Faro de Peñas, km 1,5  
Parque de Lobos – Avilés  
Apartado de Correos nº 447  
33400 Avilés (Asturias)  
Tel. 985 540992 – 985 547819  
www.edersa.es
- UNESID.  
c/ Castelló, 128 – 3º  
28006 Madrid  
Tel. 91 5624018  
www.unesid.org

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 2.3	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>ESCORIAS DE ACERÍA DE HORNO DE ARCO ELECTRICO</b>		
Nombre en inglés: Electric Arc Furnace Slags (EAF-Slags)		



ESCORIAS DE ACERÍA DE HORNO DE ARCO ELÉCTRICO

## 1.- ORIGEN <sup>(1)</sup>

El proceso de fabricación del acero, tanto común como especial, en las acerías de horno de arco eléctrico se compone de dos etapas: una primera denominada metalurgia primaria o fusión, donde se produce la fusión de las materias primas que se realiza en hornos de arco eléctrico, y la segunda, denominada metalurgia secundaria o afino del baño fundido, que se inicia en el horno eléctrico y finaliza en el horno cuchara.

La principal materia prima empleada para la fabricación de acero en horno de arco eléctrico es la chatarra de hierro dulce o acero. Como elementos auxiliares se pueden cargar también pequeñas cantidades de fundición, de mineral de hierro y de ferroaleaciones.

La etapa de fusión incluye una serie de fases como la oxidación, dirigida a eliminar impurezas de manganeso y silicio, la defosforación y la formación de escoria espumante en la que se acumulan todas las impurezas. Al final de todas estas fases se extraen las **escorias negras**.

La etapa de afino incluye la desoxidación, que permite eliminar los óxidos metálicos del baño, la desulfuración y la descarburación del acero. El líquido fundido procedente del horno eléctrico se alimenta al horno-cuchara, se cubre con una escoria que se denomina **escoria blanca** y se agita continuamente con el soplado de gas inerte, normalmente argón. La escoria blanca permite la

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: <b>2.3</b>	Mes: <b>DICIEMBRE</b> Año: <b>2007</b>
<b>ESCORIAS DE ACERÍA DE HORNO DE ARCO ELECTRICO</b>		

reducción de los óxidos metálicos presentes en el baño, durante la denominada fase de desoxidación. Paralelamente se realiza la desulfuración del líquido fundido, que se produce por simple contacto con la cal existente en la escoria blanca.

## 2.- VOLUMEN Y DISTRIBUCIÓN (\*)

En España funcionan actualmente 24 acerías de horno eléctrico de arco (14 de ellas en el País Vasco), que produjeron en el año 2005 un total de 13,6 Mt de acero de las cuales:

- Acero común o especial..... 12.420.000 t
- Acero inoxidable.....1.103.000 t

con el siguiente reparto por comunidades (en el año 2005):

País Vasco .....	45,6%
Cataluña- Aragón .....	17,6%
Andalucía .....	11,9%
Galicia-Castilla León-Extremadura .....	10,1%
Cantabria .....	8,6%
Madrid .....	6,3%

Considerando la generación de escorias que se producen por tonelada de acero se obtienen las siguientes cantidades anuales de escorias de acerías de acero común o especial:

Producción de acero (10 <sup>3</sup> t)	Generación de escoria kg/t de acero		Producción de escorias (10 <sup>3</sup> t)
12.420	Escoria negra	110-150	<b>1.614.600</b>
	Escoria blanca	20-30	372.600

(\*) Información facilitada por UNESID

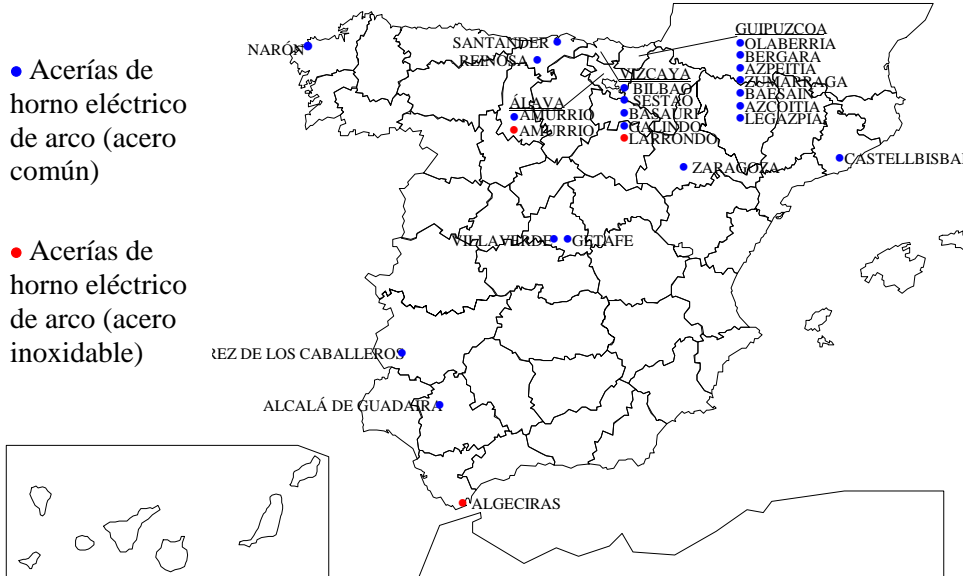
En el año 2006 la producción de acero total se ha incrementado en un 2,7% sobre la de 2005.

**ESCORIAS DE ACERÍA DE HORNO DE ARCO ELECTRICO**

LEYENDA

● Acerías de  
horno eléctrico  
de arco (acero  
común)

● Acerías de  
horno eléctrico  
de arco (acero  
inoxidable)



**3.- VALORIZACIÓN**

**3.1.- PROPIEDADES<sup>(1)</sup>**

**3.1.1.- Escorias negras**

Mediante el proceso de fusión en el horno de arco eléctrico se obtiene acero líquido y, nadando sobre su superficie, escoria negra, que se extrae por una de las puertas del horno.

La composición química de la escoria está condicionada por el tipo de chatarra utilizada, el control de las variables de operación, etc. Pueden considerarse como representativos los porcentajes siguientes:

	%
Ca O	27 - 37
Si O <sub>2</sub>	11 - 25
Fe O	3 - 25
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2 - 22
Mg O	4 - 11
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,6 - 4
Ti O <sub>2</sub>	0,25 - 1,6

Tras la extracción de la escoria del horno, su enfriamiento puede hacerse de diferentes formas:

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: <b>2.3</b>	Mes: <b>DICIEMBRE</b> Año: <b>2007</b>
<b>ESCORIAS DE ACERÍA DE HORNO DE ARCO ELECTRICO</b>		

- La escoria se vierte directamente al suelo y se enfría con agua para que pueda ser recogida y transportada en camiones. La escoria presentada un aspecto muy poroso, de tamaño relativamente pequeño y en estado vítreo.
- Se puede verter en un cono de fundición que se coloca debajo de la piquera del horno eléctrico. La escoria comienza a enfriarse en el cono y se vierte en una fosa donde se enfría. La escoria obtenida presenta un aspecto menos poroso que la anterior y es más cristalina.
- Se vierte en un cono de fundición que se deja enfriar. En este caso el enfriamiento es el más lento, y una vez fría se saca del cono. La escoria obtenida es muy compacta, con pocos poros, dura y muy cristalina.

### 3.1.2.- Escorias blancas

Las escorias blancas, procedentes de la fase de afino, se caracterizan por su contenido en metales pesados como cromo, zinc o plomo (inferior al 1%) y el reducido tamaño de sus partículas.

Ensayos químicos realizados en nuestro país establecen la siguiente composición para las escorias blancas de acería:

	%		%
Si O <sub>2</sub>	17,4 - 19,3	Fluoruro (%)	1,4
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,1 - 3,6	Sulfuro (mg/kg)	503
Fe O	0,0 - 0,95	Zinc (ppm)	596
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,2 - 10,4	Plomo (ppm)	84
Ca O	45,3 - 62,1	Cobre (ppm)	200
Mg O	4,5 - 17,2	Cromo (ppm)	150
Mn O	0,0 - 1,2	Níquel (ppm)	80
S	1,45 - 1,65		
C	0,0 - 0,03		

### 3.2.- PROCESAMIENTO<sup>(1)</sup>

Hasta la fecha se han encontrado tres alternativas de valorización de las escorias negras que han sido sancionadas por la experiencia:

- Su introducción en cementera como aporte de hierro en el proceso de fabricación del clinker.
- Su utilización en la capa de rodadura de firmes con pavimento de mezcla bituminosa.
- Su utilización como material para explanadas, subbases y bases de carreteras.



<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: <b>2.3</b>	Mes: <b>DICIEMBRE</b> Año: <b>2007</b>
<b>ESCORIAS DE ACERÍA DE HORNO DE ARCO ELECTRICO</b>		

Para la primera alternativa es necesario un pretatamiento de cribado de la escoria, de forma que su tamaño no sea mayor de 50 mm, para evitar distorsiones en las cintas transportadoras.

Para la segunda y tercera alternativas es necesario que las escorias sean tratadas adecuadamente (machacado, separación de metales, cribado y clasificación, y en su caso envejecimiento).

La única alternativa de valorización de las escorias blancas, confirmada por experiencias realizadas a escala industrial, es su utilización en las fábricas de cemento en sustitución de la marga. Para esta alternativa no será necesario un pretratamiento previo, siempre y cuando se tenga la precaución de no incluir elementos extraños, como trozos metálicos, y los tamaños de las partículas del material sean inferior a 50 mm.

### 3.3.- PROPIEDADES DEL MATERIAL PROCESADO

#### 3.3.1.- Escorias negras

Los áridos procedentes de las escorias negras de acerías de hornos de arco eléctrico tienen una elevada densidad relativa, entre 3,3 y 3,8, muy por encima de la de los áridos naturales. Esta diferencia hay que tenerla en cuenta en las dosificaciones y al considerar los costes de transporte.

La absorción de agua de la escoria presenta en general valores superiores al 3,5 % en volumen y en algunos casos próximos al 7 %. Esta absorción puede influir en la durabilidad si el árido va a estar sometido a ciclos de hielo-deshielo o humedad-sequedad.

Las partículas son duras, con coeficientes de desgaste Los Ángeles entre 20 % y 25 %, e inferiores.

El coeficiente de pulimento acelerado varía en general entre 0,50 y 0,60, cumpliendo los valores exigidos para áridos de mezclas bituminosas en capas de rodadura.

Tal como figura en el apartado 3.1.1., el contenido de Ca O en escorias analizadas en nuestro país oscila en general entre el 27% y 37%. En la bibliografía internacional se han referido contenidos típicos de Ca O sensiblemente mayores, entre 40 y 52 %<sup>(2)</sup>.

Debido a la presencia de óxidos de cal y magnesio libre en su composición, las escorias negras de acería tienen **naturaleza expansiva**. La cal libre se hidrata rápidamente y puede originar grandes cambios de volumen en pocas semanas, mientras que la hidratación del magnesio se produce mucho más lentamente.

Los lixiviados de estas escorias pueden tener un pH superior a 11, y por tanto, presentar problemas de corrosión en las tuberías de aluminio y acero que se coloquen en contacto directo con ellas<sup>(3)</sup>.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: <b>2.3</b>	Mes: <b>DICIEMBRE</b> Año: <b>2007</b>
<b>ESCORIAS DE ACERÍA DE HORNO DE ARCO ELECTRICO</b>		

Se han registrado casos de obturación de los sistemas de drenaje con los carbonatos precipitados por la reacción del hidróxido de calcio de los lixiviados con el dióxido de carbono de la atmósfera<sup>(4)</sup>.

### 3.3.2.- Escorias blancas

Las escorias blancas presentan en su composición silicatos tricálcico y bicálcico, aluminoferrito tetracálcico, aluminato tricálcico y ferrito dicálcico.

## 3.4.- APLICACIONES

### 3.4.1.- Obras de tierra y terraplenes

Las escorias blancas de acería pueden ser utilizadas en la estabilización de suelos y como material para construcción de terraplenes. Este tipo de aprovechamiento se encuentra en fase de investigación y desarrollo.

### 3.4.2.- Firmes de carreteras

**Las escorias negras**, adecuadamente tratadas, cumplen con creces, generalmente, las especificaciones técnicas que exigen los pliegos de carreteras para áridos de capas granulares **en coronación de explanadas, subsases y bases** de carreteras. Tienen latente el riesgo de expansión y de hinchamiento, por lo que es muy importante evaluar su potencial expansivo y limitar su uso cuando sobrepase los valores establecidos. Debido a su porosidad, su angulosidad, y a la falta de finos, las escorias pueden resultar incómodas de extender y compactar, por lo que suelen combinarse con otros áridos para mejorar estos aspectos.

No deben utilizarse nunca en capas estabilizadas con cemento o junto a obra de fábrica u otros elementos que restrinjan las posibles expansiones.

Se ha comprobado que un adecuado tratamiento, y una clasificación y selección de las escorias en la planta, pueden proporcionar sin problemas **áridos** de calidad para ser utilizados **en mezclas bituminosas**. Estos áridos poseen un buen coeficiente de Los Ángeles y un excelente coeficiente de pulimento acelerado, que los hace **especialmente** utilizables en **capas de rodadura**. La composición química y el carácter básico de las escorias garantiza una buena adhesividad con los betunes convencionales. El principal problema que se plantea en la fabricación de mezclas con estos áridos es la falta de finos en la fracción más pequeña. Una dosificación de áridos adecuada, desde un punto de vista técnico, es la que combina árido grueso escoria y árido fino calizo.

### 3.4.3.- Edificación y obra pública

En el campo de la edificación y obra pública, las **escorias negras** podrían utilizarse en la industria del cemento (como aporte de hierro al clínker o como adición) y como árido para hormigón.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: <b>2.3</b>	Mes: <b>DICIEMBRE</b> Año: <b>2007</b>
<b>ESCORIAS DE ACERÍA DE HORNO DE ARCO ELECTRICO</b>		

### **Utilización en cementera de escorias negras.**

En España, se ha realizado como experiencia piloto, el reciclaje de las escorias negras introduciéndolas en cementeras como aporte de hierro, silicio y cal al horno rotativo en el proceso de fabricación del clínker. La conclusión del estudio es que esta aplicación parece no presentar ninguna limitación desde el punto de vista técnico ni medioambiental<sup>(1)</sup>. El control de la calidad medioambiental de las escorias en esta aplicación, se realiza mediante la determinación de metales presentes en el clínker elaborado y en las partículas en suspensión emitidas por chimenea.

En la composición química del clínker con escorias, los únicos elementos que sufren cambios son el cromo y el manganeso (que aumentan considerablemente su porcentaje). No obstante, y dado que la legislación española no recoge limitaciones para dichos elementos y que su presencia en el cemento no representa problemas para la calidad técnica de dicho material, no se precisa tenerlos en cuenta.

La dosificación adecuada del material, en base a la composición química, con objeto de obtener un producto final de características iguales al obtenido con la utilización de materia prima convencional, se estima aproximadamente en un 4%, sin aparecer problemas de calidad técnica del producto final<sup>(1)</sup>.

Otros estudios<sup>(9)</sup> han obtenido que cementos con un contenido de escorias entre el 15-30% pueden cumplir los requisitos establecidos para los cementos de categoría resistente 42.5, mientras que con un contenido de escorias del 45% pueden satisfacer los requisitos establecidos para los cementos de categoría resistente 32.5. Estos cementos presentan una menor demanda de agua, por lo que mejora su trabajabilidad, aunque presentan un mayor tiempo de fraguado.

Así mismo podría pensarse en la utilización de estas escorias como adición en mezclas con cementos para fabricación de hormigones y otros derivados, para lo cual como punto de partida pueden tomarse como referencia las especificaciones pedidas a otras adiciones.

### **Utilización de escorias negras como árido para morteros.**

Algunos estudios han investigado la posibilidad de utilizar las escorias de acería en la fabricación de morteros<sup>(7)</sup>.

Para ello, el material necesita una molienda previa para obtener una granulometría similar a la de un árido convencional. Con este tratamiento, se puede conseguir un material con un huso granulométrico dentro del especificado en los límites que recoge la Norma Básica de la Edificación NBE FL-90 y que presenta un contenido de finos muy reducido, inferior al 3%.

Según este estudio, los morteros estudiados (con distintos porcentajes de escorias), presentan una buena resistencia a compresión, siendo los porcentajes óptimos de escorias, los situados entorno al 30-40%.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: <b>2.3</b>	Mes: <b>DICIEMBRE</b> Año: <b>2007</b>
<b>ESCORIAS DE ACERÍA DE HORNO DE ARCO ELECTRICO</b>		

### Utilización de escorias negras como árido para hormigón.

De forma experimental se está estudiando la posibilidad de utilizar este tipo de residuo como árido grueso<sup>(8)</sup> o fino<sup>(5)(6)</sup> para hormigón. En ambos casos, las escorias se deben triturar y tamizar, obteniendo una granulometría similar a la de los áridos naturales. Además, se debe proceder a la estabilización y envejecimiento de las escorias para evitar su expansión.

En los ensayos realizados<sup>(5)(6)(8)</sup>, en los que se reemplazó la totalidad de la arena por escorias negras de horno eléctrico, se obtuvieron hormigones de mayor densidad (2.770 kg/m<sup>3</sup>), con una resistencia a compresión y carga de rotura similares a los de un hormigón con arena natural y de mayor fragilidad.

Según estos estudios, el fenómeno de lixiviación en un hormigón normal y en un hormigón con escorias es similar para todos los metales excepto para el cloro.

### Utilización en cementera de escorias blancas

La valorización de las escorias blancas consiste en su reutilización en empresas cementeras como materia prima para sus hornos rotativos, aunque presenta ciertas dificultades de manipulación. Debido al pobre contenido en hierro no se van a poder utilizar en cementera como aporte de hierro, sino como materia prima en sustitución de la marga.

Los fluoruros aparecen en cantidades elevadas (1,4%), por lo que deberá tenerse en cuenta en la práctica, al influir negativamente en las propiedades del clínker, así como en las emisiones por razones medioambientales. Los contenidos superiores al 2% en magnesio pueden ocasionar inestabilidad de volumen por lo que su contenido está limitado por la normativa. Por este motivo el parámetro limitante es el magnesio y va a ser éste el que determine la máxima dosificación (por lo general no mayor del 5%).

Es importante que la granulometría del material sea uniforme, de tamaño reducido (menor de 50 mm), y que no se incluyan con la escoria materiales extraños como hierro y trozos de refractario, fáciles de eliminar en origen.

Por otra parte, una vez realizada la prueba en cementera con una dosificación de la escoria blanca del 5%, el análisis de las resistencias muestra valores muy similares a los obtenidos en condiciones normales de funcionamiento<sup>(1)</sup>.

De esta forma los requisitos mínimos que deben cumplir las escorias para su incorporación en el proceso productivo del cemento son:

- Porcentaje de MgO inferior al 5%, valor máximo admisible por la lentitud con que se hidrata la magnesia calcinada y la dilatación que le acompaña.
- Control de la calidad medioambiental.

### **3.5.- OBRAS REALIZADAS**

En nuestro país se han construido algunos tramos de prueba para analizar el comportamiento de las escorias en capas de rodadura de mezclas bituminosas.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: <b>2.3</b>	Mes: <b>DICIEMBRE</b> Año: <b>2007</b>
<b>ESCORIAS DE ACERÍA DE HORNO DE ARCO ELECTRICO</b>		

En la carretera GI-3610 de Zizurkil a Andoain por Aduna, de la provincia de Guipúzcoa, se realizó en el año 1998 un tramo de prueba en el que, para el refuerzo del firme que existía, se sustituyó la mezcla convencional por una fabricada con escorias de acería de horno de arco eléctrico en una longitud de unos 500 m <sup>(1)</sup>. Los resultados obtenidos han sido satisfactorios. Además, en la Comunidad Autónoma del País Vasco se han realizado en los dos últimos años numerosos tramos de ensayo en los que se ha utilizado el árido procedente de escorias de acería de horno eléctrico en mezclas bituminosas (capas de rodadura tipo S12 y F10, y capas intermedias tipo S20) y en capas granulares (Z25). Estas actuaciones se muestran en la Tabla 1.

CARRETERA	MATERIAL	CAPA	LONGITUD	TRÁFICO	FECHA
Eje Ballonti	F-10	RODADURA (100% áridos de escoria)	300 m (en rampa) 1 calzada	T1	Septiembre de 2006
Eje Ballonti	F-10	RODADURA (gruesos escoria y finos: 50% escoria y 50% caliza)	300 m (en rampa) 1 calzada	T1	Septiembre de 2006
Eje de la Ría, Carmen Galindo	PA-12	RODADURA (gruesos escoria y arena caliza)	500 m (tramo recto) 1 calzada	T1	Febrero – marzo de 2007
Acceso a Nervacero desde Ballonti	S-20	INTERMEDIA (gruesos escoria y arena caliza)	200 m 1 calzada	T2	Junio 2006
Carmen Galindo	S-20	INTERMEDIA (gruesos y arena escoria)	500 m 1 calzada	T1	De otoño a fin de año 2006
Acceso a Nervacero desde Ballonti	ZA-25	BASE GRANULAR (todo escoria)	200 m 1 calzada	T2	Junio 2006
Gi – 3851	ZA-20	BASE (100% áridos de escoria)	230 m (en rampa) 2 calzadas	T4B	2006-2007
Gi – 3851	ZA-20	BASE (gruesos de escoria y finos: 50% escoria y 50% caliza)	180 m (en rampa) 2 calzadas	T4B	2006-2007
Gi – 3851	ZA-20	BASE (gruesos de escoria y finos: 100% caliza)	210 m (en rampa) 2 calzadas	T4B	2006-2007
Gi – 2133	S-20	INTERMEDIA (100% áridos de escoria)	715 m 2 calzadas	T3A	2006-2007
Gi – 2133	S-20	INTERMEDIA (gruesos escoria y finos 100% caliza)	710 m 2 calzadas	T3A	2006-2007
Gi – 2133	S-20	INTERMEDIA (gruesos escoria y finos: 50% escoria y 50% caliza)	715 m 2 calzadas	T3A	2006-2007
Gi – 2133	S-12	RODADURA (100% áridos de escoria)	710 m 2 calzadas	T3A	2006-2007
Gi – 2133	S-12	RODADURA (gruesos escoria y finos 100% caliza)	740 m 2 calzadas	T3A	2006-2007
Gi – 2133	S-12	RODADURA (gruesos escoria y finos: 50% escoria y 50% caliza)	740 m 2 calzadas	T3A	2006-2007

**Tabla 1:** Tramos realizados en la Comunidad Autónoma del País Vasco con áridos procedentes de escorias de de acería de horno eléctrico <sup>(10)</sup>

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: <b>2.3</b>	Mes: <b>DICIEMBRE</b> Año: <b>2007</b>
<b>ESCORIAS DE ACERÍA DE HORNO DE ARCO ELECTRICO</b>		

Además, en Cataluña se han realizado varios tramos<sup>(11)</sup>. En junio, julio del año 2004 se construyó un tramo de ensayo en el acceso de camiones a la zona de báscula de la fábrica de CELSA. En este tramo se fabricaron dos mezclas bituminosas del tipo D12 como capa de rodadura de espesor 8 cm sobre 30 cm de zahorra artificial caliza. El segundo tramo experimental que se realizó en Cataluña fue en la calle Molist de Barcelona en el año 2006, con la particularidad de la pendiente de dicha calle. Finalmente, en junio de 2007, en un tramo de la N-IIa en Lleida y para tráfico T0, se han puesto en obra, por cuenta del Ministerio de Fomento, cuatro mezclas tipo M-10 en capa de rodadura, variando la proporción del árido grueso siderúrgico.

También en el País Vasco se ha llevado a cabo una experiencia práctica, a escala industrial, de utilización de escorias en el proceso de fabricación de cemento<sup>(1)</sup>. Los resultados que se obtuvieron en este proyecto demostraron que con unos porcentajes adecuados de escorias, la calidad del producto final no varía.

Este mismo estudio estima la capacidad de incorporación de escorias para su utilización en cementeras (considerando una dosificación media igual a la utilizada en la prueba a escala industrial) obteniendo los siguientes resultados: 85.000 t/año para las escorias negras y unas 100.000 t/año para las escorias blancas.

#### **4.- CONSIDERACIONES MEDIOAMBIENTALES**

La Ley 10/1998, de Residuos, de 21 de abril, establecía en su artículo 3 que tendrían consideración de residuos todos aquellos que figurasen en el Catálogo Europeo de Residuos (CER). Este Catálogo fue aprobado por la Decisión 94/3/CE de 20 de diciembre de 1993, y complementado con la Decisión 94/904/CE, ambas aprobadas en el Real Decreto 952/1997.

Las Decisiones Comunitarias 94/3/CE y 94/904/CE han sido derogadas por la Decisión 2000/532/CE mediante la que se aprueba La Lista Europea de Residuos. La orden MAM/304/2002 de 8 de febrero (con corrección de errores de 12 de marzo), publica en su Anejo 2 la mencionada Lista Europea de Residuos.

Las escorias de acería de horno de arco eléctrico vienen incluidos en la Lista Europea de Residuos en el Capítulo 10 correspondiente a "Residuos de procesos térmicos" con los siguientes códigos:

- 10 02 01 Residuos de tratamiento de escorias.
- 10 02 02 Escorias no tratadas.

El correcto tratamiento de estos materiales supone una serie de beneficios de carácter global, tanto desde el punto de vista de los generadores de los mismos como desde el punto de vista social:

- Una disminución de los costes de vertido, a la vez de un ahorro de materia prima natural derivado de la reutilización de los subproductos de acería.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: <b>2.3</b>	Mes: <b>DICIEMBRE</b> Año: <b>2007</b>
<b>ESCORIAS DE ACERÍA DE HORNO DE ARCO ELECTRICO</b>		

- Reducción del impacto medioambiental y un beneficio espacial al mantener los vertederos sin ocupar, no depositando los residuos en vertedero.
- Incremento de la calidad de vida en los alrededores de este tipo de industrias.

Desde el punto de vista medioambiental, las escorias negras de acería de horno de arco eléctrico se pueden utilizar en capas granulares (como bases, subbases y coronación de explanadas) siempre y cuando los resultados del ensayo de lixiviación sobre las escorias permanezcan por debajo de los límites fijados. Sus lixiviados pueden corroer las tuberías de aluminio y acero que se coloquen en contacto con ellas.

Cuando se utilicen las escorias como áridos en mezclas bituminosas para capas de rodadura de firmes se deberá también comprobar que los resultados del ensayo de lixiviación cumplen las especificaciones fijadas.

## **5.- ASPECTOS ECONÓMICOS**

Hasta llegar a los primeros pasos para su valorización, en España la escoria negra se ha transportado desde su salida del horno y enfriamiento a los vertederos de residuos inertes. Hasta la fecha no existen unos precios estipulados en la venta de este material para la obtención de áridos siderúrgicos.

Las escorias blancas tienen como principal vía de valorización su empleo en cementeras: Tradicionalmente se han mezclado con las escorias negras y se llevaban a vertedero.

En algunos municipios el precio del vertido de residuos es de tarifa única, como es el caso de Madrid (25,20 euros / t). Sin embargo, lo general en otros municipios es establecer la tarifa dependiendo de la naturaleza del material. En Málaga se paga por residuo inerte limpio y, dependiendo de si se transporta en contenedor o en camión y de su tonelaje real, los precios varían entre 13,38 y 54,29 euros / t. En Pamplona se fija un precio de 5,24 euros / t de residuo inerte. Como ejemplo representativo se encuentra el vertedero de Aizmendi en Guipúzcoa que establece como tarifa de vertido de escorias 39,00 euros / t.

## **6.- NORMATIVA TÉCNICA**

- NLT – 361/91. “Determinación del grado de envejecimiento en escorias de acería”.
- Departamento de Medio Ambiente de la Generalitat de Cataluña. “Orden del 15 de febrero de 1996, sobre valorización de escorias”. (Diario Oficial de la Generalitat de Cataluña Núm. 2181 – 13.3.1996).
- UNE-EN 197-1:2000. “Cemento. Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes”.
- Ministerio de Fomento. “Instrucción de Hormigón Estructural (EHE)”. 2000.
- Consejo de la Unión Europea. “ DECISIÓN DEL CONSEJO, de 19 de diciembre de 2002, por la

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: <b>2.3</b>	Mes: <b>DICIEMBRE</b> Año: <b>2007</b>
<b>ESCORIAS DE ACERÍA DE HORNO DE ARCO ELECTRICO</b>		

que se establecen los criterios y procedimientos de admisión de residuos en los vertederos con arreglo al artículo 16 y al anexo II de la Directiva 1999/31/CEE". (Diario Oficial de las Comunidades Europeas - 16.1.2003).

- Departamento de Ordenación del Territorio y Medio Ambiente de la Comunidad Autónoma del País Vasco. "DECRETO 34/2003, de 18 de febrero, por el que se regula la valorización y posterior utilización de escorias procedentes de la fabricación de acero en hornos de arco eléctrico".(BOPV 26 de febrero de 2003).
- UNE-EN 12620. "Áridos para hormigón". 2003.
- UNE-EN 13043 "Áridos para mezclas bituminosas y tratamientos superficiales de carreteras, aeropuertos y otras zonas pavimentadas".
- UNE-EN 13242. "Áridos para capas granulares y capas tratadas con conglomerantes hidráulicos para uso en capas estructurales de firmes". 2003.
- Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3) (ORDEN FOM/891/2004). Los artículos en los que aparecen referencias son los siguientes:
  - a. Artículo 330 "Terraplenes".
  - b. Artículo 510 "Zahorras".
  - c. Artículo 542 "Mezclas bituminosas en caliente".
- Consejo de Gobierno de la Comunidad Autónoma de Cantabria. "Decreto 104/2006, de 19 de octubre, de valorización de escorias". (BOC Núm 206 – 26 de octubre de 2006).

## **7.- REFERENCIAS**

- [1] IHOBE, S.A., Departamento de Ordenación del Territorio, Vivienda y Medio Ambiente del Gobierno Vasco. "Libro Blanco de Minimización de Residuos y Emisiones de Escorias de Acería". Febrero, 1999.
- [2] EMERY, J.J. " Slag Utilization in Pavement Construction", Extending Aggregate Resources. ASTM Special Technical Publication 774, American Society for Testing and Materials. Washington, DC, 1982.
- [3] FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (FHWA). "User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction". 1997.
- [4] GUPTA, J.D. and KNELLER, W.A."Precipitate Potential of Highway Subbase Aggregates". Report No. FHWAOH-94/004, Prepared for the Ohio Department of Transportation. Novemeber, 1993.



<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: <b>2.3</b>	Mes: <b>DICIEMBRE</b> Año: <b>2007</b>
<b>ESCORIAS DE ACERÍA DE HORNO DE ARCO ELECTRICO</b>		

- [5] OZKUL, M. H. "Properties of slag aggregate concretes". Concrete for Environment Enhancement and Protection, p. 553-558. Edited by R K Dhir and T D Dyer. Published by E&FN Spon. 1996.
- [6] "Waste materials in construction. Putting Theory into Practice". Proceedings of the International Conferences on Environmental Implications of Construction with Waste Materials, WASCOM 97. Published by ELSERVIER. The Netherlands, June, 1997.
- [7] EGMASA (Empresa de Gestión Medioambiental, Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía). "Estudio de viabilidad de las escorias siderúrgicas como sustitutos de los áridos en la fabricación de morteros". 2004.
- [8] MANSO VILLALALÁIN, J.M.; MARQUÍNEZ, J.S.: "Investigación de nuevos usos de las escorias de horno eléctrico de arco (EAF). La oportunidad de los hormigones". Hormigón y Acero. Nº.241, 3<sup>er</sup> trimestre 2006. pp 51-57.
- [9] KOUROUNIS, S; TSIVILIS, S; TSAKIRIDIS, P.E; PAPANIMITRIOU, G.D and TSIBOUKI, Z.: "Properties and hydration of blended cements with steelmaking slag". Cement and Concrete Research, Volume 37, Issue 6, June 2007, pp 815-822.
- [10] FONSECA, A. I., Gobierno Vasco. "Escorias de acería como árido para la construcción de carreteras". Jornada sobre Aplicación de Residuos en Carreteras. Barcelona, octubre, 2007:
- [11] BARRA, M., Universidad Politécnica de Cataluña. "Las escorias de acería en Cataluña". Jornada sobre Aplicación de Residuos en Carreteras. Barcelona, octubre, 2007:

## **8.- ENTIDADES DE CONTACTO**

- UNESID (Unión de Empresas Siderúrgicas)  
c/ Castelló nº 128 – 3º  
28006 Madrid  
Tel. 91 5624018
- IHOBE, S.A. (Sociedad Pública de Gestión Ambiental)  
c/ Ibáñez de Bilbao nº 28 – 8º  
48009 Bilbao  
Tel. 94 4230743  
Fax 94 4235900

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: <b>2.3</b>	Mes: <b>DICIEMBRE</b> Año: <b>2007</b>
<b>ESCORIAS DE ACERÍA DE HORNO DE ARCO ELECTRICO</b>		

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 2.4	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>HUMO DE SÍLICE</b>		
Nombre en inglés: Silica fume		



HUMO DE SÍLICE

## 1.- ORIGEN

El humo de sílice, también llamado microsílíce o sílice activa, es un producto inorgánico constituido por partículas esféricas de gran finura que se origina en la reducción del cuarzo con carbón, durante los procesos de obtención de silicio metal y ferrosilicio en hornos eléctricos de arco. El polvo se recoge en filtros de mangas, constando de partículas esféricas de  $\text{SiO}_2$  amorfo en un porcentaje variable entre un 85 y un 98%.

## 2.- VOLUMEN Y DISTRIBUCIÓN

La generación de humo de sílice no es un problema en España, ya que actualmente hay una única planta de silicio metal que lo produce (situada en La Coruña), con una cantidad próxima a las 19.000 t.

La siguiente tabla refleja estas cifras, correspondientes al año 2003<sup>(1)</sup>:

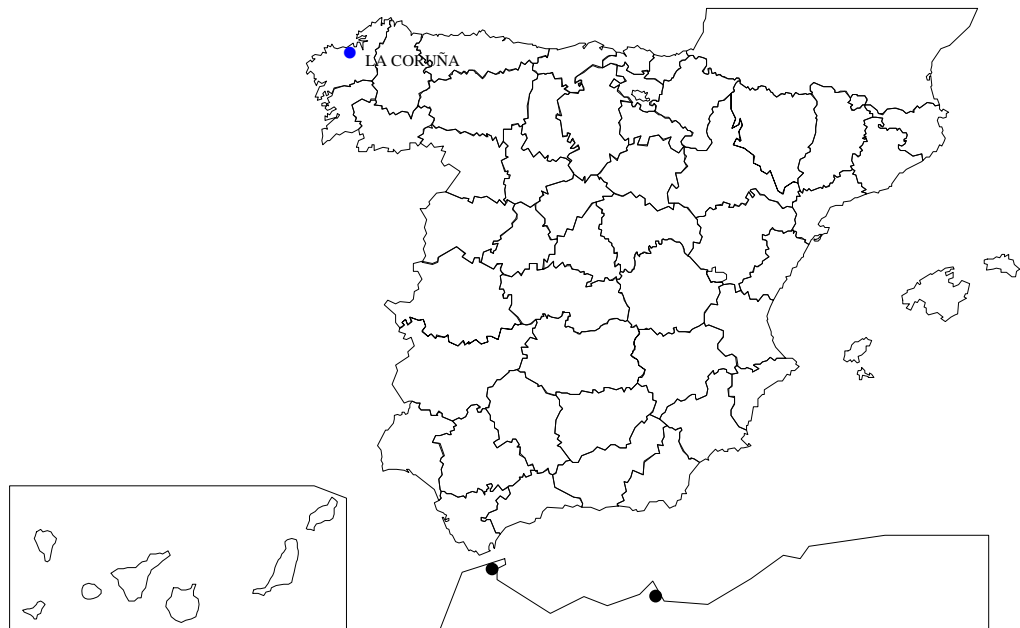
<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: <b>2.4</b>	Mes: <b>DICIEMBRE</b> Año: <b>2007</b>
<b>HUMO DE SÍLICE</b>		

PRODUCCIÓN DE HUMO DE SÍLICE (2003)	CONSUMO	PORCENTAJE UTILIZADO
19.014 t	10.000 t	67%

**Tabla 1:** Producción de humo de sílice

## **LEYENDA**

- Planta de producción de humo de sílice



## **3.- VALORIZACIÓN**

### **3.1- PROPIEDADES**

#### **Propiedades Químicas**

Las propiedades químicas del residuo dependen en gran medida del tipo de producto que se pretenda obtener (silicio, ferro-silicio u otras silico-aleaciones), pudiéndose distinguir tres tipos:

Procedentes de la fabricación de silicio: El contenido en SiO<sub>2</sub> del humo se sitúa en torno al 92%, aunque puede ser más bajo para productos cargados en carbono o carburo de silicio.

El humo de sílice se condensa de los gases de emisión de los hornos de producción de silicio metal, metaloide utilizado para la fabricación de aleaciones aluminio-silicio, siliconas y silicio para placas solares.

La captación de estos humos para la protección del medio ambiente, permite obtener un nuevo producto, del que se deben aprovechar sus particulares propiedades químicas y físicas.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 2.4	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>HUMO DE SÍLICE</b>		

Procedentes de la fabricación de ferro-silicio: El contenido de Si y de SiC es menor que en el caso anterior. Las impurezas minerales son más altas, pues se utiliza cuarzo y reductores de calidad más baja. El contenido total de impurezas oxidadas puede llegar al 6 ó 7%.

Procedentes de la fabricación de aleaciones calcio-silicio: Proviene de procesos con cargas que contienen altas proporciones de óxidos alcalino-térreos (tipo CaO). Como se trata de humos que reagrupan fabricaciones de diversas silico-aleaciones, hay que esperar composiciones muy heterogéneas. Así, el contenido en CaO puede variar del 3 al 20%. El porcentaje en SiO<sub>2</sub> es más bajo que el de los otros humos y además mucho más variable.

En la siguiente tabla se resumen las propiedades de las diferentes clases de humos de sílice<sup>(2)</sup>, junto a la composición típica del que se produce en nuestro país<sup>(1)</sup>:

COMPOSICIÓN (%)	SILICIO	FERRO-SILICIO	OTRAS ALEACIONES	HUMO DE SÍLICE PRODUCIDO EN ESPAÑA
SiO <sub>2</sub>	92	85-92	87	93
C libre	2,6	2,5	1,7	-
SiC	1,8	0,2	0,5	-
MgO	0,6	0,6	1,0	0,3
Si libre	0,3	0,1	0,1	-
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,1	0,5-3	1,0	0,1
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,2	1-2,5	0,3	0,2
CaO	0,5	0,3	6,0	0,5
Na <sub>2</sub> O	0,1	1	0,2	0,2
K <sub>2</sub> O	0,6	1	1,6	0,4
S total	0,2	0,4	0,6	-
Humedad	0,3	0,3	0,5	0,5
Pérdida al fuego(1.000°C)	2,8	3,0	4,0	4

**Tabla 2:** Composición química del humo de sílice

### **Actividad puzolánica**

Se define la actividad puzolánica de un material como la capacidad de fijar hidróxido cálcico a la temperatura ordinaria en presencia de agua, originando productos sólidos, insolubles y dotados de resistencia mecánica.

En presencia de cemento Pórtland hidratado, el humo de sílice desarrolla su actividad puzolánica, al ser un material muy fino rico en sílice (el hidróxido cálcico se combina con la sílice para formar silicato cálcico hidratado).

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: <b>2.4</b>	Mes: <b>DICIEMBRE</b> Año: <b>2007</b>
<b>HUMO DE SÍLICE</b>		

La actividad puzolánica del humo de sílice es efectiva en los primeros días de edad, aproximadamente al segundo día, y su actividad es tanto mayor cuanto mayor es la edad hasta los 28 días aproximadamente. A los 90 días se ha paralizado prácticamente la actividad puzolánica.

### **Propiedades Físicas**

Color: El humo de sílice varía de gris claro a gris oscuro, y cuando se mezcla con agua produce una pasta de color negro.

Peso específico: El peso específico del humo de sílice es aproximadamente 2,2 <sup>(3)</sup>, inferior al del cemento Portland que es aproximadamente 3,1, aunque depende del tipo de aleación que se fabrique.

Densidad: La densidad aparente, o de conjunto, suele variar entre 130 y 430 kg/m<sup>3</sup>, aunque los valores más comunes son los valores medios de este intervalo. El humo de sílice que se produce en nuestro país tiene una densidad aparente de 200-250 kg/m<sup>3</sup>.

Tamaño de las partículas: El humo de sílice consiste en partículas esféricas muy finas con una superficie específica del orden de 20.000 m<sup>2</sup>/kg. La distribución del tamaño de las partículas de un humo de sílice típico indica que la mayoría de las mismas son menores a 1µm, con un diámetro promedio de casi 0,1 µm que es menor casi cien veces a la partícula promedio de cemento.

### **3.2.- PROCESAMIENTO**

El humo de sílice puede presentarse en el mercado sin densificar, densificado, en suspensión o granulado.

Polvo sin densificar: Es la forma en que se presenta en su estado original. Al tratarse de un material extremadamente fino se dificulta enormemente su manipulación, genera gran cantidad de polvo y encarece el coste de transporte.

Polvo densificado: Mediante un proceso de densificación el producto adquiere la suficiente densidad para ser transportado económicamente, y puede ser manipulado en las plantas de hormigonado como el cemento o las cenizas volantes. Además con este proceso se reduce el polvo que genera el humo de sílice en estado original. La densificación se puede realizar mediante aire a presión o de forma mecánica.

Humo de sílice en suspensión: En este caso, el humo de sílice se mezcla con agua en un porcentaje del 50% en masa de humo de sílice. De esta forma se eliminan las dificultades de manipulación y transporte. El coste de este último, aún considerando el volumen de agua, suele ser más rentable que en el caso del humo de sílice sin densificar.

Humo de sílice granulado: El humo de sílice en estado original se mezcla con una pequeña cantidad de agua, formándose gránulos de diferentes tamaños. La granulación no es un proceso fácilmente reversible ya que los gránulos son bastante duros para descomponerse con facilidad

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: <b>2.4</b>	Mes: <b>DICIEMBRE</b> Año: <b>2007</b>
<b>HUMO DE SÍLICE</b>		

durante la producción del hormigón. Por este motivo este tipo de producto no se utiliza como adición al hormigón.

El tipo empleado, puede influir en las características del hormigón final y debe evitarse cualquier cambio de tipo durante la ejecución de los proyectos.

La utilización de un tipo en particular dependerá del volumen de hormigón total y de las características específicas del proyecto, así como de las instalaciones de la central de hormigón (disponibilidad de amasadoras, silos, etc.).

### 3.3.- PROPIEDADES DEL MATERIAL PROCESADO

Se recoge a continuación la densidad aparente, o de conjunto, del humo de sílice según los diferentes tratamientos descritos anteriormente:

Humo de sílice en suspensión  $\Rightarrow$  700 kg de humo de sílice por m<sup>3</sup> de suspensión.

Humo de sílice densificado  $\Rightarrow$  480 a 640 kg/m<sup>3</sup>.

### 3.4.- APLICACIONES

#### 3.4.1.- Fabricación de cemento

Según La RC-08<sup>(4)</sup>, se emplea humo de sílice en mayor o menor proporción en los siguientes tipos de cementos:

Cementos comunes	Cemento Portland con humo de sílice	CEM II/A-D	6 a 10%
	Cemento Portland mixto <sup>(*)</sup>	CEM II/A-M	<10%
		CEM II/B-M	<10%
	Cemento Pozolánico <sup>(**)</sup>	CEM IV/A	<10%
		CEM IV/B	<10%

(\*) Cemento que puede incorporar escoria de horno alto, humo de sílice, puzolanas naturales, cenizas volantes y caliza, en una proporción de 6 a 20%. La proporción de humo de sílice se limita al 10%.

(\*\*) Cemento que puede incorporar humo de sílice, puzolanas naturales y cenizas volantes, en una proporción de 21 a 35%. La proporción de humo de sílice se limita al 10%.

**Tabla 3:** Tipos de cementos con humo de sílice

La utilización de los cementos comunes que incorporan humo de sílice en hormigón estructural se regula según la Instrucción EHE<sup>(5)</sup>, e incluye unas recomendaciones generales para su utilización.

El cemento Portland con humo de sílice (CEM II/A-D), resulta especialmente adecuado para su aplicación en hormigón pretensado, hormigón que contiene áridos reactivos, hormigón proyectado u hormigón para desencofrado y descimbrado rápido.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: <b>2.4</b>	Mes: <b>DICIEMBRE</b> Año: <b>2007</b>
<b>HUMO DE SÍLICE</b>		

La Norma UNE-EN 197-1:00<sup>(6)</sup> recoge las especificaciones que debe cumplir el humo de sílice para su utilización en la fabricación de cementos, mientras que la Instrucción para la Recepción de Cementos (RC-08) establece las prescripciones técnicas generales y las condiciones de suministro e identificación que deben satisfacer los cementos que incorporan humo de sílice.

A continuación se resumen las especificaciones que debe cumplir el humo de sílice para su incorporación al cemento según esta norma.

NORMA	UNE-EN 197-1 <sup>(6)</sup>
Dióxido de silicio amorfo (SiO <sub>2</sub> )	≥ 85%
Pérdida por calcinación	≤ 4%
Superficie específica (BET) <sup>(*)</sup>	≥ 15 m <sup>2</sup> /g
Porcentaje máximo admisible	10%

(\*) El procedimiento para determinar la superficie específica según el método BET se describe con detalle en las Normas DIN 66131.

**Tabla 4:** Especificaciones que debe cumplir el humo de sílice para su incorporación al cemento

### 3.4.2.- Fabricación de hormigón

Las posibilidades de utilización del humo de sílice en el hormigón son:

- La obtención de hormigones de alta resistencia.
- La obtención de hormigones de alta durabilidad, si bien el empleo adecuado de este material puzolánico mejorará en todo caso ambas características, contribuyendo a la producción de los que se denominan hormigones de altas prestaciones.
- Otras aplicaciones específicas como:
  - Coadyuvante de bombeo.
  - Corrector de finura.
  - Hormigonado submarino.
  - Alta impermeabilidad.
  - Hormigón proyectado.

El humo de sílice se puede incorporar al hormigón como un sustituto parcial del cemento o como adición.



<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: <b>2.4</b>	Mes: <b>DICIEMBRE</b> Año: <b>2007</b>
<b>HUMO DE SÍLICE</b>		

En el primer caso, parte del cemento se reemplaza por una cantidad mucho menor de humo de sílice. Se define como “coeficiente de eficacia de una adición” al contenido de cemento en kg que se puede sustituir por un kg de adición sin que la resistencia del hormigón varíe; en el caso del humo de sílice el coeficiente de eficacia vale 2<sup>(7)</sup>.

El humo de sílice también se puede utilizar como adición a las pastas, morteros y hormigones. Añadiendo pequeñas cantidades de humo de sílice, entre un 5 y un 10% del peso del cemento, se mejoran ciertas propiedades o se confieren propiedades especiales.

En ambos casos, la pérdida de docilidad que se produce se puede compensar utilizando superplastificantes.

- Efectos del humo de sílice en el hormigón fresco<sup>(3)</sup>
  - *Demanda de agua:* Como ya se ha comentado, la incorporación de humo de sílice produce un aumento de la demanda de agua, debido principalmente a su gran superficie específica, por lo que generalmente será necesario el uso de aditivos plastificantes o superplastificantes que compensen esta demanda.
  - *Tiempo de fraguado:* El humo de sílice por sí mismo no afecta al tiempo de fraguado del hormigón, aunque generalmente se suelen incluir aditivos químicos que pueden modificarlo (plastificantes y superplastificantes).
  - *Exudación:* Se reduce considerablemente, debido a la finura del humo de sílice.
  - *Color:* Tanto el hormigón fresco como el endurecido presentan un color más oscuro. Esta diferencia se acentúa más en hormigones con alto porcentaje de humo de sílice o en aquellos en los que el humo de sílice tenga un elevado contenido en carbón.
  - *Aireantes:* La dosificación de aireantes para producir un cierto volumen de aire en el hormigón generalmente aumenta con la incorporación de humo de sílice.
- Efectos del humo de sílice en el hormigón endurecido<sup>(3)</sup>
  - *Permeabilidad:* Este tipo de hormigón se caracteriza por su baja permeabilidad, produciendo así una menor absorción de agua y una mayor durabilidad.
  - *Módulo de elasticidad:* El módulo de elasticidad del hormigón con humo de sílice es similar al de un hormigón con la misma resistencia que no incorpore esta adición.
  - *Fluencia:* La fluencia del hormigón con humo de sílice suele ser menor o igual que la de un hormigón de la misma resistencia sin humo de sílice.
  - *Retracción:* La retracción plástica de un hormigón con humo de sílice es superior al que carece de él, no obstante al final del proceso la retracción puede ser menor a la de un hormigón ordinario<sup>(8)</sup>.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: <b>2.4</b>	Mes: <b>DICIEMBRE</b> Año: <b>2007</b>
<b>HUMO DE SÍLICE</b>		

- *Resistencia a compresión:* Es la propiedad mejora notablemente con el uso del humo de sílice. Se pueden conseguir hormigones con valores comprendidos entre 100 y 120Mpa en resistencia media a 28 días<sup>(8)</sup>.
- *Resistencias a flexión y tracción:* El desarrollo de las resistencias a flexión y tracción del hormigón con humo de sílice es similar al que experimenta un hormigón sin humo de sílice.
- Efectos del humo de sílice en la durabilidad del hormigón<sup>(3)</sup>
  - *Resistencia al hielo y deshielo:* El hormigón con humo de sílice suele presentar buenos resultados frente a los ciclos de hielo y deshielo.
  - *Resistencia al ataque químico:* Debido a su baja permeabilidad, este tipo de hormigón presenta una mejor resistencia al ataque de sustancias químicas.
  - *Resistencia a la abrasión:* La incorporación del humo de sílice en hormigones reduce la abrasión de los mismos.
  - *Reacción álcali-árido:* El humo de sílice es especialmente beneficioso para que no se produzca la reacción álcali-árido.
  - *Agentes agresivos:* debido a su reducida permeabilidad, este tipo de hormigón presenta una buena resistencia a los sulfatos y cloruros.
- Especificaciones técnicas

La Instrucción EHE<sup>(5)</sup> permite la utilización del humo de sílice como adición no sólo para hormigón en masa y armado sino también para hormigón pretensado, exigiendo unos requisitos mínimos en sus características que garanticen que el hormigón alcanzará las propiedades esperadas. Esta Instrucción incorpora unas recomendaciones sobre la utilización del humo de sílice en hormigón de alta resistencia.

Así mismo se prescribe que no se podrá añadir humo de sílice al hormigón en cantidad superior al 10% del peso de cemento, y que sólo se utilizará la adición con cementos CEM I según la Instrucción RC-08<sup>(4)</sup>.

A continuación, se resumen las especificaciones que debe cumplir el humo de sílice para su incorporación al hormigón según las normas españolas y las europeas.

NORMA	Instrucción EHE-08 <sup>(5)</sup>	UNE-EN 13263-1 <sup>(9)</sup>
Óxido de silicio (SiO <sub>2</sub> )	≥ 85%	≥ 85%
Pérdida por calcinación <sup>(*)</sup>	≤ 5%	≤ 4%

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: <b>2.4</b>	Mes: <b>DICIEMBRE</b> Año: <b>2007</b>
<b>HUMO DE SÍLICE</b>		

Cloruros (Cl)	< 0,1%	< 0,30%
SO <sub>3</sub>	-	≤ 2%
Óxido de calcio libre	-	≤ 1%
Silicio libre	-	≤ 0,4%
Carbono libre	-	-
Finura	-	-
Índice de actividad resistente a los 28 días	≥ 100%	-
Superficie específica (BET)	(***)	>15.000 m <sup>2</sup> /kg
Coeficiente de eficacia(**)	≤ 2	-
Porcentaje máximo admisible	10%	-

- (\*) Según RC-08 la pérdida de calcinación no superara el 4% en masa, determinada como la norma UNE-EN 196-2 pero empleando un tiempo de calcinación de 1h.
- (\*\*) Según la EHE, para hormigones con relación agua/cemento mayor que 0,45 que vayan a estar sometidos a clases de exposición H ó F se tomará k=1. La UNE-EN 206-1 admite k=1 en las clases de exposición XC y XF.
- (\*\*\*) Según RC-08 la superficie específica (BET) sin tratar será al menos de 15.000 m<sup>2</sup>/kg, determinada conforme a la norma ISO 9277.

**Tabla 5:** Especificaciones que debe cumplir el humo de sílice para su adición al hormigón

### 3.5.- OBRAS REALIZADAS

En España se ha utilizado humo de sílice principalmente como adición al hormigón de alta resistencia (HAR)<sup>(10)(11)</sup>. En los años 70 se llevaron a cabo las primeras realizaciones en traviesas prefabricadas; en los años 80 se alcanzó, en alguna aplicación singular, una resistencia a compresión de 100 N/mm<sup>2</sup>, aunque ha sido en esta última década cuando se han proyectado y construido estructuras de hormigón de alta resistencia.

La primera obra fue la "Pasarela peatonal de Montjuïc" en 1992. Se trata de una pasarela de hormigón pretensado con 31,80 m de luz, en la que se empleó un hormigón con una resistencia característica de 80 N/mm<sup>2</sup>.

Se empleó también en la construcción del "Puente sobre el río Guadalete" en 1995. Se trata de un puente de autovía de 210 m de longitud, cuyo tablero está formado por vigas pretensadas de hormigón de alta resistencia (80 N/mm<sup>2</sup>).

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: <b>2.4</b>	Mes: <b>DICIEMBRE</b> Año: <b>2007</b>
<b>HUMO DE SÍLICE</b>		

Otras obras en las que se ha utilizado hormigón de alta resistencia han sido: Pasarela del Puerto de Málaga (1992), Puente sobre el río Miño (1995), Puente del Eje Transversal de Cataluña (1996), Dovelas para el túnel del Transvase Guadiaro-Majaceite (1996) y el Conjunto Residencial Natura Playa (1996).

#### **4.- CONSIDERACIONES MEDIOAMBIENTALES**

La Ley 10/1998, de Residuos, de 21 de abril, establecía en su artículo 3 que tendrían consideración de residuos todos aquellos que figurasen en el Catálogo Europeo de Residuos (CER). Este Catálogo fue aprobado por la Decisión 94/3/CE de 20 de diciembre de 1993, y complementado con la Decisión 94/904/CE, ambas aprobadas en el Real Decreto 952/1997.

Las Decisiones Comunitarias 94/3/CE y 94/904/CE han sido derogadas por la Decisión 2000/532/CE mediante la que se aprueba La Lista Europea de Residuos. La orden MAM/304/2002 de 8 de febrero (con corrección de errores de 12 de marzo), publica en su Anejo 2 la mencionada Lista Europea de Residuos.

El humo de sílice viene incluido en la Lista Europea de Residuos en el Capítulo 10 correspondiente a "Residuos de procesos térmicos" con el siguiente código:

- 10 08 16: Partículas procedentes de los efluentes gaseosos distintas de las especificadas en el código 10 08 15, y están caracterizadas como residuos no peligrosos.

El humo de sílice es un subproducto industrial que si no fuera utilizado como adición en el hormigón, debería almacenarse en vertedero. Su aprovechamiento tiene por tanto un valor ecológico importante, mejorando a la vez las propiedades de los materiales a los que se incorpora.

#### **Ventajas**

- Reducción del impacto medioambiental, por la disminución del volumen de residuos depositados en vertederos.
- Disminución de las materias primas utilizadas, conservando de esta forma las explotaciones mineras.
- Obtención de cementos y hormigones de propiedades mejoradas.

#### **Inconvenientes**

- Su mayor inconveniente es su dificultad de manipulación es estado original, debido a su gran finura, lo que puede hacer necesario en algunos casos, un tratamiento previo del residuo.

#### **5.- NORMATIVA TÉCNICA**

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: <b>2.4</b>	Mes: <b>DICIEMBRE</b> Año: <b>2007</b>
<b>HUMO DE SÍLICE</b>		

- UNE 83460-1. "Adiciones al hormigón. Humo de sílice. Parte 1: Especificaciones y control de calidad". 2006.
- UNE 83460-2. "Adiciones al hormigón. Humo de sílice: Recomendaciones generales para la utilización del humo de sílice". 2005.
- UNE 80-300-IN. "Recomendaciones para el uso de los cementos". 2000.
- UNE-EN 197-1. "Cemento. Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes". 2000.
- UNE-EN 13263-1. "Humo de sílice para hormigón. Parte 1: Definiciones, requisitos y criterios de conformidad". 2006
- RC-08. "Instrucción para la recepción de cementos". 2008.
- EHE. "Instrucción de Hormigón Estructural". 2000.
- UNE-EN 206-1: Hormigón. Parte 1: Especificaciones, prestaciones, producción y conformidad.

## **6.- REFERENCIAS**

- [1] FERROATLÁNTICA. Información facilitada por Ferroatlántica.
- [2] SANZ, A. "Formación del humo de sílice". Ingeniería Civil, Nº 79 , p.164-166. Abril-Junio 1991.
- [3] ACI 232.2R-96."Use of Silica Fume in Concrete". Manual of Concrete Practice. Part 1-1999. American Concrete Institute.
- [4] Ministerio de Fomento. "Instrucción para la Recepción de Cementos (RC-08)". 2008.
- [5] Ministerio de Fomento. "Instrucción de Hormigón Estructural (EHE)". 2000.
- [6] UNE-EN 197-1. "Cemento. Composición, especificaciones y criterios de conformidad. Cementos comunes". 2000.
- [7] ALAEJOS, Mª P.; FERNÁNDEZ CÁNOVAS, M. "El coeficiente de eficacia del humo de sílice". Materiales de Construcción, Vol. 49, nº 253, p. 57-63. 1999.
- [8] F. DE LARRAND Y. MALIER. "Propriétés constructives des bétons à très hautes performances de la micro à la macrostructure".
- [9] UNE-EN 13263-1: Humo de sílice para hormigón. Parte 1: Definiciones, requisitos y criterios de conformidad. 2006
- [10] GRUPO ESPAÑOL DEL HORMIGÓN (GEHO). "Hormigones de alta resistencia. Fabricación y puesta en obra". Comisión I, G.T. I/2. Boletín Nº20. Febrero, 1997.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 2.4	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>HUMO DE SÍLICE</b>		

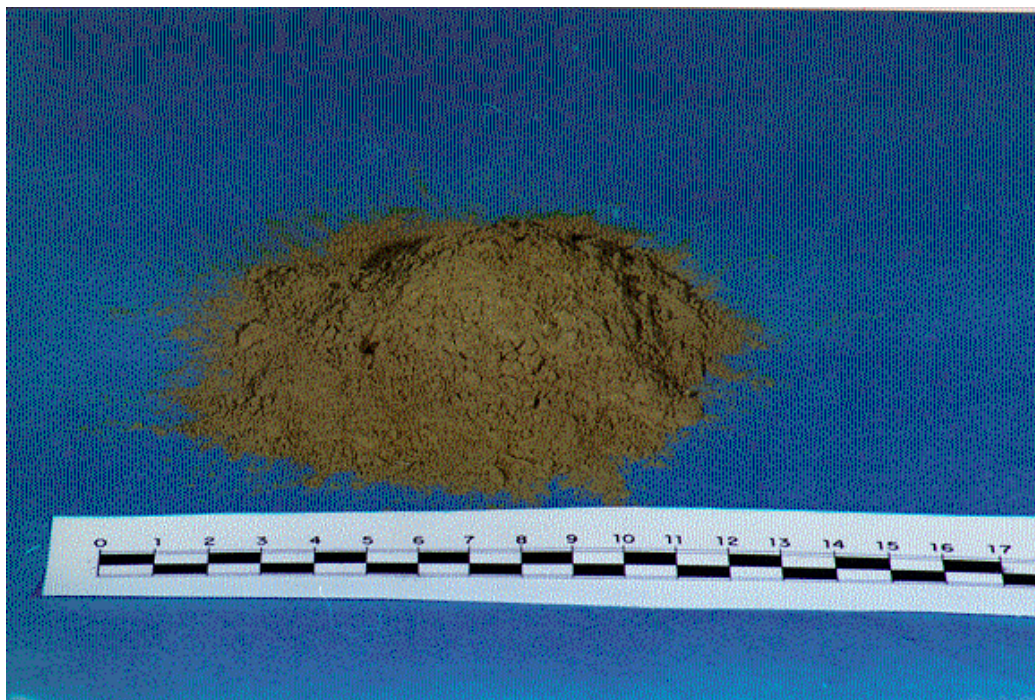
[11] GÁLLIGO, J.M.; ALAEJOS, M<sup>a</sup> P. "Hormigón de alta resistencia. Estado actual de conocimientos". M19. CEDEX. Laboratorio Central de Estructuras y Materiales. 1990.

[12] BEDEC. Banco de precios BEDEC PR/PCT. CONSTRUMÁTICA: Arquitectura, Ingeniería y Construcción. <http://www.construmatica.com/>

## **7.- ENTIDADES DE CONTACTO**

- ANEFHOP (Asociación Nacional Española de Fabricantes de Hormigón Preparado)  
c/ Antonio González Porras nº35 - 2º  
Tel. 91 4690420  
[www.hormigón.org](http://www.hormigón.org).
- IECA (Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones)  
c/ José Abascal nº 53 - 2º  
28003 Madrid  
Tel. 91 4429311  
Fax 91 4427294

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 3.1	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>CENIZAS VOLANTES DE CARBÓN Y CENIZAS DE HOGAR O ESCORIAS</b>		
Nombre en inglés: Coal Fly Ash and Bottom Ash		



CENIZAS VOLANTES DE CARBÓN

## 1.- ORIGEN

Las cenizas volantes se definen, según la norma española UNE –EN 450:1995, como “un polvo fino de partículas principalmente de forma esférica y cristalina, procedentes del carbón pulverizado quemado, las cuales poseen propiedades puzolánicas y que principalmente están compuestas de SiO<sub>2</sub> y Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. El contenido de sílice reactiva, definido y determinado según la norma ENV 197-1, supone al menos el 25% en peso.

Previamente a su combustión, el carbón se pulveriza mediante molinos. Posteriormente, se inyecta dentro del horno mediante una corriente de aire caliente a alta velocidad, y, estando en suspensión, se quema a una temperatura de  $1.500 \pm 200^\circ\text{C}$ , que está por encima del punto de fusión de la mayoría de los minerales presentes. Durante este proceso las partículas inorgánicas no sufren una combustión completa, y se producen partículas de ceniza. Las reacciones que se originan dependen no solamente de la temperatura en el hogar, sino también del tipo de carbón, de la finura de molido y de la permanencia en la zona caliente del hogar.

La producción de energía eléctrica a partir de centrales termoeléctricas que emplean carbón (antracita pulverizada u otros carbones bituminosos) como combustible, origina fundamentalmente

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 3.1	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>CENIZAS VOLANTES DE CARBÓN Y CENIZAS DE HOGAR O ESCORIAS</b>		

dos tipos de residuos: las cenizas volantes y las cenizas de hogar o escorias. Las partículas más finas (cenizas volantes) se obtienen por precipitación mecánica o electrostática del polvo en suspensión comprendido en los gases procedentes de la combustión, mientras que las más gruesas caen al fondo, recolectándose como cenizas de hogar. Las cenizas volantes constituyen típicamente el 80% del total de la ceniza, correspondiendo el 20% restante a cenizas de hogar o de fondo. El total en peso de las cenizas volantes producidas en centrales térmicas es aproximadamente del 30% de la masa de carbón consumida.

Los distintos tipos de carbón y quemadores que se emplean en estos procesos dan lugar a diferentes calidades de ceniza volante, algunas de las cuales, debido especialmente a sus propiedades puzolánicas, han demostrado ser útiles en la fabricación de hormigón. También influyen en otras propiedades del hormigón fresco y endurecido, particularmente en la demanda de agua (positiva o negativamente), el tiempo de fraguado (incrementándolo) y la resistencia a edades tempranas (mayor reducción relativa que a edades tempranas).

También pueden ser utilizadas las cenizas volantes obtenidas de la combustión de carbones subbituminosos, bajo criterios nacionales, siempre que el contenido total de CaO sea menor del 10% en peso y que satisfaga las demás especificaciones de la norma UNE –EN 450:1995

En cuanto a los tipos de centrales, las de combustión de carbón en lecho fluido, producen unas cenizas que pueden alcanzar tamaños más finos que las de las centrales convencionales hasta tamaños de arena. En el caso de las centrales térmicas con planta desulfuración, en las que se queman carbones con un contenido de azufre más elevado que en las centrales convencionales, se obtienen cenizas de características diferentes según el tipo de carbón quemado.

## **2.- VOLUMEN Y DISTRIBUCIÓN**

En el año 2005 la producción total de cenizas y escorias generadas en las 19 centrales térmicas de carbón fue de 7.524 kt, de las cuales, 6.388 kt correspondieron a cenizas volantes (85% del total) y 1.136 kt (el 15% restante) a cenizas del hogar y escorias de caldera.

En las últimas décadas, esta producción viene siendo inferior a los 10 Millones de toneladas por año con una clara tendencia decreciente, si bien en los últimos años se aprecia una cierta estabilización de la misma. Así, en el año 1984 se produjeron un total de 9.130 kt de cenizas, en 1997 fueron 8.059 kt y en los años 2004 y 2005 se han producido 7.464 y 7.524 kt respectivamente.

El volumen de cenizas y escorias que tuvieron en España durante 2005 una utilización con valorización en construcción y carreteras fue de 4.329 kt, lo que representa una utilización del 58% del total de las cenizas y escorias generadas.

El sector cementero es, con gran diferencia, el principal consumidor de las cenizas y escorias, absorbiendo en 2005 la cifra de 4.021 kt (el 93% del total consumido), mientras que el 7% restante se utilizó principalmente en hormigón y carreteras.



<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 3.1	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>CENIZAS VOLANTES DE CARBÓN Y CENIZAS DE HOGAR O ESCORIAS</b>		

En Europa (UE15) la producción de cenizas y escorias en el año 2004 ascendió a 49.316 kt, de las cuales 43.476 correspondieron a cenizas volantes (el 88% del total) y, 5.840 kt (el 12% restante) a cenizas de hogar y escorias. La utilización total de cenizas y escorias con valorización en construcción y carreteras en dicho año ascendió a 24.311 kt, lo que representa un 49%.

En la tabla siguiente (Tabla 1) se recogen los datos correspondientes a 1999 y 2004:

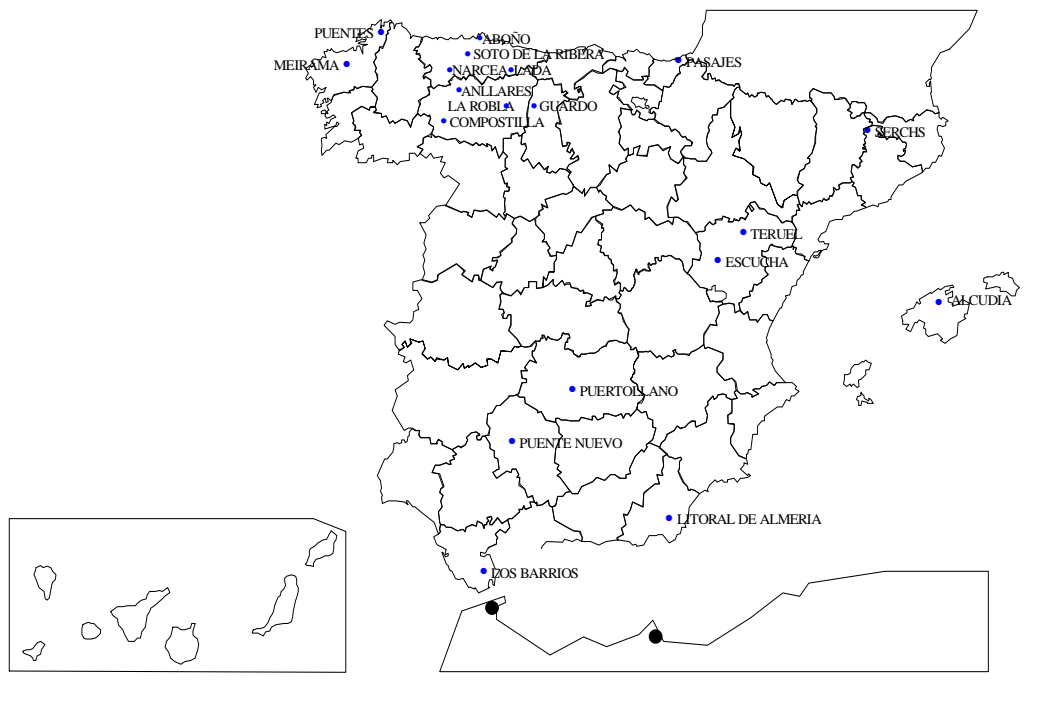
		1999				2004			
		ESPAÑA <sup>(1)</sup>		EUROPA <sup>(2)</sup>		ESPAÑA <sup>(1)</sup>		EUROPA <sup>(2)</sup>	
		kt	%	kt	%	kt	%	kt	%
<b>Producidas</b>	Cenizas volantes	6.654	84,3	37.144	85	-	-	43.476	88
	Cenizas hogar	1.236	15,7	5.622	15	-	-	5.840	12
	<b>TOTAL</b>	<b>7.890</b>	<b>100</b>	<b>43.654</b>	<b>100</b>	<b>7.464</b>	<b>100</b>	<b>49.316</b>	<b>100</b>
<b>Valorizadas</b>	Cenizas volantes	-	-	-	-	-	-	22.016	51
	Cenizas hogar	-	-	-	-	-	-	2.295	39
	<b>TOTAL</b>	<b>3.114</b>	<b>39,5</b>	<b>20.669</b>	<b>55,6</b>	<b>4.329</b>	<b>58</b>	<b>24.311</b>	<b>49</b>

**Tabla 1:** Datos de producción y valorización de cenizas volantes y de hogar en España y Europa.

**CENIZAS VOLANTES DE CARBÓN Y CENIZAS DE HOGAR O ESCORIAS**

**LEYENDA**

•Centrales termoeléctricas



**3.- VALORIZACIÓN**

**3.1.- PROPIEDADES**

**3.1.1. Las cenizas volantes**

***Propiedades físicas***

Las cenizas volantes secas suelen presentarse como una arena o polvo muy fino, suave al tacto y de un color gris más o menos claro, según la proporción de hierro y carbón sin quemar. Sus características físicas y propiedades dependen de múltiples factores entre los que cabe resaltar: la composición química de los componentes del carbón, el grado de pulverización, el tipo de caldera, la temperatura de combustión, el sistema por el cual las cenizas son retiradas de la central. Así, se pueden distinguir básicamente tres grupos: las cenizas convencionales procedentes de central térmica, las obtenidas en centrales de lecho fluido y las procedentes de centrales con planta d desulfuración.

La finura media de las cenizas volantes brutas, es decir, sin moler, es comparable a la del cemento portland ordinario y su tamaño de grano oscila entre 0,2 y 200 micras de diámetro, llegando en casos excepcionales a valores de hasta 500 micras. La densidad de conjunto es aproximadamente de 0,89 g/cm<sup>3</sup> y el peso específico de las partículas oscila entre 2,0 y 2,9 g/cm<sup>3</sup>.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 3.1	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>CENIZAS VOLANTES DE CARBÓN Y CENIZAS DE HOGAR O ESCORIAS</b>		

El contenido de humedad depende de la forma en que éstas se depositen después de abandonar los filtros y precipitadores. Cuando se quieren aprovechar estas cenizas deben recogerse a la salida de los filtros, a fin de que su contenido de agua sea mínimo.

En cuanto a las cenizas procedentes de centrales de lecho fluido, también tienen forma pulverulenta, con partículas de tipo plano más bien lajosas, con una granulometría comprendida entre 0,5 y 315 micras. La superficie específica es alta, 200 m<sup>2</sup>/Kg, similar a la de los cementos.

### **Propiedades químicas**

La composición química de las cenizas volantes es muy variable. En general poseen los siguientes componentes: en mayor proporción: sílice (SiO<sub>2</sub>), alúmina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), óxidos de hierro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), cal (CaO) y carbón; en menor proporción, generalmente menor del 5% en peso: magnesia (MgO), óxido de azufre (SO<sub>3</sub>), alcalinos (Na<sub>2</sub>O y K<sub>2</sub>O), y, otros constituyentes en cantidades aún más reducidas, como compuestos de titanio, vanadio, manganeso, fósforo, germanio, galio, etc.

Según su composición química, y atendiendo a la procedencia del carbón de origen, las cenizas volantes pueden clasificarse en: silicoaluminosas (con contenidos en CaO inferiores al 10%, clase F según norma ASTM C618); son las más importantes en cuanto a cantidades producidas y aprovechadas, las cenizas sulfocálcicas (con contenidos de CaO por encima del 20%, clase C según norma ASTM C618) y las silicocalcáreas.

Las silicoaluminosas tienen propiedades ligantes en presencia de activadores de su puzolanidad (se utiliza cal o cemento);son también hidrofílicas y tienen propiedades puzolanicas. Tienen un contenido de cal total < 10%, los óxidos más importantes son la sílice (SiO<sub>2</sub>), la alúmina, (Al<sub>2</sub> O<sub>3</sub>) y óxidos de hierro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>). El pH es netamente básico y puede ser superior a 10

Las cenizas resultantes de la combustión en lecho fluido suelen ser más finas que las cenizas de central térmica, lo que, unido a su porcentaje de cal, superior al de las silico aluminosas convencionales, hace que puedan tener propiedades conglomerantes (actividad hidráulica).

En la tabla 2 se recogen los porcentajes medios de los compuesto que aparecen en las cenizas con alto contenido de calcio y en las cenizas con un bajo contenido de calcio.

**CENIZAS VOLANTES DE CARBÓN Y CENIZAS DE HOGAR O ESCORIAS**

Compuesto	Cenizas con alto contenido de calcio	Cenizas con bajo contenido de calcio
SiO <sub>2</sub>	34,1	42,6-59,8
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14,2	21,8-34,5
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,2	6,3-18,1
CaO	38,0	2,8-7,0
SO <sub>3</sub>	4,2	0,19-1,9
MgO	1,5	1,2-2,6
K <sub>2</sub> O	1,4	0,38-6,0
Na <sub>2</sub> O	0,44	0,15-0,94
Sílice reactiva	30,9	0,94
Cal libre	17,1	Inapreciable-0,74
Carbono total	0,34	0,27-3,9

**Tabla 2:** Porcentajes medio de los compuestos en cenizas con alto y bajo contenido de cal.

De las diecinueve centrales termoeléctricas españolas que utilizan carbón como combustible, sólo dos producen cenizas con alto contenido en cal. Los minerales más importantes que se suelen encontrar en las cenizas volantes son: mullita ( $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ ), cuarzo (SiO<sub>2</sub>), magnetita (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>), hematitas (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), wustita (FeO), goehita (FeO-OH), pirita (S<sub>2</sub>Fe), calcita (CO<sub>3</sub>Ca), anhidrita (SO<sub>4</sub>Ca), periclusa (MgO) y óxido de calcio libre (CaO).

### **Actividad hidráulica**

Para que una ceniza posea una capacidad hidráulica suficientemente buena (aptitud para endurecerse en presencia de agua o humedad), ha de poseer un índice de hidráulica comprendido entre 0,15 y 0,40. Este índice se define como la relación existente entre la sílice más la alúmina y óxidos de hierro, y la cantidad de cal más magnesia.

Esta propiedad la presentan las cenizas volantes de alto contenido en cal que proceden generalmente de las centrales térmicas que queman lignitos.

### **Actividad puzolánica**

Se define la actividad puzolánica de un material como la capacidad de fijar hidróxido cálcico, a la temperatura ordinaria, en presencia de agua, originando productos sólidos, insolubles y dotados de resistencia mecánica.

Esta actividad puzolánica es la propiedad más importante de las cenizas silicoaluminosas, que es mayor que en muchas puzolanas naturales y artificiales y depende del contenido en material

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 3.1	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>CENIZAS VOLANTES DE CARBÓN Y CENIZAS DE HOGAR O ESCORIAS</b>		

silico-aluminoso soluble. Esta es una de las principales razones para su empleo en hormigón, pues las cenizas son capaces de reaccionar con el hidróxido cálcico ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) liberado en la reacción de hidratación del cemento portland.

### 3.1.2. Las cenizas de hogar o escorias<sup>(7)(8)</sup>

#### **Propiedades físicas**

Las cenizas de hogar o escorias están formadas por partículas angulares con textura superficial muy porosa. El tamaño de las partículas de escoria varía entre el de una grava fina y una arena fina, con bajo porcentaje de finos; generalmente se trata de un material bien graduado con predominio del tamaño arena.

El peso específico de las cenizas de hogar es función de su composición química; disminuye al aumentar el contenido de carbón, con valores típicos entre 2,1 y 2,7 g/cm<sup>3</sup>. Las partículas con bajo peso específico tienen una textura vesicular que hace que se degraden rápidamente bajo la acción de las cargas.

#### **Propiedades químicas**

La composición química de las cenizas de hogar es muy parecida a las de las cenizas volantes y, depende fundamentalmente del tipo de carbón utilizado.

### 3.2.- PROCESADO

El procesado de las cenizas dependerá de la aplicación a la que sean destinadas.

Para la fabricación de cemento u hormigón, no será necesario someterlas a ningún tratamiento, aunque se pueden someter a un proceso de molienda previo que conduce a un material más homogéneo.

Para su empleo como material de rellenos y terraplenes tampoco se requiere en principio ningún procesado especial del material. Sin embargo, si se quieren utilizar las cenizas volantes como áridos ligeros, se requiere dos procesos fundamentales: aglomeración y endurecimiento. La aglomeración se puede conseguir por agitación, granulación o compactación; mientras que los métodos más usuales para conseguir el endurecimiento son: la sinterización (que requiere temperaturas superiores a 900°C), método hidrotérmico (temperaturas entre 100-200°C en presencia de agua) y en frío (con temperaturas inferiores a 100°C).

La utilización de cenizas de hogar en capas de firmes requiere su cribado para eliminar las partículas de tamaño excesivo, y la eliminación mediante electroimanes de la pirita que puedan contener.

### 3.3.- PROPIEDADES DEL MATERIAL PROCESADO

#### 3.3.1. Las cenizas volantes

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 3.1	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>CENIZAS VOLANTES DE CARBÓN Y CENIZAS DE HOGAR O ESCORIAS</b>		

Como ya se ha apuntado anteriormente, sólo en el caso de cenizas volantes para la fabricación de áridos ligeros se requiere un tratamiento posterior del residuo, por lo que en esta sección únicamente se consideran las propiedades de los áridos ligeros.

**Propiedades físicas<sup>(7)(10)(11)</sup>**

Las propiedades de los áridos ligeros obtenidos a partir de las cenizas volantes dependen de la temperatura a la que se haya realizado el endurecimiento. Cuando éste se realiza a temperatura alta, la densidad de conjunto del árido ligero obtenido con cenizas volantes suele estar comprendido entre 800 y 900 kg/m<sup>3</sup>, mientras que la densidad real varía entre 1.350 y 1.650 kg/m<sup>3</sup>. Su alta relación de huecos, generalmente 40%, confiere al árido un buen comportamiento frente a los ciclos hielo-deshielo. Cuando la temperatura es inferior<sup>(23)</sup>, la densidad es menor alcanzándose valores de hasta 980 kg/m<sup>3</sup>. En España se está fabricando árido ligero con cenizas volantes<sup>(11)</sup>, mediante el proceso en frío con temperaturas próximas a 100°C. Se obtienen varias fracciones (2-4 mm, 4-8 mm, y 8-16 mm normalmente) con unas propiedades que aparecen resumidas en la siguiente tabla 3:

DETERMINACIÓN	FRACCIÓN 4/8 mm	FRACCIÓN 8/16 mm
Contenido de finos (%)	1,9	1,8
Terrones de arcilla (%)	No contiene	-
Material que flota (%)	(*)	-
Reactividad alcalina	No reactivo	-
Absorción de agua (%)	23,1	19,9
Compuestos totales de azufre (% SO <sub>3</sub> )	0,20	-
Sulfatos solubles en ácido (%SO <sub>3</sub> )	0,20	-
Contenido de cloruros (%)	3,5x10 <sup>-4</sup>	-
Coefficiente de desgaste de los Ángeles	43	-
Pérdida por calcinación	4,83%	-
Densidad real (kg/m <sup>3</sup> )	1,096	1,076
Densidad de conjunto (kg/m <sup>3</sup> )	956	977

(\*)prácticamente la totalidad del material flota en un líquido de 2 kg/dm<sup>3</sup> de densidad.

**Tabla 3:** Propiedades de las fracciones 4-8 mm, y 8-16 mm

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 3.1	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>CENIZAS VOLANTES DE CARBÓN Y CENIZAS DE HOGAR O ESCORIAS</b>		

### 3.3.2. Las cenizas de hogar<sup>(7)</sup>

Ensayos realizados con cenizas de hogar para caracterizarlas de cara a su empleo en carreteras, muestran los siguientes valores representativos de las mismas:

- Máxima densidad seca: 1210-1620 Kg/m<sup>3</sup>
- Humedad óptima: 12-24 (%)
- Desgaste Los Angeles: 30-50 (%)
- Pérdida a los sulfatos: 1,5-10 (%)
- Angulo de rozamiento interno: 38°-42° (<9,5 mm: 32°-45°)
- CBR: 40-70 (%)
- Coeficiente de permeabilidad: 10<sup>-2</sup>-10<sup>-3</sup> (cm/s)

## 3.4.- APLICACIONES

### 3.4.1. Las Cenizas volantes

Son muchas y diversas las aplicaciones de las cenizas volantes, fundamentalmente en el ámbito de la construcción. La Asociación Europea para el empleo de los sub-productos de la combustión del carbón (ECOBA) <sup>(3)</sup> publica cada año una estadística en la que recoge los datos sobre la producción de cenizas volantes en Europa y su empleo según las diferentes aplicaciones.

En la tabla 4 se han recogido los porcentajes de cenizas utilizados en el año 2004 en Europa, según las distintas aplicaciones consideradas en la presente ficha técnica, teniendo en cuenta que en dicho año se obtuvieron 43.476kt de cenizas volantes y, que existen otras aplicaciones con valorización distintas del ámbito de la construcción, entre las que cabe mencionar la restauración y recuperación de suelos :

Aplicaciones en Europa		kt utilizadas	% utilizado
Edificación y puentes	Cemento	8.155	37,0
	Hormigón	5.871	26,7
	Bloques de hormigón prefabricado	1.556	7,1
	Áridos ligeros	1418	0,6
	Ladrillos	97	0,4
Aplicaciones en Europa		kt utilizadas	% utilizado
Terraplenes y rellenos		2.685	7,2
Carreteras		1.243	3,3
<b>TOTAL</b>		<b>16.595</b>	<b>44,7</b>

**Tabla 4:** Porcentajes de cenizas utilizados según las aplicaciones recogidas en la presente ficha en el año 2004 en Europa.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 3.1	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>CENIZAS VOLANTES DE CARBÓN Y CENIZAS DE HOGAR O ESCORIAS</b>		

### 3.4.1.1. Carreteras

#### **Fabricación de grava con ceniza y cal para capas de base y subbase<sup>(19)(26)(27)</sup>**

Las cenizas silicoaluminosas se emplean en la fabricación de grava con ceniza y cal para capas de base. El procedimiento es el siguiente: los áridos machacados se mezclan en una central con un 8-12 % de ceniza, 2-3% de cal apagada y 5-7% de agua; la mezcla se extiende y se compacta por los métodos habituales, endureciendo lentamente hasta conseguir unas resistencias similares a la que presentan los firmes construidos con conglomerantes hidráulicos como el cemento.

Las mejores resistencias se obtienen con áridos de naturaleza caliza. A largo plazo (un año), se alcanzan resistencias a compresión muy elevadas, hasta 20 MPa, sin embargo, durante el primer mes, las resistencias y rigidez se mantienen bajas. La superficie de la capa se debe sellar para evitar la pérdida rápida de humedad de la mezcla y, para permitir, con una pequeña adición de árido fino de cubrición, el paso de vehículos.

Las cenizas sulfocálcicas también se emplean en la fabricación de grava con cenizas para capas de base. El árido machacado se mezcla en central con un 5,5% de ceniza y 5,5 a 6,5% de agua se extiende y se compacta. Las resistencias a largo plazo están entre 15 y 18 MPa. Tienen el inconveniente de que pueden presentar fenómenos de expansiones e hinchamientos.

Las bases realizadas con grava-ceniza-cal presentan notables ventajas; se resaltan:

- La gran facilidad de compactación a causa del efecto lubricante de los granos de ceniza.
- Un endurecimiento lento con bajas rigideces a corto plazo.
- Reducción del agrietamiento ocasionado por asientos diferenciales y retracciones térmicas, producidos fundamentalmente a corto plazo.
- Posibilidad de apertura al tráfico inmediatamente después de ser compactada.

#### **Cenizas volantes como filler en las mezclas bituminosas**

En varios países de Europa, entre ellos España se han utilizado las cenizas volantes como filler en las mezclas bituminosas. Las cantidades de cenizas utilizadas en esta aplicación han sido bastante pequeñas debido a la gran variedad de filleres existentes y a la cantidad de filleres naturales que se obtiene a partir de los áridos.

El filler de ceniza volante generalmente satisface la normativa existente, pero es necesario adaptar las dosificaciones de las mezclas a las propiedades físicas específicas de las cenizas.



<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 3.1	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>CENIZAS VOLANTES DE CARBÓN Y CENIZAS DE HOGAR O ESCORIAS</b>		

### 3.4.1.2. Edificación y obra pública

#### Fabricación de cemento

#### Fabricación de cemento

La fabricación de cemento es uno de los campos más amplios para la utilización de cenizas volantes en España ya que produce un ahorro económico y energético considerable y, permite la obtención de cementos de aplicación específica en determinados ambientes y tipos de obras.

Según la RC-08<sup>(15)</sup>, se emplean cenizas volantes en mayor o menor proporción en los siguientes tipos de cementos, que figuran en el cuadro adjunto. Estos cementos permiten obtener hormigones y morteros de una impermeabilidad muy alta. Además, tienen bajo calor de hidratación y presentan buena resistencia a las aguas agresivas. Los cementos con cenizas volantes tienen un poder de retención de agua muy alto y comunican a los morteros y hormigones una gran plasticidad, que se opone a la segregación y, además, facilita su manejabilidad.

Por todo esto, se suelen emplear en suelos selenitosos, aguas sulfatadas, aguas de mar, cloradas, aguas residuales e industriales, etc.

La utilización de los cementos comunes que incorporan cenizas volantes en hormigón estructural se regula según la Instrucción EHE<sup>(16)</sup>, e incluye unas recomendaciones generales para su utilización. Esta Instrucción permite la utilización de cementos con cenizas, únicamente del tipo CEM II/A-V y CEM III/A-M (V-P), para hormigón pretensado. En la tabla 5 se indican los tipos de cementos que incorporan cenizas según la RC-08 y los rangos admitidos en los contenidos de ceniza.

<b>Cementos comunes</b>	Cemento Portland con cenizas volantes	CEM II/A-V	6 a 20%	Cenizas volantes silíceas
		CEM II/B-V	21 a 35%	
		CEM II/A-W	6 a 20%	Cenizas volantes calcáreas <sup>(*)</sup>
		CEM II/B-W	21 a 35%	
	Cemento Portland Mixto	CEM II/A-M	6 a 20%	Escorias horno alto, humo de sílice ≤10%, puzolana (natural y calcinada), cenizas volantes (silíceas y calcáreas), esquistos calcinados y caliza.
		CEM II/B-M	21 a 35%	
	Cemento Pozolánico	CEM IV/A	11 a 35%	Humo de sílice ≤10%, puzolana natural y cenizas volantes
		CEM IV/B	36 a 55%	
Cemento Compuesto	CEM V/A	18 a 30%	Puzolana (natural y calcinada) y cenizas volantes silíceas	
	CEM V/B	31 a 50%		
<b>Cementos especiales</b>	Cemento para usos especiales	ESP VI-1	45 a 75%	Escorias horno alto, puzolana natural ≤ 40% y cenizas volantes

<sup>(\*)</sup> Estos cementos no se recomiendan por la Instrucción EHE para su aplicación en hormigón estructural.

**Tabla 5:** Tipos de cementos que incorporan cenizas según la RC-08.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 3.1	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>CENIZAS VOLANTES DE CARBÓN Y CENIZAS DE HOGAR O ESCORIAS</b>		

### **Fabricación de hormigón<sup>(17)(18)</sup>**

- Elemento activo

La adición de cenizas volantes permite una reducción de la cantidad de cemento en el hormigón, disminuye la generación de calor dentro de la masa del hormigón, por lo que los gradientes de temperatura son más pequeños, y se reduce el peligro de fisuración superficial. Da lugar a una segregación de áridos menor, disminuye la exudación, es más resistente al ataque por sulfatos y al agua de mar, siendo además, mucho más trabajable.

La resistencia del hormigón con cenizas volantes es más baja que la del hormigón sin adición a edades tempranas, pero con el tiempo, las resistencias se van aproximando, llegando incluso a ser superior la resistencia a largo plazo del hormigón con cenizas volantes.

El empleo de este hormigón tiene amplias posibilidades en la construcción de presas, puentes, carreteras, etc.

Uno de los inconvenientes de este tipo de hormigón, es que el fraguado es más lento. Esto es un problema en los casos en que se requiera rapidez de endurecimiento.

Existen diferentes estudios sobre hormigones con alto contenido en cenizas volantes (entre un 40% a un 80% del peso total del material conglomerante, cemento+cenizas). Los usos de este material se han extendido en la actualidad a la construcción de bases y pavimentos de carreteras, presas y ciertas aplicaciones estructurales.

En estructuras de edificación, la cantidad máxima de cenizas volantes que permite la Instrucción de Hormigón Estructural (EHE) no debe exceder del 35% del peso del cemento, debiéndose utilizar cemento tipo CEM I. Esta Instrucción permite la adición simultánea de cenizas volantes y humo de sílice, siempre que el porcentaje de humo de sílice no sea superior al 10% y que el porcentaje total de adiciones (cenizas volantes y humo de sílice) no sea superior al 20%, en ambos casos respecto al peso del cemento. En este caso la ceniza volante sólo se contempla a efecto de mejorar la compacidad y reología del hormigón, sin que se contabilice como parte del conglomerante mediante su coeficiente de eficacia K. Se tomará el valor de K no superior a 0,20 si se emplea un CEM I 32,5, ni superior a 0,40 en el caso de cementos CEM I con otras categorías resistentes superiores. La Dirección Facultativa podrá admitir, bajo su responsabilidad, valores superiores del coeficiente de eficacia pero no mayores de 0,65, siempre que sello se deduzca como una estimación centrada en mediana del valor característico real, definido como el cuantil del 5 % de la distribución de valores de K:

En hormigón pretensado podrá emplearse adición de cenizas volantes cuya cantidad no podrá exceder del 20% del peso de cemento.

- Elemento inerte

En este caso las cenizas volantes se utilizan en estado bruto, secas o húmedas, para sustituir parte de los áridos del hormigón.

En este tipo de utilización, la composición de la ceniza volante no tiene una importancia decisiva,

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 3.1	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>CENIZAS VOLANTES DE CARBÓN Y CENIZAS DE HOGAR O ESCORIAS</b>		

pues lo que verdaderamente importa es su finura, ya que dicha propiedad aumenta la plasticidad de los hormigones y las resistencias mecánicas en las mezclas pobres de cemento portland, al mismo tiempo que disminuye la porosidad de los hormigones, evitando también la segregación.

En general se puede decir que, dado el fino tamaño de grano de los áridos de las cenizas volantes, pueden usarse como árido, para complementar la granulometría del hormigón, y hacerla así más continua, teniendo también la ventaja de disminuir considerablemente la permeabilidad del hormigón, sobre todo en estado plástico.

- Efectos de las cenizas volantes en el hormigón:
  - *Fraguado:* la incorporación de cenizas volantes al hormigón, en general, aumenta los tiempos iniciales y finales de fraguado.
  - *Trabajabilidad:* reduce la cantidad de agua necesaria para obtener una docilidad equivalente a la de un hormigón sin cenizas, produce un aumento de plasticidad y una mayor cohesión.
  - *Exudación:* generalmente se reduce la exudación, debido al aumento de finos y al menor contenido de agua.
  - *Aptitud para el bombeo:* se consigue un aumento en la aptitud para el bombeo; el uso de cenizas como árido suplementario hace al hormigón más cohesivo y con menos tendencia a la segregación y exudación.
  - *Calor de hidratación:* la sustitución parcial de cemento por cenizas reduce el calor generado durante el proceso de hidratación del cemento.
  - *Resistencias mecánicas:* su uso produce un retardo en las resistencias iniciales pero iguala o aumenta las resistencias a edades posteriores.
  - *Protección de las armaduras:* siempre que se tomen las medidas adecuadas, el hormigón no planteará problemas respecto a la corrosión de las armaduras.
  - *Resistencia a los sulfatos:* el uso de cenizas volantes en el hormigón aumenta su resistencia al ataque de los sulfatos, aunque en las condiciones más severas de exposición, se requerirá el uso de cemento portland resistente a los sulfatos.
  - *Reacción álcali-sílice:* el uso de adecuadas cantidades de cenizas volantes puede reducir la reacción con los áridos y disminuir o eliminar la expansión nociva del hormigón.

#### **Fabricación de áridos ligeros<sup>(9)(10)(20)</sup>**

Otra vía de aplicación de las cenizas volantes es la fabricación de áridos ligeros, cuya fabricación y utilización está extendida en numerosos países como Estados Unidos, Canadá, Inglaterra o Japón. En España ha entrado recientemente en funcionamiento una planta en Andorra (Teruel).

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 3.1	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>CENIZAS VOLANTES DE CARBÓN Y CENIZAS DE HOGAR O ESCORIAS</b>		

Las características del árido dependen del proceso de fabricación y de la temperatura a la que se realice el endurecimiento. Las cenizas más adecuadas para el proceso de sinterización son las que tienen un alto contenido en carbón.

Los áridos ligeros así obtenidos son muy interesantes a pesar de su forma redondeada, pues gracias a su superficie rugosa y porosidad, se adhieren bien al mortero con cemento. Se ha comprobado también que poseen propiedades puzolánicas superiores a las de las cenizas volantes sin sinterizar, por lo que la actividad del producto manufacturado es superior a la del bruto.

Los áridos ligeros fabricados a partir de cenizas volantes sinterizadas son susceptibles de emplearse en hormigón en las siguientes aplicaciones: fabricación de hormigón aislante bajo cubiertas, rellenos, confección de elementos prefabricados de módulos diversos, hormigón estructural, etc.

Los áridos sinterizados permiten fabricar hormigones densos o sin finos con dosificaciones que varían de 125 a 210 kg. de cemento por metro cúbico, con una densidad comprendida entre 1 y 1,7 T/m<sup>3</sup> y la resistencia a compresión entre 45 y 350 kp/cm<sup>2</sup>.

Los hormigones con áridos obtenidos en procesos en frío pueden presentar elevadas resistencias (hasta 410 kp/cm<sup>2</sup> a los 7 días) aunque con un mayor contenido de cemento (400 kg/m<sup>3</sup>).

La utilización del árido ligero en el hormigón estructural y en bloques prefabricados disminuye el peso propio de los edificios, aunque disminuye la resistencia del hormigón y su durabilidad a igual dosificación en cemento.

### ***Fabricación de productos cerámicos***

Los ladrillos cara vista, que usualmente se fabrican a partir de una mezcla de arcillas plásticas y arena, que actúa como desgrasante, pueden ser fabricados usando cenizas volantes. Generalmente se sustituye parte de la arcilla plástica por las cenizas, aunque también existen estudios sobre la utilización de cenizas volantes como materia prima única en la elaboración de ladrillos, llegando a proporciones de cenizas volantes del 90%.

Las principales ventajas que ofrece el uso de cenizas volantes en la fabricación de ladrillos son las siguientes:

- Requieren menos cantidad de agua de amasado,
- La velocidad de secado es mayor,
- La cocción es más rápida,
- La porosidad es menor
- Se produce un ahorro energético y de materias primas

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 3.1	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>CENIZAS VOLANTES DE CARBÓN Y CENIZAS DE HOGAR O ESCORIAS</b>		

Sin embargo hay que tener en cuenta que los ladrillos así obtenidos presentan menor resistencia (pudiéndose alcanzar resistencias a compresión de hasta 20 N/mm<sup>2</sup> cuando se reemplaza el 50% de la arcilla), mayor absorción, menor resistencia a las heladas y pueden dar origen a problemas de eflorescencias. La calidad de los ladrillos con cenizas volantes decae rápidamente al descender la temperatura de cocción, por lo que deberá ser controlada muy estrictamente para garantizar la calidad del producto.

En la actualidad existen fábricas en diversos países que producen ladrillos con cenizas volantes a escala industrial, especialmente en Gran Bretaña, Canadá e Italia.

Aunque en nuestro país no se fabrican este tipo de ladrillos, se ha realizado un estudio sobre la viabilidad de la obtención de ladrillos a partir de cenizas volantes procedentes de una de las centrales térmicas españolas. Según este estudio<sup>(17)</sup> se podrían utilizar las cenizas como materia prima única en los ladrillos (con adición de un ligante y lubricante, que podrían ser dextrina blanca y polvos de talco respectivamente). Con temperaturas de cocción superiores a 1.000°C se obtienen piezas que cumplen las especificaciones requeridas por la Norma Básica de Edificación en cuanto a: resistencia a compresión, absorción de agua, succión, contracción, heladicidad y eflorescencia, pudiendo alcanzar los valores que aparecen en la siguiente tabla 6:

<b>PROPIEDADES DE LOS LADRILLOS (92% de cenizas volantes, temperatura de cocción de 1.000°C y presión de conformado de 15,6 MPa)</b>	
Resistencia a compresión	19 N/mm <sup>2</sup>
Absorción	4%
Succión	0,1 g/cm <sup>2</sup>
Heladicidad	No heladizas
Eflorescencia	Pequeñas eflorescencias
Coloración	Rojiza

**Tabla 6:** Propiedades de los ladrillos según Norma Básica de Edificación

### 3.4.1.3 Terraplenes y obras de tierra<sup>(21)(22)(23)</sup>

La utilización de cenizas volantes para la construcción de terraplenes y otros rellenos compactados y controlados para carreteras y ferrocarriles se considera una buena solución técnica, aunque de escaso valor pues se infrautilizan las cenizas.

Hay experiencias de terraplenes realizados con cenizas silicoaluminosas que presentan algunas ventajas sobre los terraplenes convencionales tales como: poco peso, menor compresibilidad con respecto a otros suelos (con lo que se reducen los asientos diferenciales), buena capacidad soporte y propiedades de autoendurecimiento de algunas cenizas.

Como material compactado, las cenizas tienen un peso unitario que es un 70%-80% más bajo que el de la mayoría de los suelos, lo que permite la utilización de este material con ventajas sobre

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 3.1	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>CENIZAS VOLANTES DE CARBÓN Y CENIZAS DE HOGAR O ESCORIAS</b>		

otros convencionales en rellenos ligeros, pudiéndose considerar que tiene un mejor comportamiento que los suelos naturales finos, siempre que se adopten las condiciones necesarias de puesta en obra.

También se han empleado para rellenos en suelos compresibles. En este caso, pueden perder capacidad portante por un exceso de agua, siendo necesario un correcto ajuste de la humedad.

Como desventajas se debe señalar que no están indicadas en zonas inundables, dado que son hidrofílicas y con ascensos capilares notables por lo que es recomendable interponer una capa de material permeable si hay riesgo de elevación del nivel freático. Deben ser compactadas con neumáticos, siendo muy desaconsejable los rodillos vibrantes, por el riesgo de repentinas pérdidas de capacidad portante.

Otro inconveniente que presenta este material es la variabilidad de sus características que lo hacen muy difícil de considerar como material homogéneo. Normalmente, para una misma obra hay que contar con varias partidas de cenizas volantes cuyas características de compactación, en cuanto a humedad óptima y densidad seca, suelen ser notablemente diferentes. Cada ceniza deberá compactarse en estos casos con una humedad próxima al óptimo correspondiente.

Además, las superficies de este material compactado pueden erosionarse con el agua y con el viento. El viento causa problemas no sólo en las cenizas ya puestas en obra, sino también, durante los procesos de transporte, acopio, extendido y compactación. El tamaño de las partículas y la ausencia de cohesión real son las razones de la susceptibilidad a la erosión de este material.

Las cenizas son muy apropiadas para la realización de tierra armada, por su reducido peso específico, a la vez que su naturaleza cohesivo-friccional induce reducidas presiones laterales, especialmente en la parte superior del muro de contención. La potencial agresividad a los elementos de refuerzo puede ser neutralizada mediante el empleo de materiales no metálicos, debiéndose no obstante tener en cuenta los parámetros correspondientes (resistividad, pH y contenido en sales solubles)

Otras posibles aplicaciones para las cenizas volantes dentro del ámbito de las obras de tierra son:

- Los rellenos compactados de cenizas volantes pueden ser aprovechados como presas o diques para depósitos de otros materiales o incluso de las propias cenizas.
- Las cenizas puzolánicas pueden utilizarse en inyecciones junto con pequeñas cantidades de cemento.
- En presas y rellenos de hormigón compactado las cenizas se emplean junto con cemento como conglomerante.
- En la corrección de deslizamientos de ladera y terraplenes de acceso a puentes se pueden emplear cenizas debido a su menor compresibilidad con respecto a otros suelos de modo que se reducen los asientos diferenciales.

### **3.4.2. Las cenizas de hogar o escorias**

Las cenizas de hogar o escorias tienen también algunas aplicaciones con valorización, fundamentalmente en el ámbito de la construcción. La Asociación Europea ECOBA<sup>(3)</sup>, en su

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 3.1	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>CENIZAS VOLANTES DE CARBÓN Y CENIZAS DE HOGAR O ESCORIAS</b>		

estadística anual recoge los datos relativos a la producción europea de cenizas de hogar en Europa y su empleo según las diferentes aplicaciones.

En la tabla 7 se han recogido los porcentajes de cenizas de hogar utilizados en Europa en el año 2004, según las distintas aplicaciones consideradas en la presente ficha técnica, teniendo en cuenta que en dicho año se obtuvieron 5.840 kt de cenizas de hogar y, que existe alguna otra aplicación con valorización distinta del ámbito de la construcción:

Aplicaciones en Europa		kt utilizadas	% utilizado
Edificación y puentes	Cemento	310	13,5
	Hormigón	77	3,3
	Bloques de hormigón prefabricado	947	41,3
	Áridos ligeros	-	0,0
	Ladrillos	21	0,9
Terraplenes y rellenos		557	9,9
Carreteras		357	6,3
<b>TOTAL</b>		<b>2.371</b>	<b>42,2</b>

**Tabla 7:** Porcentajes de cenizas de hogar utilizados según las aplicaciones recogidas en la presente ficha en el año 2004 en Europa.

Como puede verse en la tabla, una de las aplicaciones que consume mayor cantidad de cenizas de hogar es la fabricación de bloques ligeros de hormigón para su empleo en construcción. Esta solución se ha empleado en países como Bélgica, Francia y Países Bajos.

En carreteras se han usado fundamentalmente las escorias como capas granulares para bases en carreteras secundarias y subbases, debido a su insuficiente resistencia y durabilidad, si se comparan con los materiales convencionales utilizados en carreteras.

Las cenizas de hogar pueden contener en su composición piritas que no se hayan eliminado, lo que puede hacerlas volumétricamente inestables y expansivas. Debido al contenido de sal y, en algunos casos, el bajo PH, las escorias pueden ser corrosivas con los elementos metálicos, por lo que debe investigarse este aspecto antes de utilizarlas.

### 3.5. OBRAS REALIZADAS

#### Carreteras<sup>(24 a 27)</sup>:

Hay numerosos ejemplos de utilización de cenizas en la construcción de carreteras recogidos en la bibliografía internacional. En España hay experiencias utilizando las cenizas en rellenos y terraplenes, en estabilización de suelos y en distintas capas del firme, como por ejemplo en la Carretera Sevilla-Granada (1989) y en la N-I Madrid-La Coruña (1987).

#### Rellenos realizados en obras marinas:

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 3.1	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>CENIZAS VOLANTES DE CARBÓN Y CENIZAS DE HOGAR O ESCORIAS</b>		

Rellenos para ganar terreno al mar como por ejemplo en la Bahía de Algeciras junto a la Central térmica de los Barrios. En Asturias también se han hecho rellenos marinos pero poco controlados geotécnicamente. En Dinamarca son destacables numerosas experiencias en rellenos ganados al mar con cenizas volantes.

### **Edificación:**

En las torres “Castor and Pollux”, situadas en Frankfurt, Alemania, se utilizó hormigón con cenizas volantes en diversos elementos de la estructura. Para conseguir una reducción del calor de hidratación en el hormigón de la cimentación se utilizó un hormigón con la siguiente dosificación: 180 kg/m<sup>3</sup> de cemento y 120 kg/m<sup>3</sup> de cenizas volantes. En la zona superior de la cimentación, el contenido de cenizas se redujo a 70 kg/m<sup>3</sup> para conseguir un hormigón con mayor resistencia al desgaste. En los pilares se utilizó hormigón de alta resistencia (130 N/mm<sup>2</sup> a los 90 días), con un contenido de 470 kg/m<sup>3</sup> de cemento, 120 kg/m<sup>3</sup> de cenizas volantes y 35 kg/m<sup>3</sup> de humo de sílice.

En España tenemos el caso de la Torre Picasso de Madrid de 171 m de altura, en la que se empleó hormigón bombeado con adición de cenizas volantes. En este caso, la dosificación de las cenizas fue variando en función de la altura.

En Estados Unidos hay muchos edificios construidos con hormigón de alta resistencia que incorporan cenizas volantes, entre otros se pueden destacar: Water Tower Place (Chicago), construido en 1975 que tiene 262 m de altura; para los pilares se utilizó HAR (60 MPa) empleándose una mezcla con 560 kg/m<sup>3</sup> de material cementoso y un 10% de ceniza; Texas Comerse Tower donde se empleó un total de material cementoso de 620 kg/m<sup>3</sup> y un 20% de él era ceniza (60 MPa). Columbia Certer (Columbia): se emplearon 460 kg/m<sup>3</sup> de material cementoso y un 15% de cenizas (un 20% en peso de cemento), resultando una resistencia de 670 kg/cm<sup>2</sup> en 28 días.

Existen también obras en las que se ha utilizado un mayor porcentaje de cenizas, como es el “Exhibition Complex Construction” en Bangalore, India, en la que se empleó satisfactoriamente un hormigón con un 50% de cenizas volantes para la cimentación y otros elementos estructurales.

### **Puentes:**

Para la construcción del “Great Belt East Bridge” en Dinamarca, se utilizó un hormigón de alta resistencia en el que se empleó una mezcla de cemento, cenizas volantes (47 kg/m<sup>3</sup>) y humo de sílice.

### **Obras realizadas con hormigón con alto contenido en cenizas:**

Una de las primeras aplicaciones estructurales de este tipo de hormigón, fue la construcción de un tanque de petróleo en la central de Didcot (Inglaterra), en el año 1982, con una base circular de hormigón fuertemente armado y un muro perimetral de 4-5 m. de altura. En España no se ha llevado a cabo ninguna aplicación. Sin embargo, es habitual la utilización en estructuras de hormigón armado de cementos que incorporan una cantidad limitada de cenizas (cementos tipo II-V y II-M).



<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 3.1	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>CENIZAS VOLANTES DE CARBÓN Y CENIZAS DE HOGAR O ESCORIAS</b>		

#### **Obras realizadas con hormigón con cenizas como árido:**

En la Central Térmica de Dunkerque (Francia), se sustituyó la escoria por una mezcla de cenizas volantes y escoria molida de horno alto, resultando hormigones de la siguiente composición: 350 kg/m<sup>3</sup> de cemento portland o puzolánico, 75 kg/cm<sup>3</sup> de cenizas volantes secas, 550 kg/cm<sup>3</sup> de arena de escoria básica de horno alto y 1.200 kg/cm<sup>3</sup> de áridos de 10-30 mm., con unas resistencias superiores a las de un hormigón con arena natural.<sup>(7)</sup> También se han utilizado en las torres de refrigeración de la Central Térmica de Ansereuilles.

#### **Confinamiento de residuos:**

Almacenamiento de residuos de baja y media radioactividad utilizando cemento Pórtland como material confinador en El Cabril (Córdoba).

#### **Restauración y rehabilitación:**

Un caso de aplicación de morteros con ceniza volante en obras en España son la obras de conservación y rehabilitación del Jardín "El Capricho" (s. XVIII) en la Alameda de Osuna (Madrid).

#### **Presas:**

En España existe una gran experiencia en la construcción de presas en las que se han empleado cenizas volantes, destacándose en todos los casos el buen comportamiento del material. Cabe destacar la presa de Riaño, en la que se empleó un 39% de cenizas.

#### **Otras construcciones:**

Túnel subterráneo sobre río Elbe (Hamburgo), Esclusa de río en Hamburgo, silos de almacenamiento de cenizas volantes en Genk-Langredo (Bélgica) y central térmica de Schkopav (Dinamarca).

## **4.- CONSIDERACIONES MEDIOAMBIENTALES**

- Generalidades

La Ley 10/1998, de Residuos, de 21 de abril, establecía en su artículo 3 que tendrían consideración de residuos todos aquellos que figurasen en el Catálogo Europeo de Residuos (CER). Este Catálogo fue aprobado por la Decisión 94/3/CE de 20 de diciembre de 1993, y complementado con la Decisión 94/904/CE, ambas aprobadas en el Real Decreto 952/1997.

Las Decisiones Comunitarias 94/3/CE y 94/904/CE han sido derogadas por la Decisión 2000/532/CE mediante la que se aprueba La Lista Europea de Residuos. La orden MAM/304/2002 de 8 de febrero (con corrección de errores de 12 de marzo), publica en su Anejo 2 la mencionada Lista Europea de Residuos.

Las cenizas volantes y cenizas de hogar vienen incluidas en la Lista Europea de Residuos en el

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 3.1	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>CENIZAS VOLANTES DE CARBÓN Y CENIZAS DE HOGAR O ESCORIAS</b>		

Capítulo 10 correspondiente a “Residuos de procesos térmicos” con el siguiente código:

- 10 01 02 Cenizas volantes de carbón
- 10 01 01 Cenizas de hogar, escorias y polvo de caldera

En ambos casos están considerados como residuos no peligrosos.

- Ventajas
  - Su utilización como material de relleno tiene gran importancia por los grandes volúmenes que implican las obras de tierra; por otra parte, permitiría reducir los vertederos de cenizas con la consiguiente mejora del medio ambiente y ahorro económico de acondicionamiento de dichos vertederos.
  - La utilización de cenizas en la fabricación de cementos y hormigones representa, un valor añadido ambiental porque preserva el consumo de recursos naturales o materias primas (tanto en la fabricación del clínker, cementos de adición, como en la sustitución de cemento en hormigones), produce un ahorro energético y un ahorro de producción de emisiones de gases de efectos invernadero, en particular el CO<sub>2</sub>, que ha sido cuantificado por diversos expertos y asociaciones internacionales sectoriales (por ejemplo, en la fabricación del cementos y hormigones).
- Inconvenientes:
  - La principal preocupación durante la vida útil de un material con cenizas volantes es la lixiviación de los metales pesados y los sulfatos. En general con bajos niveles de adición de cenizas volantes no es necesario tomar medidas específicas al respecto.
  - En cuanto a los posibles riesgos sanitarios, se ha visto que el reducido tamaño de las partículas y su contenido en sílice cristalina pueden dar lugar a patologías respiratorias. En Francia, se ha publicado un decreto para la protección de trabajadores expuestos a la inhalación de polvo de naturaleza silíceo. Sin embargo, en su empleo en la construcción de carreteras, como suelen estar húmedas y en ambientes abiertos, se reduce notablemente los riesgos de inhalación. Por otra parte, el contenido de cromo, que pudiera resultar, se presenta en concentraciones muy pequeñas.

## **5.- ASPECTOS ECONÓMICOS**

Las cenizas volantes pueden considerarse un material barato puesto que es el residuo de una actividad industrial que se realiza en cantidades considerables. Su costo principal es el transporte, por lo que en las áreas cercanas a los centros de producción parece claramente indicado su utilización.

Como referencia en España, el coste directo de cenizas volantes como adición para hormigones es de 39,42 euros por tonelada (Construmatica, noviembre 2007).

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 3.1	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>CENIZAS VOLANTES DE CARBÓN Y CENIZAS DE HOGAR O ESCORIAS</b>		

A continuación se muestran algunos precios de los cementos en los que se utilizan cenizas volantes, junto con el precio del cemento común sin adiciones CEM I del año 2007<sup>(31)</sup>.

Tipo de cemento		Denominación	Contenido de cenizas volantes	Precio euro/t
Cemento Pórtland común		<b>CEM I</b>	<b>0%</b>	<b>104,05</b>
Cemento Portland con ceniza volante	Silíceas	CEM II/A-V	6 a 20%	101,21
		CEM II/B-V	21 a 35%	101,21
	Calcáreas	CEM II/A-W	6 a 20%	-
		CEM II/B-W	21 a 35%	-
Cemento puzolánico		CEM IV/A	11 a 35%	116,36
		CEM IV/B	36 a 55%	116,30

**Tabla 8:** Precios de distintos cementos que incorporan cenizas volantes

## 6. NORMATIVA TÉCNICA

- UNE-EN 450-1/2006. "Cenizas volantes para hormigón. Definiciones, especificaciones y criterios de conformidad"
- UNE-EN 998-2:2004 "Morteros de albañilería. Definiciones y especificaciones". 1994
- UNE 83414/1990 EX: "Adiciones al hormigón. Cenizas volantes. Recomendaciones generales para la adición de cenizas volantes a los hormigones fabricados con cemento tipo I".
- UNE 83420/1991 EX: "Adiciones al hormigón. Cenizas volantes. Especificaciones de las cenizas volantes con un contenido en cal superior al 10%"
- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), "Guide for design of pavement structures, Washington, D.C., 1993.
- ASTM C618-92A "Standard Specification for Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as Mineral Admixture in Portland Cement Concrete".
- Manual of Contract Documents for Highway Works, Vol. 1, Specification for Highway Works; Series 0600 "Earthworks", Amendment 2006; Series 0800 "Road Pavements-Unbound, Cement and Other Hydraulically Bound Mixtures" Amendment, 2005; Series 1000 "Road Pavements-Concrete Materials", Amendment 2006.
- Ministerio de Fomento, orden FOM/891/2004, de 1 de marzo, en Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes.
- SETRA, «Réalizations des remblais et des couches de forme emblais en terrassements

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 3.1	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>CENIZAS VOLANTES DE CARBÓN Y CENIZAS DE HOGAR O ESCORIAS</b>		

routiers-Guide technique», 01/09/1992, «Terrassements: remblais et couches de forme», Fiche et note d'information, 01/01/2002. "Assises de chaussées en graves non traitées et matériaux traités aux liants hydrauliques et pouzzolaniques-Guide d'application des normes pour le réseau routier national", 01/12/1998.

- RC-08. "Instrucción para la Recepción de Cementos".
- UNE-EN 197-1. "Cemento. Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes". Diciembre, 2000.

## **7.- REFERENCIAS**

- [1] UNESA (Asociación Española de la Industria Eléctrica). Información facilitada por UNESA.
- [2] ECOBA (European Association for use of the By-products of Coal-Fired Power-Stations) <http://www.ecoba.com>
- [3] OFICEMEN. "Memoria Anual del Sector Cementero Español de 1998".
- [4] ALONSO RAMIREZ, J.L. "Orígenes, tipos y caracterización de las cenizas volantes". Laboratorio Central de Estructuras y Materiales del CEDEX (MOPU), Cuaderno de Investigación C27. 1990.
- [5] ESTUDIO DE LA UTILIZACIÓN DE ADICIÓN DE CENIZAS VOLANTES EN LA FABRICACIÓN DE HORMIGONES. INFORME I, Tomo Único Laboratorio Central de Estructuras y Materiales, (A. Leiro López, dir.), para la Secretaría Gral. Técnica MOPU. Madrid, 1990.
- [6] DE LUXÁN, M.P.; SÁNCHEZ DE ROJAS, M.I.; SORIA, F. "Características de las cenizas volantes españolas". Materiales de Construcción, Vol.38, nº209, p.25-38. 1988.
- [7] Turner-Fairbanks Highway Research Center and FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (FHWA). "User Guidelines for Waste and Byproducts Material in Pavement Construction". 2002.
- [8] LOVELL, C.W., T.C. KE; W.H. HUANG; LOVELL, J.E. "Bottom ash as Highway material", 70<sup>th</sup> Annual Meeting of the Transportation Research Board. Washinton, DC, 1991.
- [9] V.V.A.A. "Las cenizas volantes y sus aplicaciones", Asociación de Investigación Eléctrica (ASINEL), 394p. 1970.
- [10] ARDELITA. Información facilitada por Ardelita.
- [11] PARDO DE SANTAYANA CARRILLO, F. "Comportamiento geotécnico de cenizas volantes en rellenos compactados y su evolución a lo largo del tiempo. Laboratorio de Geotecnia del CEDEX. Monografía 247. 1993.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 3.1	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>CENIZAS VOLANTES DE CARBÓN Y CENIZAS DE HOGAR O ESCORIAS</b>		

- [12] ROMERO CÁRDENAS V.; MORA SALAZAR M.A. "Utilización de residuos industriales en capas de base de carreteras de baja intensidad de tráfico". Carreteras, nº 96.1998.
- [13] ROMERO CÁRDENAS V. "Eliminación de residuos agrícolas industriales y de la construcción y demolición, mediante su utilización en capas de firme de carreteras y otros viarios". V Congreso Nacional de Firmes. León, 2000.
- [14] RC-08. "Instrucción para la Recepción de Cementos".
- [15] EHE. "Instrucción de Hormigón Estructural".
- [16] SALCEDO LORENTE, A.J. "Hormigón con adición de cenizas volantes en cuantía elevada e influencia de los aditivos sobre el mismo". Revista de Obras Públicas. Diciembre, 1986.
- [17] HAQUE, M.N.; LANGAN, B.W. WARD, M.A. "High Fly Ash Concretes". ACI Journal, January-February 1984, p.54-84.
- [18] ESTUDIO SOBRE LA UTILIZACIÓN DE CEMENTOS MIXTOS EN FIRMES DE CARRETERAS. INFORME PARCIAL, Tomo Único. Laboratorio Central de Estructuras y Materiales, (M<sup>a</sup> Pilar Alaejos, dir.), para Ministerio de Fomento, Secretaría de Estado de Infraestructuras y Transportes, Dirección General de Carreteras. Madrid, 1997.
- [19] AYESTA, G.; GARCÍA, M<sup>a</sup>.P.; BLANCO, F.; AYALA, J. "Obtención de ladrillos cara vista a partir de cenizas volantes de la Central Térmica de Narcea (Asturias). Materiales de Construcción, Vol.49, nº256, p.15-28. 1999.
- [20] OECD. "Use of materials and by-products in road construction". Paris, 1977.
- [21] DIEZ TABOADA, J.M. " Estabilización de suelos con cenizas volantes en caminos rurales. Técnica de ensayos y resultados. Jornada técnica sobre el empleo de cenizas volantes en la construcción de carreteras y caminos rurales. Madrid, 1988
- [22] SEGURA GRAIÑO J. "Estabilización de suelos con cenizas volantes en caminos rurales. Resultado en los tramos de ensayo". Jornada técnica sobre el empleo de cenizas volantes en la construcción de carreteras y caminos rurales. Madrid, 1988.
- [23] ALONSO M.C.; DE LUXAN M.P. "Aplicaciones de las cenizas volantes en el campo de la construcción. Una experiencia española". Monografía del Instituto Eduardo Torroja de la Construcción y el Cemento. 1995.
- [24] QUEREDA J. "Metodología seguida para la aplicación de las cenizas volantes en la construcción de carreteras" Jornada Técnica sobre el empleo de cenizas volantes en la construcción de carreteras y caminos rurales. Madrid, 1988.
- [25] COLMENAREJO A. "Aplicación de las cenizas volantes en la construcción de carreteras". Jornada Técnica sobre el empleo de cenizas volantes en la construcción de carreteras y caminos rurales. Madrid, 1988.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 3.1	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>CENIZAS VOLANTES DE CARBÓN Y CENIZAS DE HOGAR O ESCORIAS</b>		

- [26] GARCÍA ARANGO I. "Ejemplos prácticos de la utilización de cenizas volantes en carreteras" Jornada Técnica sobre el empleo de cenizas volantes en la construcción de carreteras y caminos rurales. Madrid, 1988.
- [27] GÁLLIGO, J.M.; ALAEJOS, M<sup>a</sup> P. "Hormigón de alta resistencia. Estado actual de conocimientos". M19. CEDEX. Laboratorio Central de Estructuras y Materiales. 1990.
- [28] FATIH, T.; UMIT, A.: "Utilization of Fly Ash in Manufacturing of Building Bricks". 2001 International Ash Utilization Symposium, Center for Applied Energy Research. University of Kentucky. <http://www.flyash.info/2005/5kay.pdf>.
- [29] BILODUAU, A.; SIVASUNDARAM, V.; BOUZOUBAA, N.; FOURNIER, B.; NKINAMUBANZI, P.C.: "Implementation of High-volume Fly Ash Concrete in India for Sustainable Development". The 6th International Symposium on Cement and Concrete. CANMET/ACI. September 19-22, 2006. pp 807-814.
- [30] BEDEC. Banco de precios BEDEC PR/PCT. CONSTRUMÁTICA: Arquitectura, Ingeniería y Construcción. <http://www.construmatica.com/>

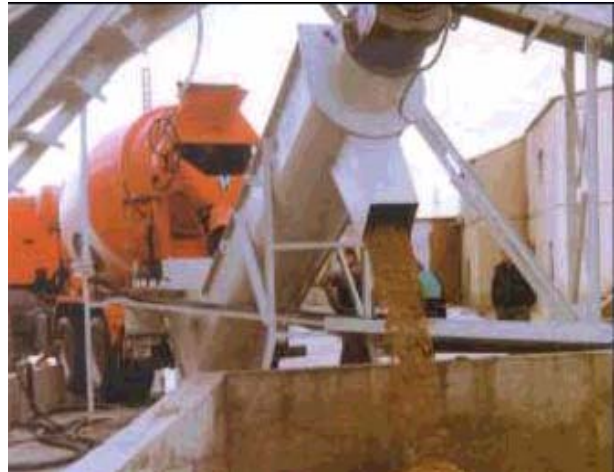
## **8.- ENTIDADES DE CONTACTO**

- UNESA (Asociación Española de la Industria Eléctrica)  
C/ Francisco Gervás nº 3  
28020 Madrid  
Tel. 91 5674800
- OFICEMEN (Agrupación de Fabricantes de Cemento de España)  
C/ José Abascal nº 53  
28003 Madrid
- ECOBA (European Association for use of the By-products of Coal-Fired Power-Stations)  
<http://www.ecoba.com>
- HISPALYT: (Asociación Española de Fabricantes de Ladrillos y Tejas de Arcilla Cocida)  
C/ Orense nº 10  
28020 Madrid

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 3.2	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>RESIDUOS PROCEDENTES DE LA FABRICACIÓN DE HORMIGÓN PREPARADO</b>		
Nombre en inglés: Returned Concrete or Fresh Concrete Wastes		



HORMIGÓN RESIDUAL



ÁRIDO PROCEDENTE DEL RECICLADO DE EXCEDENTES DE HORMIGÓN

## 1.- ORIGEN

Los posibles residuos sólidos que se generan en una planta de hormigón son:

- Excedentes de hormigón, constituidos por el hormigón fresco (en estado plástico) que sobra o es rechazado después de su distribución y es mandado nuevamente a la planta. Las cantidades de estos materiales son muy variables y difíciles de cuantificar.
- Hormigón residual, que contiene el hormigón fresco (en estado plástico) u otros restos procedentes de la limpieza de las cubas al finalizar la jornada. El hormigón residual comprende aquellos residuos procedentes del lavado de hormigoneras y bombas de hormigón.
- Otros residuos: Hormigón en estado plástico procedente del ensayo de consistencia, y hormigón endurecido en forma de probetas de control de calidad. Dentro de este último, hay que señalar las dificultades de reciclar las probetas cilíndricas fabricadas para el control de calidad, ya que llevan incorporado un refrentado de azufre.

## 2.- VOLUMEN Y DISTRIBUCIÓN

En España se producen grandes cantidades cada año de desechos de hormigón procedentes de las plantas de fabricación de hormigón. La cantidad total de estos residuos se puede estimar entorno al 1% de la producción total de la planta de hormigón preparado, implicando un

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 3.2	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>RESIDUOS PROCEDENTES DE LA FABRICACIÓN DE HORMIGÓN PREPARADO</b>		

sobrecoste de la producción, tanto por el valor de los áridos que se desechan como por el costo de su traslado hasta los vertederos autorizados, cada vez más escasos.

La producción de hormigón preparado alcanzó en nuestro país la cifra de 97.761.000 m<sup>3</sup> en el año 2006<sup>(1)</sup>; así pues, tomando los datos anteriores como referencia, se puede estimar que la generación de este tipo de residuos anual se sitúa en unos 977.610 m<sup>3</sup>.

Cada vez son más numerosas las plantas de hormigón preparado que utilizan sistemas de reciclaje. Según datos facilitados por ANEFHOP, aproximadamente el 18% de las plantas del territorio nacional disponen de un dispositivo reciclado de hormigón. Además, aproximadamente el 95% de las plantas de fabricación de hormigón disponen de algún sistema de balsas de decantación para el reciclado del agua.

En cuanto a la cantidad de hormigón residual, en una hormigonera vacía de 9 m<sup>3</sup> que antes contenía hormigón, quedan aproximadamente 270 kg de hormigón adheridos al tambor. Para lavar ese hormigón antes de que endurezca es necesario utilizar entre 300 y 600 litros de agua <sup>(1)(2)</sup>. Considerando el rango anteriormente citado de producción de hormigón, se estima una utilización de agua de lavado entre 3 y 6 millones de m<sup>3</sup> anuales.

En el siguiente mapa se muestra la distribución de las plantas de hormigón en el territorio nacional en el año 2006<sup>(1)</sup>.

**LEYENDA**

Distribución de las plantas de hormigón por Comunidades Autónomas.



**3.- VALORIZACIÓN**

En muchos países europeos, incluido España, ya se utilizan equipos de reciclado de residuos en plantas de hormigón, para incorporarlos en la producción de hormigón nuevo. Lo que se pretende es que la generación de residuos en las plantas sea nula, para lo cual se plantea un tratamiento



<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 3.2	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>RESIDUOS PROCEDENTES DE LA FABRICACIÓN DE HORMIGÓN PREPARADO</b>		

“in situ” de los residuos mediante unos dispositivos recicladores, pasando la totalidad del residuo inerte que hoy en día se genera en la planta a formar parte del proceso productivo.

La valorización del residuo tiene una doble vertiente <sup>(3)</sup>:

-*Valorización económica*: El hormigón rechazado supone un cierto porcentaje de la producción y su vertido lleva también asociado un coste.

-*Valorización medioambiental*: Tanto el hormigón rechazado como el agua para lavar los camiones y amasadoras, son fuente posible de contaminación y por lo tanto nocivos para el medio ambiente si no son reciclados.

### 3.1.- PROPIEDADES

Como se ha mencionado anteriormente los residuos pueden ser hormigón fresco rechazado u hormigón endurecido. Las propiedades del hormigón rechazado serán función de las del hormigón que fabrique la central.

### 3.2.- PROCESAMIENTO

Para el reciclado del hormigón en estado plástico se plantean dos tratamientos posibles <sup>(4)</sup>:

- **Mecánico**. La recuperación de los materiales se hace diluyendo en agua el hormigón y separando los sólidos (áridos) del líquido (disolución agua-cemento y finos) mediante sistemas separadores. La posibilidad del tratamiento mecánico de los residuos de hormigón está hoy perfectamente resuelta y cumple con los requisitos medioambientales al realizar un reciclaje al 100%.

- **Químico**. Consiste en la adición de retardadores que evitan o retrasan el fraguado del cemento. Este método se está utilizando en Japón como complemento al método mecánico para conseguir una producción del nuevo hormigón fresco más uniforme <sup>(5)</sup>. Para el lavado de las hormigoneras y las bombas de hormigón también es posible la utilización de agua que incorpore un retardador.

A continuación se describen los dos procesos.

#### 3.2.1.- Procedimiento mecánico

Los equipos de reciclado mecánico están compuestos por una tolva de recepción que permite la descarga de varias hormigoneras a la vez; para facilitar el proceso se proyecta sobre ellos agua mediante una serie de chorros a presión. El reciclado de este tipo de residuo comprende dos etapas:

#### Separación de los áridos gruesos y de las partículas más finas

El hormigón residual y el agua de lavado de las hormigoneras se introducen en la máquina separadora a través de una tolva alimentadora. La separación se realiza mediante agitación con

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 3.2	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>RESIDUOS PROCEDENTES DE LA FABRICACIÓN DE HORMIGÓN PREPARADO</b>		

agua, obteniéndose así los áridos (libres de cemento) y la mezcla de agua, cemento y los áridos más finos.

Los áridos son transportados al exterior de la máquina por medio de equipos especiales y se almacenan para su posterior utilización.

El mecanismo de separación depende de unos equipos a otros, y los métodos más empleados se resumen a continuación:

*Tornillo sinfín inclinado:* Los residuos se vierten sobre la zona inferior del tornillo inclinado; el lavado de los áridos y la separación de la pasta de cemento, agua y los áridos más finos, se efectúa introduciendo un flujo de agua en sentido contrario al movimiento de la hélice. Los áridos ya limpios salen por la parte superior de la hélice, donde se puede instalar una serie de tamices para almacenarlos ya clasificados, mientras la pasta se recoge en un sumidero colocado en la parte inferior y es evacuada a una balsa de recuperación.

Considerando su bajo coste, esta solución es bastante rentable. Además, según la longitud del sinfín, es posible variar la altura de descarga. Cuanto más largo es el sinfín, más secos se obtienen los áridos en salida. Como desventaja, el sistema implica la utilización de un bajo volumen de agua lo que limita mucho la calidad del lavado de los áridos extraídos <sup>(6)</sup>.

*Tornillo sinfín sin eje central (Sistema Trómel):* Se trata de un sistema de lavado muy apropiado para este tipo de productos. La ausencia de eje central presenta grandes ventajas: se pueden lavar grandes cantidades sin riesgo de bloqueo y facilita la separación del agua y la lechada de cemento en el caso de inclinarlo y utilizar el tornillo como decantador.

Proporciona un lavado de los áridos de buena calidad aunque no se puede asegurar que el sistema sea óptimo: la altura de descarga es baja, por lo que los áridos han de retirarse muy frecuentemente. Además, se extraen los áridos muy húmedos <sup>(6)</sup>.

*Sistema Noria:* El sistema Noria se parece al sistema Trómel pero es la espiral interna la que efectúa la rotación y no el cuerpo exterior de la máquina. El baño de agua que se hace en el interior permite un lavado óptimo. Se extraen los áridos por medio de cangilones elevadores que descargan en una rampa o canal en U.

Las propiedades del sistema de Noria son comparables a las del sistema de Trómel, es un poco más efectiva que el empleo de un Trómel ya que permite instalar sistemas de evacuación y sistemas de prelavado. La calidad de lavado es buena. Sin embargo, la altura de descarga del material es baja, por lo que los áridos reciclados han de retirarse muy frecuentemente y se extraen los áridos muy húmedos <sup>(6)</sup>.

*Cilindro con paletas decantadoras:* Este sistema consiste en un cilindro colocado horizontalmente y semi-lleño de agua. Dentro del cilindro existe un sistema de paletas soldadas a una varilla en el eje del cilindro. Las paletas van arrastrando las partículas sólidas hasta el extremo opuesto, al final del cilindro se encuentran unas cucharas que recogen el árido y lo depositan en un plano inclinado que lo vierte al exterior.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 3.2	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>RESIDUOS PROCEDENTES DE LA FABRICACIÓN DE HORMIGÓN PREPARADO</b>		

### Tratamiento de la mezcla agua-cemento

El objetivo final es conseguir una recuperación máxima de los elementos de la mezcla, con lo que en los sistemas integrales de reciclaje del hormigón se añade a los métodos antes descritos un nuevo sistema de recuperación de la pasta de agua-cemento y finos, que admite distintas posibilidades que se describen a continuación.

- La pasta se puede almacenar en una *balsa recuperadora* donde se produce la sedimentación de las partículas de mayor tamaño (pudiéndose emplear floculantes para agilizar el proceso), los lodos se eliminan periódicamente y se depositan en vertederos. Este agua pretratada se almacena en tanques y puede ser usada para limpiar el interior de las hormigoneras o para la separación de los áridos en la primera fase. Este sistema presenta varios inconvenientes, ya que es necesario vaciar periódicamente las balsas, no se trata de un proceso continuo y no aprovecha todos los componentes del hormigón.
- Otro sistema de recuperación consiste en la utilización de *filtros*. En este caso el agua con los finos en suspensión, se introduce en el dispositivo del filtro-prensa para eliminar los materiales más finos. Este sistema presenta la ventaja de un mayor aprovechamiento del agua (que puede pasar a formar parte del proceso de fabricación de hormigón o ser utilizada para el lavado de camiones) y reduce considerablemente el volumen de residuos que se generan. Presenta el inconveniente de que los filtros se deben limpiar periódicamente y tampoco se aprovecha la totalidad del residuo, aunque lo reduce considerablemente.
- Existe otro tipo de equipos que eliminan los inconvenientes antes mencionados, reciclando el 100% de los materiales. Para ello *la balsa de recuperación incorpora agitadores* que permiten mantener en suspensión las partículas inferiores a un cierto tamaño, en función del equipo utilizado, impidiendo su decantación. Este agua se aprovecha directamente para la fabricación de hormigón nuevo y por otra parte sirve para la limpieza de las hormigoneras, de las bombas de hormigón y para el lavado de los áridos en la primera etapa.
- *Torre de clarificación*. Se utiliza ese sistema cuando se produce más agua residual de lo necesario. Se clarifica el agua residual en la torre mediante un proceso de sedimentación. La torre consiste en dos tubos concéntricos de diámetros distintos. Se bombean aguas con partículas de dimensiones inferiores a 0,25 mm hacia el interior del tubo de diámetro más pequeño. Los finos sedimentan allí y fluyen hacia el fondo mientras que el agua clara emerge entre los tubos externo e interno. Se almacena el agua en una balsa de agua clarificada. Se bombean los finos que han sedimentado por medio de una bomba de barros que envía la masa de cemento y de sólidos hacia el proceso de mezclado o hacia un equipo de almacenamiento. El pH del agua clarificada se sitúa entre 11 y 13, y con la previa condición de neutralizar el agua, se puede incluso verter a canales públicos, o más habitualmente, puede servir para rellenar la balsa de agua reciclada, permitiendo así una reducción del consumo de agua limpia<sup>(6)</sup>. Este sistema no se utiliza actualmente en nuestro país.

En todos los casos es importante establecer un tamaño de separación del árido adecuado en la primera fase (generalmente 0,25 mm), para conseguir por una parte que el contenido de cemento

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: <b>3.2</b>	Mes: <b>DICIEMBRE</b> Año: <b>2007</b>
<b>RESIDUOS PROCEDENTES DE LA FABRICACIÓN DE HORMIGÓN PREPARADO</b>		

en los áridos de mayor tamaño sea lo menor posible y evitar así que este material se aglomere, y por otra parte minimizar el contenido de finos en la mezcla de agua-cemento.

### 3.2.2.- Procedimiento químico

Se pueden emplear ciertos aditivos estabilizadores de la hidratación que pueden controlar o detener el fraguado del hormigón, manteniendo el producto en estado de suspensión durante horas, toda la noche o incluso durante varios días. Estos aditivos están compuestos principalmente por polímeros modificados. La utilización de los aditivos permite recuperar los excedentes de hormigón y evitar así su vertido inmediato, reutilizándolo, para fabricar un nuevo hormigón. También se puede utilizar para prevenir las costras sobre las aspas y eliminar los residuos en las cubas rotativas.

Los sistemas presentados a continuación describen los diferentes modos de utilizar el estabilizador<sup>(5)</sup>.

#### *Sistema de premezcla (pre-blend system):*

Al principio del día, se añaden unos 15 litros del aditivo estabilizador de hidratación (Hydration Stabilizing Admixture HSA) a 10 m<sup>3</sup> de agua en una cuba de agua de lavado. Se utiliza esa premezcla para el lavado de las hormigoneras vacías y de los hormigones rechazados.

En el caso de un lavado normal de la hormigonera, el conductor pulsa un botón introduciendo así 1m<sup>3</sup> de solución de lavado a la hormigonera puesta en mezcla rápida durante 1 minuto y después se descarga el agua. Como alternativa, el aditivo líquido puede ser utilizado para mejorar el lavado de la hormigonera ya que en este caso, son necesarios sólo 150 litros de agua con el empleo del aditivo. Otra ventaja es que mientras que un simple lavado con agua no logra eliminar todos los residuos de hormigón, el lavado con el empleo de retardador lo consigue, incluso en los rincones más inaccesibles de los cilindros. Finalmente, el agua de lavado puede ser recogida y reutilizada en el hormigón de producción normal en la planta <sup>(3)</sup>.

En el caso de que se trate de una carga de hormigón rechazado, cuando se separa la pasta, se utiliza un densímetro que detecta los sólidos en suspensión y automáticamente se preparan 5 m<sup>3</sup> de agua con 7,5 litros de HSA. Al final del día, se bombea el contenido de la cuba de agua de lavado para transferirlo a la cuba de almacenamiento de la pasta. El agua con finos de esta cuba se utiliza en el proceso de fabricación del hormigón en la planta. Un programa por ordenador incluye el cálculo de un porcentaje fijo de finos en peso de cemento. Los límites establecidos por JIS (Japan Industrial Standards) son de un 3% de finos en peso de cemento.

Este sistema no se utiliza actualmente en nuestro país.

#### *Dosificación por hormigonera (dosage by truck system):*

Es bastante similar al sistema descrito previamente, excepto en el agua de lavado que se utiliza, que contiene 1,5 litros de HSA por cada m<sup>3</sup> de agua. Cuando hay hormigón rechazado, se utilizan 2m<sup>3</sup> de agua por cada metro cúbico de hormigón estimado.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 3.2	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>RESIDUOS PROCEDENTES DE LA FABRICACIÓN DE HORMIGÓN PREPARADO</b>		

En este sistema sólo hay una cuba de almacenamiento de pasta, por lo que el contenido en finos variará mucho: es necesario instalar un densímetro en la transición entre la cuba hasta el lugar de amasado del hormigón con un ajuste continuo de la cantidad de agua con finos para conseguir mantener constantes los finos por unidad de cemento.

El sistema de premezcla con dos cubas utiliza el contenido real total de finos, lo cual proporciona la ventaja de ser más fácil operacionalmente. Sin embargo, requiere un coste importante y un espacio suplementario para la segunda cuba. Como el HSA tiene la capacidad de prevenir la hidratación del cemento durante más de un día, si se encuentran cantidades inusuales de hormigón rechazado es posible extender el uso del agua incluso después de varios días.

#### *Reutilización del hormigón fresco*

El método de fabricación del nuevo hormigón consiste en añadir al hormigón no endurecido todavía en las hormigoneras un aditivo líquido que es un retardador. El fraguado puede retrasarse hasta 3 días. Este hormigón puede mezclarse con el hormigón fabricado en planta para conseguir un producto final con los requisitos exigidos. Cuando se mezclan los dos tipos de hormigón (el reciclado y el no reciclado), la concentración del retardador es tan baja que la hidratación se acelera de forma rápida y los granos de cemento se combinan <sup>(3)</sup>.

### **3.3.- PROPIEDADES DEL MATERIAL PROCESADO**

El agua de reciclaje consiste en la mezcla de agua, cemento y finos que queda después de la separación de los áridos. Se incluye también el agua de lavado que sirve para limpiar las hormigoneras así como el agua de las precipitaciones recogidas en las plantas de producción.

Este agua contiene partículas ultrafinas: cemento hidratado o no, adiciones y partículas de arena inferior a 0,25 mm. Puede contener también trazas de sulfatos, cloruros, etc., disueltos <sup>(7)</sup>.

En la siguiente tabla aparecen los resultados obtenidos al analizar el agua procedente de una balsa de recuperación <sup>(7)(8)</sup>.

ENSAYOS	AGUA PROCEDENTE DE LA BALSA	ESPECIFICACIONES EHE
Acidez (pH)	12.7 – 13.4	≥ 5
Sustancias solubles	2.729 ppm	≤ 15 gr/l (15.000 ppm)
Contenido de sulfatos	No detectable – 9.5 ppm	≤ 1 gr/l (1.000 ppm)
Contenido de cloruros	6.2 ppm – 55.4 ppm	Hormigón armado ≤3 gr/l (3.000 ppm)
Hidratos de carbono	Sacarosa No- Glucosa No	0
Aceites y grasas	101 ppm	≤15 gr/l (15.000 ppm)

**Tabla 1:** Propiedades del agua procedente de una balsa de recuperación

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 3.2	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>RESIDUOS PROCEDENTES DE LA FABRICACIÓN DE HORMIGÓN PREPARADO</b>		

Los resultados obtenidos al analizar el agua procedente del filtro prensa son los siguientes <sup>(9)</sup>

ENSAYOS	AGUA PROCEDENTE DEL FILTRO PRENSA
Acidez (pH)	12,40
Demanda bioquímica de oxígeno (D.B.O.) (mgO <sub>2</sub> /l)	1,28
Demanda química de oxígeno (D.Q.O.) (mgO <sub>2</sub> /l)	228,57
Sólidos en suspensión (mg/l)	43
Sólidos sedimentables (1 hora) (ml/l)	0,5
Nitratos (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ) (mg/l)	12,2
Amoniaco (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> ) (mg/l)	Indicios
Aceites y grasas	Ausencia
Detergentes catiónicos (mg/l)	0,33

**Tabla 2:** Propiedades del agua procedente del filtro prensa

Un estudio alemán sobre 12 muestras de plantas diferentes indicó que en el caso más desfavorable, el contenido en álcalis daba un Na<sub>2</sub>O<sub>eq</sub> de 0.9 g/l demostrando que son insignificantes las cantidades de álcalis disueltos que se introducen en la producción de un nuevo hormigón a través del agua reciclada <sup>(7)</sup>.

Para el caso de utilización de retardadores en cubas de hormigón rechazado y su mezcla directa posterior con nuevos hormigones fabricados, a continuación se describen cómo pueden verse afectadas las propiedades finales del hormigón, obtenidas de un estudio específico sobre el tema:

- La consistencia y resistencia del hormigón de referencia no es muy diferente de la del hormigón mezclado.
- El retardador puede retrasar cerca de una hora el inicio de fraguado del hormigón mezclado respecto al hormigón de referencia. Además, los aditivos al hormigón que producen un retraso de fraguado pueden propiciar efectos negativos sobre la resistencia a la fisuración en el hormigón joven <sup>(3)</sup>.

En cuanto a la influencia de la utilización del agua de lavado sin añadir aditivos retardadores en la producción de un nuevo hormigón, otro estudio indica lo siguiente:

- Si el agua de lavado tiene más de 4 horas, la resistencia puede disminuir. Las pérdidas más importantes por lo que se refiere a la resistencia a compresión se presentan con agua almacenada 24 y 48 horas (aproximadamente un 10% de pérdida de resistencia). Este efecto es posiblemente debido a que las partículas de cemento ya hidratadas interfieren con el proceso normal de hidratación del cemento en el mortero fresco.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 3.2	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>RESIDUOS PROCEDENTES DE LA FABRICACIÓN DE HORMIGÓN PREPARADO</b>		

- Por otra parte, el tiempo de fraguado en el hormigón fabricado queda dentro del 20% respecto al tiempo de fraguado del hormigón de control.

### 3.4.- APLICACIONES EN EDIFICACIÓN Y OBRA PÚBLICA

Según las empresas consultadas en nuestro país que disponen de este sistema<sup>(9)</sup>, se utiliza como parte del agua de amasado hasta un 50% de agua reciclada (mezclada con agua normal); esta limitación en muchas ocasiones se debe a la disponibilidad de agua reciclada y no a razones técnicas.

En el caso de utilizar agua con finos (sistemas con total recuperación) se debe conseguir que las características del hormigón no sean modificadas por la incorporación de los finos contenidos en el agua y para ello se debe conocer la cantidad de sólidos en suspensión que lleva la mezcla. Esta cantidad determinará el ajuste necesario en la dosificación del hormigón. Para conseguir un perfecto empleo de estas aguas se debe considerar la densidad del agua, la cantidad de finos y su densidad.

El agua con una densidad menor de 1.010kg/m<sup>3</sup> se considera que tienen una aportación de finos casi despreciable y, con las comprobaciones adicionales pertinentes, se podría usar sin mezclar con agua normal; cuando la densidad supera este valor se debe realizar la mezcla para cumplir la limitación de cantidad de finos en el agua.

En la siguiente tabla se muestran los resultados de la cantidad de finos que contiene el agua residual de distintas densidades <sup>(10)</sup>.

DENSIDAD DEL AGUA RESIDUAL (kg/litro)	FINOS (kg/litro)	AGUA DE MEZCLA (litro/litro)
1,02	0,038	0,982
1,04	0,076	0,964
1,06	0,115	0,945
1,08	0,153	0,927
1,10	0,191	0,909
1,12	0,229	0,891
1,14	0,267	0,873

**Tabla 3:** Cantidad de finos que contiene el agua residual de distintas densidades

NOTA: Para los valores de la tabla se ha tomado el valor de 2,1 kg/m<sup>3</sup> para la densidad de los finos, si esta densidad varía se debe modificar la tabla según la fórmula

$$M_f = \left( \frac{1 - D_{ar}}{1 - D_f} \right) \times D_f ;$$

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 3.2	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>RESIDUOS PROCEDENTES DE LA FABRICACIÓN DE HORMIGÓN PREPARADO</b>		

Donde

$M_f$ = cantidad de finos por litro

$D_{ar}$ = densidad del agua residual

$D_f$ = densidad de los finos

La Norma Española UNE - EN 206 <sup>(11)</sup> permite la utilización de los áridos recuperados de las aguas de lavado o del hormigón fresco como árido para hormigón en cantidades inferiores al 5% del total de los áridos, e incluso por encima de este valor siempre que éstos sean del mismo tipo que el árido que se esté utilizando en el hormigón, que hayan sido separados en fracciones gruesa y fina, y que cumplan los requisitos de la Norma “Áridos para hormigón” EN 12620<sup>(12)</sup>.

Asimismo, el agua reciclada deberá utilizarse de acuerdo con las especificaciones recogidas en el Anejo A de la Norma “Agua de amasado para hormigón- Especificaciones y ensayos” EN 1008<sup>(10)</sup>.

Se puede utilizar tanto para hormigón en masa, hormigón armado o pretensado y debe cumplir los mismos requisitos que se le exige al agua normal.

La utilización del agua reciclada presenta las siguientes limitaciones:

La cantidad de finos aportados al hormigón con el agua reciclada debe ser inferior al 1% del total de los áridos. Esto se cumple sobradamente cuando la densidad del agua reciclada de la balsa es menor o igual a 1,07 kg/litro.

La posible influencia del agua reciclada se debe tener en cuenta cuando se trate de hormigón pretensado, hormigón con aire ocluido o expuesto a ambientes agresivos.

La Norma exige que la densidad del agua reciclada se determine diariamente. También se debe determinar la composición química del agua al menos una vez a la semana durante el primer mes, posteriormente una vez al mes hasta el sexto mes y finalmente una vez cada seis meses.

En casos excepcionales (periodo de tiempo limitado), se permite aportar finos hasta el 2% del total de los áridos (densidad entre 1,08 kg/litro y 1,15 kg/litro) excepto cuando se trate de hormigones que vayan a estar en contacto con sulfatos.

En Japón, los límites establecidos por el JIS (Japan Industrial Standards) son de un 3% de finos en peso de cemento <sup>(5)</sup>.

En Alemania, la reutilización del agua reciclada procedente del hormigón fresco la controla el “Guideline for the production of concrete using recycled water, residual concrete and residual mortar” desarrollado por el German Committee for Reinforced Concrete. Debido a la falta de experiencia en la utilización del agua reciclada que se traduce por lo tanto en una falta de conocimiento, esas regulaciones alemanas prohíben el uso del agua reciclada para los hormigones con aire ocluido o los de alta resistencia por motivos de seguridad <sup>(7)</sup>.

Sin embargo, un extenso estudio realizado recientemente ha demostrado que el agua reciclada hasta una densidad de 1.15 kg/litro apenas afecta las propiedades de hormigones de elevada resistencia: resistencia a compresión, módulo de elasticidad, retracción, resistencia a las heladas o resistencia a la carbonatación. En concreto, la utilización de esta agua reciclada disminuyó la



<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: <b>3.2</b>	Mes: <b>DICIEMBRE</b> Año: <b>2007</b>
<b>RESIDUOS PROCEDENTES DE LA FABRICACIÓN DE HORMIGÓN PREPARADO</b>		

resistencia a compresión menos del 5%. Tampoco las propiedades del hormigón con aire ocluido se vieron afectadas <sup>(13)</sup>. A partir de esta densidad conviene separar los sólidos <sup>(14)</sup>.

En este estudio, la única limitación en la utilización del agua reciclada proviene del tiempo de almacenamiento: después de 72 horas, la hidratación del cemento aumenta de forma considerable su superficie específica, por lo que la fluidez del nuevo hormigón fresco se ve negativamente afectada, siendo necesaria la utilización de elevados contenidos de aditivos para compensar este efecto <sup>(13)</sup>.

Incluso aunque el agua reciclada se obtenga de hormigones con muchos aditivos a pesar de las grandes cantidades de plastificante o de retardador utilizadas, sólo se detectan en el agua reciclada muy pequeñas cantidades de agentes activos disueltos. Eso corrobora el hecho de que esos agentes se combinan de forma completa e irreversiblemente con las partículas de cemento y no intervienen en otras reacciones posteriores <sup>(7)(14)(15)</sup>.

En el caso de utilizar aditivos estabilizadores de la hidratación del cemento, estudios específicos concluyen que la dosis adecuada es de 1.5 l/m<sup>3</sup> que permite utilizar agua con hasta un 5% de finos en peso de cemento, sin que se vean alteradas la consistencia, fraguado, aire ocluido o resistencia del nuevo hormigón <sup>(5)</sup>.

Finalmente la Norma americana ASTM C 94 (Standard Specification for Ready-Mixed Concrete) <sup>(16)</sup> establece las siguientes condiciones para la utilización del agua reciclada:

- La resistencia a compresión a los 7 días de un mortero preparado con agua reciclada (respecto a un mortero preparado con agua destilada) ha de ser superior al 90%.
- La desviación máxima del tiempo de fraguado (respecto al mortero de referencia) ha de estar comprendida entre 1h antes y 1,5 h después.
- Existen otros requisitos opcionales referidos al contenido de cloruros, sulfatos, álcalis y sólidos totales en suspensión.

### **3.5.- OBRAS REALIZADAS**

En España aunque estos sistemas de reciclaje no están generalizados cada vez son más las plantas de hormigón que reciclan sus residuos. Se tiene constancia de que al menos 68 plantas (casi el 6% del total de plantas de hormigón que hay en nuestro país) reciclan estos residuos con alguno de los tres sistemas descritos anteriormente.

En la actualidad existen muchos países que llevan a cabo el reciclado de este tipo de residuos. Entre ellos se encuentra Japón, donde aproximadamente el 52% de las plantas de hormigón utilizan satisfactoriamente el agua reciclada y el 17% el agua fangosa (sin tratamiento de decantación) <sup>(17)</sup>. Asimismo, después de cuatro años de desarrollo, alrededor de 100 plantas en Japón utilizan el sistema químico de reciclaje de hormigón rechazado <sup>(4)</sup>.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 3.2	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>RESIDUOS PROCEDENTES DE LA FABRICACIÓN DE HORMIGÓN PREPARADO</b>		

#### **4.- CONSIDERACIONES MEDIOAMBIENTALES**

La Ley 10/1998, de Residuos, de 21 de abril, establecía en su artículo 3 que tendrían consideración de residuos todos aquellos que figurasen en el Catálogo Europeo de Residuos (CER). Este Catálogo fue aprobado por la Decisión 94/3/CE de 20 de diciembre de 1993, y complementado con la Decisión 94/904/CE, ambas aprobadas en el Real Decreto 952/1997.

Las Decisiones Comunitarias 94/3/CE y 94/904/CE han sido derogadas por la Decisión 2000/532/CE mediante la que se aprueba La Lista Europea de Residuos. La orden MAM/304/2002 de 8 de febrero (con corrección de errores de 12 de marzo), publica en su Anejo 2 la mencionada Lista Europea de Residuos.

Los residuos procedentes de la fabricación de hormigón preparado vienen incluidos en la Lista Europea de Residuos en el Capítulo 17 correspondiente a "Residuos de construcción y demolición" con el siguiente código:

- 17 01 012 residuos de hormigón procedentes de la construcción y demolición, y están caracterizados como residuos no peligrosos.

#### **Ventajas**

- Reducir considerablemente o incluso evitar la generación de residuos cuyo destino final es el vertedero.
- Reutilización de los residuos en el proceso productivo, lo que comporta un ahorro económico en materias primas.
- Menor consumo de un bien cada vez más escaso como es el agua (pudiéndose reducir en ocasiones hasta el 50%).
- Evita el problema de vertido del agua ya que las exigencias legales obligan a que los vertidos a cauces públicos (bien sean cursos pluviales o redes de saneamiento) no contengan componentes tóxicos inorgánicos y limita también el contenido de materias en suspensión.

#### **5.- ASPECTOS ECONÓMICOS**

Un análisis económico del sistema de premezcla aplicado a 265 días operacionales (lo que es un valor típico para Japón) arrojó los siguientes resultados: una planta de Nagoya que emplea el sistema de premezcla entrega aproximadamente 200 m<sup>3</sup> de hormigón con 30 lavados de hormigoneras y recibe hasta 10 m<sup>3</sup> de hormigón retornado, utilizando 45 litros de HSA al día. Las modificaciones involucradas por tales sistemas cuestan 20 000\$ en media. Después de 4 años de desarrollo, más de 100 plantas de hormigón en Japón utilizan este sistema de reciclaje <sup>(5)</sup>.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 3.2	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>RESIDUOS PROCEDENTES DE LA FABRICACIÓN DE HORMIGÓN PREPARADO</b>		

En cuanto a la situación española, las consultas realizadas en empresas fabricantes de equipos recicladores indican como estimación un coste de instalación de recicladores tipo trómel entre los 60.000 y 70.000 €, con capacidad de lavado entre 12/15m<sup>3</sup> de hormigón/hora. El sistema permite un aprovechamiento de 80% del material reciclado, estimando un tiempo de amortización de la instalación de 5 años <sup>(18)(19)</sup>.

## 6.- NORMATIVA TÉCNICA

A continuación se citan las normas donde se especifican las características que deben cumplir tanto los áridos reciclados como el agua de amasado reciclada:

- UNE-EN 206-1. "Hormigón-Parte1: Especificación, comportamiento, fabricación y conformidad". 2008.
- EN 12620. "Áridos para hormigón". 2003.
- PNE-EN 1008: "Agua de amasado para hormigón. Especificaciones para la toma de muestras, los ensayos y la evaluación de aptitud al uso del agua, incluyendo las aguas recuperadas de procesos en la industria del hormigón, como agua de amasado para hormigón". 2002.
- ASTM C 94. "Standard Specification for Ready-Mixed Concrete". 1996.

## 7. - REFERENCIAS

- [1] Información facilitada por "La Asociación Nacional Española Fabricantes de Hormigón Preparado" [www.anefhop.com](http://www.anefhop.com)
- [2] Jeff Borges, Ramon L. Carrasquillo y David W. Fowler, Nicol & Hofland Associates, Inc., Denver, Colorado; and Civil Engineering Department, The University of Texas at Austin. "Use of Recycled Wash Water and returned Plastic Concrete in the production of Fresh Concrete"
- [3] Christian Öttl : "Reuse of fresh concrete by adding a recycling aid". Otto – Graf – Journal Vol.11, 2000
- [4] ANEFHOP. "Manual de protección del medio ambiente para la industria del hormigón preparado". Noviembre, 1995.
- [5] Seiji Nakamura, Denka Grace K. K., Japan y Lawrence R. Roberts Grace Construction Products USA. "Recycling Returned Concrete". Concrete Engineering International April 1999
- [6] Departamento Técnico de Bibko Systems S.L. Febrero 2001. "Reciclado de hormigón y aguas en las plantas de hormigón. Comparativa entre sistemas".
- [7] Jörg RICKERT, Horst GRUBE, Düsseldorf "Analysis of recycled water components" Analyse von Restwasserinhaltsstoffen. 1999.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: <b>3.2</b>	Mes: <b>DICIEMBRE</b> Año: <b>2007</b>
<b>RESIDUOS PROCEDENTES DE LA FABRICACIÓN DE HORMIGÓN PREPARADO</b>		

- [8] BIBKO. "El reciclaje de hormigón residual". Hormigón, N°45, p.68-69. 2000.
- [9] HORMICEMEX. Información facilitada por Hormicemex.
- [10] EN 1008. "Agua de amasado para hormigón. Especificaciones y ensayos".
- [11] UNE-EN 206-1. "Hormigón-Parte 1: Especificación, comportamiento, fabricación y conformidad". 2005.
- [12] EN 12620. "Áridos para hormigón". 2002.
- [13] Jörg RICKERT, Horst GRUBE, Dusseldorf "Influence of recycled water from fresh concrete recycling systems on the properties of fresh and hardened concrete". Einfluss von Restwasser aus dem Frischbetonrecycling auf die Eigenschaften von Frisch und Festbeton. 2001.
- [14] Hanna, J., Dorota, S.L.; Alicja, G.: "Application in Concrete Plants Waste Recovered from Concrete Industry". Conference on the use of recycled materials in buildings and structures, organizado por RILEM. Barcelona, 9 al 11 noviembre 2004.
- [15] Chini, S.A.; Mbwambo, S.A.: "Environmentally Friendly Solutions for the Disposal of Concrete Wash Water form Ready Mixed Concrete Operations". CIB W89 Beijing International Conference, 21-24 October 1996.
- [16] ASTM C 94. "Standard Specification for Ready-Mixed Concrete". 1996.
- [17] RILEM (International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures). "Recycled aggregates and recycled aggregate Concrete". Recycling of Demolished Concrete and Masonry, RILEM Report 6, Edited by Hasen, T.C., Published by E&FN Spon, 2-6 Boundary Row, London SE 1 8HN, First edition, 1992.
- [18] Información facilitada por Beton Servis, S.L. <http://www.beton-servis.es; info@beton-servis.es>
- [19] Información facilitada por Serviplem-Baryval. [aroyo@serviplem.com](mailto:aroyo@serviplem.com)

## **8.- ENTIDADES DE CONTACTO**

- ANEFHOP (Asociación Nacional Española de Fabricantes de Hormigón Preparado)  
C/ Bretón de los Herreros nº43, bajo  
28003 Madrid  
Tel. 91 441 66 34  
Fax: 91 441 68 34  
[www.anefhop.com](http://www.anefhop.com)

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 3.3	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>FOSFOYESO</b>		
Nombre en inglés: Phosphogypsum		



FOSFOYESO

## 1.- ORIGEN

La producción de óxido de fósforo por vía húmeda para su uso en la fabricación de fertilizantes o detergentes se realiza atacando los fosfatos naturales con ácido sulfúrico, y se genera un subproducto constituido fundamentalmente por sulfato cálcico hidratado que se denomina fosfoyeso. Por cada tonelada de óxido de fósforo producida, se generan de 4,5 a 5,5 toneladas de fosfoyeso.

El fosfoyeso tiene unas características distintas de las del yeso, obtenido a partir de la roca de yeso, y para poder ser utilizado como sustitutivo de éste, de forma rentable económicamente, se requiere una mayor investigación.

Existen tres procesos para la fabricación del óxido de fósforo: Proceso dihidratado, proceso hemihidratado y proceso hemidihidrato.

El proceso dihidratado, es el proceso más estable, requiere una inversión de capital baja y tiene un bajo coste de producción. Es el más utilizado en el mundo. El fosfoyeso generado contiene gran número de impurezas. Este proceso es el que se utiliza en la fábrica de Huelva.

El proceso hemihidratado tiene un coste de inversión inicial y de producción más alto que el anterior. Genera 4,3 toneladas de fosfoyeso por óxido de fósforo producido.

El proceso hemidihidrato combina las ventajas de los dos anteriores. A pesar de todo es el menos utilizado. Genera 4,9 toneladas de fosfoyeso por cada tonelada de óxido de fósforo y el fosfoyeso generado es el que contiene menor número de impurezas de los tres.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 3.3	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>FOSFOYESO</b>		

## **2.- VOLUMEN Y DISTRIBUCIÓN DEL RESIDUO**

Las fábricas de Huelva (Fertiberia, S.A. y FMC Foret, S.A.) son los únicos centros de producción de ácido fosfórico en España, con una producción anual que supera las 500.000 toneladas de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Estas fábricas generan unos dos millones de toneladas anuales de fosfoyesos y existen ya más de mil millones de toneladas apiladas.

El fosfoyeso resultante se deposita en balsas de almacenamiento anejas a la fábrica de aproximadamente 200 Ha.

En los años 1990 se generaban 150 millones de toneladas de fosfoyeso a nivel mundial, de las cuales solamente un 15 % se reprocessaban y utilizaban, un 57% se almacenaban y un 28% se desechaban. En Estados Unidos se generan alrededor de 30 millones de toneladas de fosfoyeso al año.



## **3. VALORIZACIÓN**

### **3.1.- PROPIEDADES**

Las características de los fosfoyesos que se recogen a continuación corresponden a siete muestras procedentes de siete fábricas distintas de Florida (EE.UU).

- Granulometría: los fosfoyesos se pueden considerar limos yesíferos, por el tamiz UNE 0.25 (ASTM 60) pasa más del 96%. El porcentaje de finos (% pasa por el tamiz UNE 0.08) está comprendido entre el 51 % y el 80%. Los tamaños inferiores a 0.01 mm, están en una proporción inferior al 10%. Según la clasificación AASHTO se corresponde con un suelo tipo A-4.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: <b>3.3</b>	Mes: <b>DICIEMBRE</b> Año: <b>2007</b>
<b>FOSFOYESO</b>		

- La densidad del material varía entre 2,3 gr/cm<sup>3</sup> y 2,4 gr/cm<sup>3</sup>.
- En el ensayo Proctor modificado se han obtenido densidades entre 1,44 y 1,64 gr/cm<sup>3</sup> para unas humedades óptimas comprendidas entre 18% y 14 % y con el Proctor Normal, en muestras de fosfoyesos dihidratados la densidad máxima es de 1.47 gr/cm<sup>3</sup> para una humedad óptima de 17%.
- De los ensayos triaxiales realizados con presiones de confinamiento bajas:, 0,7;1,4 y 2.1 kg/cm<sup>2</sup> se ha obteniendo en todos los casos una cohesión nula, y ángulos de rozamiento comprendidos entre 43,5° y 50°.
- La permeabilidad sobre probetas compactadas con el Proctor modificado han dado resultados comprendidos entre 9,7x10<sup>-5</sup> y 1,5x10<sup>-5</sup> cm/seg y en el caso de muestras compactas con el Proctor normal las permeabilidades han variado entre 3,5x10<sup>-5</sup> y 4,6x10<sup>-5</sup> cm/seg.
- El contenido en yeso en seis de las siete muestras está comprendido entre 81% y el 99%.
- El pH de las disoluciones varía entre 2,5 y 5,2.
- Según los resultados obtenidos en los ensayos de placa de carga dinámicos realizados sobre una capa de fosfoyeso de 27 cm de espesor, este material no se puede considerar adecuado para capas de base en carreteras.
- La resistencia a compresión simple en muestras preparadas por compactación bajo presión estáticas está comprendida entre 3,4 N / mm<sup>2</sup> y 12,4 N /mm<sup>2</sup>, no habiéndose desmoronado las muestras al saturarse. Sin embargo, muestras preparadas bajo compactación dinámica, se desmoronan en la saturación, poniendo de manifiesto la sensibilidad de este material al agua.
- La resistencia a tracción determinada sobre probetas preparadas en las condiciones del Proctor Modificado, es aproximadamente un 10% de la resistencia a compresión. En probetas preparadas por compactación estática, la resistencia a tracción varia entre el 10% y el 18 % de la resistencia a compresión.

### 3.2.- PROCESAMIENTO

El fosfoyeso es el subproducto obtenido directamente en la producción de óxido de fósforo sin procesamiento.

### 3.3. APLICACIONES

La tecnología para la utilización del fosfoyeso se ha desarrollado principalmente en países con escasos recursos naturales de yeso o escasas zonas de almacenamiento para el residuo. Japón y Austria reutilizan prácticamente el 100% del fosfoyeso. En esta reutilización es muy importante la proximidad de las industrias en donde se produzca el reproceso debido a la influencia negativa de los costes de transporte.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: <b>3.3</b>	Mes: <b>DICIEMBRE</b> Año: <b>2007</b>
<b>FOSFOYESO</b>		

Las aplicaciones del fosfoyeso que se están empelando a nivel mundial son las siguientes:

- El 70% del fosfoyeso reprocesado, se utiliza en la fabricación de tableros de yeso. En este caso es necesario eliminar la mayoría de las impurezas solubles del fosfoyeso, ya que una pequeña cantidad de ellas afecta de manera significativa al tiempo de fraguado y a la resistencia del yeso.
- El 19% del fosfoyeso reprocesado, se utiliza en la fabricación del cemento, si bien es necesario eliminar las impurezas orgánicas, como los fosfatos, que afectan a la calidad del cemento, en particular al tiempo de fraguado y de endurecimiento.
- El 7% del fosfoyeso reprocesado se utiliza en la agricultura como nutriente de las siguientes formas:
  - Para la recuperación de suelos salinos;
  - Para el tratamiento de suelos ácidos;
  - Para mejorar la infiltración de agua;
  - Para reducir la costra en suelos meteorizados.
- Un porcentaje muy bajo, próximo al 3% de fosfoyeso, se utilizó en la recuperación de azufre, pero actualmente no existe ningún proceso de recuperación en funcionamiento.
- De manera experimental se ha utilizado el fosfoyeso en diferentes unidades de obra en carreteras.

### **3.4. OBRAS REALIZADAS**

En España no se utiliza el fosfoyeso en ninguna aplicación. El residuo que se genera en España está almacenado en balsas de almacenamiento próximas a la empresa en Huelva.

### **4.- CONSIDERACIONES MEDIOAMBIENTALES**

La Ley 10/1998, de Residuos, de 21 de abril, establecía en su artículo 3 que tendrían consideración de residuos todos aquellos que figurasen en el Catálogo Europeo de Residuos (CER). Este Catálogo fue aprobado por la Decisión 94/3/CE de 20 de diciembre de 1993, y complementado con la Decisión 94/904/CE, ambas aprobadas en el Real Decreto 952/1997.

Las Decisiones Comunitarias 94/3/CE y 94/904/CE han sido derogadas por la Decisión 2000/532/CE mediante la que se aprueba La Lista Europea de Residuos. La orden MAM/304/2002 de 8 de febrero (con corrección de errores de 12 de marzo), publica en su Anejo 2 la mencionada Lista Europea de Residuos.

Los fosfoyesos vienen incluidos en la Lista Europea de Residuos en el Capítulo 06



<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: <b>3.3</b>	Mes: <b>DICIEMBRE</b> Año: <b>2007</b>
<b>FOSFOYESO</b>		

correspondiente a “Residuos de procesos químicos inorgánicos”, en subapartado 06 09 correspondiente a “Residuos de la fabricación, formulación, distribución y utilización de productos químicos que contienen fósforo y de procesos químicos del fósforo”.

Según comunicado de la empresa que produce los fosfoyesos en España, la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía certificó que el fosfoyeso que se fabrica en Huelva no es un residuo peligroso.

De acuerdo con estas premisas, los fosfoyesos se pueden clasificar con:

- código 06 09 04: Residuos cálcicos de reacción distintos de los mencionados en el código 06 09 03.

El principal peligro medioambiental del fosfoyeso, como el de las rocas yesíferas, para su utilización en obras de carretera, es el derivado de su solubilidad, y la posibilidad que presenta de contaminación de las aguas subterráneas por infiltración.

La radiactividad del fosfoyeso es muy baja.

## **5. NORMATIVA TÉCNICA**

No existe ninguna normativa técnica referente a fosfoyeso si bien se incluye a continuación a normativa técnica española referente al yeso:

- RY-85 Pliego General de condiciones para la recepción de Yesos y Escayolas, en las obras de construcción (O.M. de 31 de mayo de 1985, BOE 10-6-85)
- UNE 102.001:1986 Aljez o piedra de yeso. Clasificación. Características.
- UNE 1002.010:1986 Yesos para la construcción. Especificaciones.
- UNE 102.020:1968 Paneles prefabricados de yeso o escayola de paramento liso para la ejecución de tabiques. Especificaciones.
- UNE 102.023:1998 Placas de yeso laminado. Condiciones generales y especificaciones.
- UNE 102.031.1982 Yesos y escayolas de construcción. Métodos de ensayo físicos y mecánicos.
- UNE 102.032:1984 Yesos y escayolas de construcción. Métodos de análisis químico.
- UNE 102.035:1998 Placas de yeso laminado. Métodos de ensayo.
- NTE-RPG-1974 Norma Tecnológica de la Edificación. Revestimientos de paredes: Guarnecidos y enlucidos.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: <b>3.3</b>	Mes: <b>DICIEMBRE</b> Año: <b>2007</b>
<b>FOSFOYESO</b>		

- NTE-PTP-1975 Norma Tecnológica de la Edificación. Particiones: Tabiques de placas y paneles.

## **6. REFERENCIAS:**

- [1] ANDERSON, NEIL R., " Gypsum Aggregate - A Viable Commercial Venture", Proceedings of the Second International Symposium on Phosphogypsum, Volume II. The Florida Institute of Phosphate Research, January, 1988. pp. 329-352.
- [2] CARMICHAEL, JACK B., "Utilization of the Phosphogypsum Produced in the Fertilizer Industry". Vienna: United Nations Industrial Development Organization, May, 1985.pp.63.
- [3] ERLNSTADT, GUNTER, " Upgrading of Phosphogypsum for the Constrution Industry". Proceedings of the International Symposium on Phosphogypsum. The Florida Institute of Phosphate Research, November, 1980,pp.284-293.
- [4] HO, ROBERTK. H. AND ZIMPFER,(May, 1985). "Comments on the Investigation of Phosphogypsum for Embankment Construction". Proceeding of the Second Workshop on By-Products of Phosphate Industries. The Florida Institute of Phosphate Research, May, 1985. pp. 182-213.
- [5] LIN K., FIGUEROA, J. L. AND CHANG, WEN,(May, 1985). "Engineering Properties of Phosphogypsum". Proceeding of the Second Workshop on By-Products of Phosphate Industries. The Florida Institute of Phosphate Research, May, 1985. pp. 49-59.
- [6] SAYLAK D., GADALLA, A., AND YUNG C., "Neutralization and Stabilization of Phosphogypsum for Road Constrution." Proceedings of the Third Wokshop on By-Products of Phosphate Industries. The Florida Institute of Phosphate Research, November, 1986. pp. 315-338.
- [7] WU, XIADONG, " A Study of the Radiation Problems Associated with Phosphogypsum Based Building Materials." Master´s Thesis, University of Miami, Coral Gables, Florida, July 1988. pp.87.
- [8] WEN F. CHANG, Ph. D., P.E. "Engineering proprieties and construction applications of phosphogypsum." University of Miami, Florida, 1999.

## **7. ENTIDADES DE CONTACTO**

- FERTIBERIA  
C/ Joaquín Costa, 26  
28002 Madrid  
Tel 91 586 62 00  
[www.fertiberia.com](http://www.fertiberia.com)

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.1	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN</b>		
Nombre en inglés: Construction and demolition wastes		



RESIDUOS DE HORMIGÓN



RESIDUOS CERÁMICOS

## 1.- ORIGEN

Según el Plan Nacional Integrado de Residuos (PNIR) 2007-2015<sup>(1)</sup>, desde un punto de vista conceptual, residuo de construcción y demolición (RCD) es cualquier sustancia u objeto que, cumpliendo la definición de “residuo” incluida en el artículo 3.a) de la Ley 10/1998, de 21 de abril, (cualquier sustancia u objeto perteneciente a alguna de las categorías que figuran en el anejo de esta Ley, del cual su poseedor se desprenda o del que tenga la intención u obligación de desprenderse) se genera en una obra de construcción y demolición.

El concepto de obra de construcción y demolición, a los efectos de este Plan abarca las actividades consistentes en la construcción, reparación, reforma o demolición de un bien inmueble, tal como un edificio, carretera, puerto, aeropuerto, ferrocarril, canal, presa, instalación deportiva o de ocio, u otro análogo de ingeniería civil.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.1	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN</b>		

Si bien, desde el punto de vista conceptual, la definición de RCD abarca a cualquier residuo que se genere en una obra de construcción y demolición, el ámbito de aplicación del PNIR se restringe a los residuos que se ajustan a la definición de RCD, con excepción de:

- Las tierras y piedras no contaminadas por sustancias peligrosas.
- Los residuos que se generen en obras de construcción y/o demolición regulados por una legislación específica, cuando no estén mezclados con otros residuos de construcción y demolición. Es el caso, por ejemplo, de los residuos de aceites industriales usados, de los residuos peligrosos en general, de los residuos de envases, de los neumáticos fuera de uso, de las pilas y baterías o de los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos.
- Los residuos regulados por la Directiva 2006/21/CE, del Parlamento Europeo y del Consejo, de 15 de marzo, sobre la gestión de los residuos de industrias extractivas.

Los residuos de construcción y demolición (RCD) proceden en su mayor parte de derribos de edificios o de rechazos de los materiales de construcción de las obras de nueva planta y de pequeñas obras de reformas en viviendas o urbanizaciones. Se conocen habitualmente como “escombros”. Con arreglo a la legislación española –Ley 10/1998, de Residuos– las competencias sobre el control de su producción y gestión corresponde a las Comunidades Autónomas, a excepción de los RCD procedentes de obras menores domiciliarias, cuya gestión (al menos la recogida, transporte y eliminación) corresponde a las Entidades locales.

La mayor parte de estos residuos se llevan a vertederos, creando de esta forma un gran impacto visual y paisajístico, además de un impacto ecológico negativo al rechazar materias primas que con un adecuado tratamiento, podrían ser recicladas. Se hace por lo tanto necesaria, su correcta gestión, de forma que se consiga reducir las cantidades generadas y aprovechar el potencial que tienen estos materiales como material secundario.

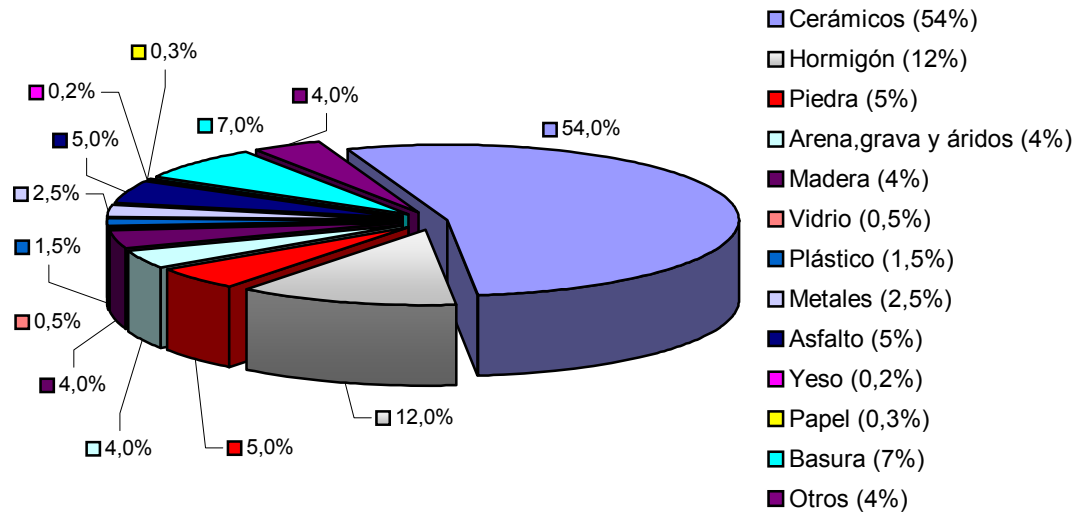
Bajo la denominación de residuos de construcción y demolición se incluye una variada serie de materiales, entre los que se encuentran productos cerámicos, residuos de hormigón, material asfáltico y en menor medida otros componentes como madera, vidrio, plásticos, etc. Según el Plan de Gestión de Residuos de Construcción y Demolición de la Comunidad de Madrid<sup>(2)</sup>, la composición media de estos residuos es la que recoge la Figura 1.

Los escombros cerámicos pueden tener dos orígenes muy diferentes:

- Desechos de fábrica de ladrillo que se producen en las operaciones de demolición de estructuras. En España la mayor parte de los residuos de demolición lo forman este tipo de residuos (que constituyen casi el 60%), y proceden principalmente de la demolición de estructuras de edificación. En este tipo de residuos se engloban materiales muy variados como pueden ser: ladrillo, ladrillo silico-calcáreo, mezclados o no con hormigón.
- Ladrillos elaborados en fábricas, que son rechazados por no cumplir las especificaciones pertinentes. Tal y como se recoge en el II PNRC, los residuos generados en la industria de los productos de la construcción no se incluyen en este plan y son objeto del Plan Nacional de Residuos Industriales no peligrosos del PNIR.

Por su parte, los residuos de hormigón proceden mayoritariamente de obra civil.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.1	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN</b>		



**Figura 1:** Composición de los residuos de construcción y demolición

## 2.- VOLUMEN Y DISTRIBUCIÓN

Según los datos recogidos en el II Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición (II PNRCD) incluido en el Plan Nacional Integrado de Residuos (PNIR) 2007-2015 puede estimarse que los residuos de construcción y demolición generados en España entre los años 2001 y 2005 son los que se detallan en la siguiente tabla:

Tipo de obra	2001	2002	2003	2004	2005
<b>Edificación:</b>	17.667.189	17.495.175	20.298.601	23.054.631	25.427.665
<b>Obra civil</b>	6.543.403	6.479.649	7.518.000	8.538.752	9.417.654
<b>Total RCD generados</b>	<b>24.210.592</b>	<b>23.974.824</b>	<b>27.816.601</b>	<b>31.593.383</b>	<b>34.845.319</b>

**Tabla 1:** Generación de residuos de construcción y demolición

Se puede establecer que la generación de RCD en España ha crecido en los cinco años analizados a un ritmo medio del 8,7% anual.

Casi la mitad de los residuos (el 49,2%) se han generado en Cataluña, la Comunidad Valenciana y Andalucía. Una cuarta parte se han generado en Madrid, Castilla-La Mancha y Galicia. El resto de los residuos se distribuyen de una forma, casi homogénea, entre Ceuta, Melilla y las 11 restantes Comunidades Autónomas.

La producción media de RCD por habitante y año, según los datos de 2005, se puede estimar en 790 kilos, con un máximo de 1.664 kg/hab.año en Castilla-La Mancha y un mínimo de 145 kg/hab.año en la ciudad de Ceuta.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.1	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN</b>		

En la Tabla 2 se incluye la estimación que sobre el número de instalaciones que estaban operativas en el año 2006, distribuidas por Comunidades Autónomas, figuran en el II PNRCD.

COMUNIDAD AUTÓNOMA	Nº de Plantas de Reciclado	Nº de Estaciones de Transferencia	Nº de Vertederos Controlados
ANDALUCÍA	22	1	9
ARAGÓN	1		3
ASTURIAS	3		1
BALEARES	2		0
CANARIAS	s/d	s/d	s/d
CANTABRIA	0		1
CASTILLA-LA MANCHA	1		0
CASTILLA Y LEÓN	3		1
1 CATALUÑA	11	7	44
COMUNIDAD VALENCIANA	6		0
EXTREMADURA	1		0
GALICIA	2		10
MADRID	3		4
MURCIA	s/d	s/d	s/d
NAVARRA	s/d	s/d	s/d
PAÍS VASCO	2		5
RIOJA (LA)	1		2
CEUTA Y MELILLA	s/d	s/d	s/d
<b>TOTAL NACIONAL</b>	<b>58</b>	<b>8</b>	<b>80</b>

**Tabla 2:** Centro de tratamiento de RCD por Comunidades Autónomas

En la Tabla 3 se recogen los datos publicados en el II PNRCD sobre la gestión de residuos de construcción y demolición entre los años 2002 y 2005.

	2002		2003		2004		2005	
	Reciclado	Vertedero	Reciclado	Vertedero	Reciclado	Vertedero	Reciclado	Vertedero
TOTAL	375.106	6.502.428	333.640	7.519.755	519.370	4.978.410	1.769.836	8.544.578

Fuente: MMA, sobre la base de las contestaciones a un cuestionario enviado a las plantas de tratamiento.

**Tabla 3:** Gestión de residuos de construcción y demolición entre los años 2002 y 2005.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.1	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN</b>		

A partir de los datos recogidos en la Tabla 4<sup>(3)</sup>, se puede comparar la gestión de este tipo de residuos realizada por diferentes países de la Unión Europea.

En algunos países, como Dinamarca, Países Bajos o Bélgica, se está fomentando el reciclaje sobre otros destinos como el vertido, y alcanzan porcentajes de reciclaje superiores al 75%. Este hecho responde principalmente a la escasez de áridos naturales y de espacios para la ubicación de vertederos. Uno de los instrumentos para conseguir estas elevadas tasas de reciclado ha sido el incremento del coste del vertido, o su prohibición en algunos casos, como en Dinamarca o Países Bajos.

Otros países, como Reino Unido o Austria, siguen esta tendencia aunque los porcentajes alcanzados son inferiores y se sitúan en torno al 40%.

Sin embargo, todavía en algunos países se reciclan pequeñas cantidades de residuos de construcción y demolición, destinando más de un 85% de los mismos a vertederos. Entre estos países se encuentra España, en donde, aunque no se disponen de datos fiables sobre el nivel de reciclaje, se estima que se sitúa entorno al 17%. Además es uno de los países que cuenta con un menor número de plantas de reciclaje.

País	Producción de residuos de la construcción (Mill.t)	Promedio (Kg/hab)	Nº de plantas de reciclado (fijas y móviles)	Destino del porcentaje		
				Vertido	Reciclado	Otros
Holanda (1999)	11,7	718	120	9	90	1
Bélgica (1999)	6,7	666	92	17	81	2
Dinamarca(1999)	2,6	509	30	16	75	9
Reino Unido (1999)	30,0	509	50-100	55	45	0
Austria(1999)	4,7	580	150	59	41	0
Alemania(1999)	59,0	720	1.000	82	18	0
Francia (1999)	23,6	404	50	85	15	0
<b>España (2005)<sup>(1)</sup></b>	<b>10,3</b>	<b>229</b>	<b>58</b>	<b>83</b>	<b>17</b>	<b>-</b>

**Tabla 4:** Gestión de residuos de construcción y demolición en Europa

### 3.- VALORIZACIÓN

#### 3.1- PROPIEDADES DEL RESIDUO

Las propiedades de los residuos de construcción y demolición varían notablemente en función de su origen y composición. Es conveniente diferenciar entre los materiales que tienen su origen en la construcción y demolición de edificación y estructuras, de los que proceden de capas de firmes.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.1	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN</b>		

Los primeros pueden presentar en su composición una amplia variedad de residuos, algunos incluso peligrosos, que pueden contaminar otros valorizables y que en cualquier caso deben separarse, preferiblemente en la propia obra. Los segundos, suelen presentar una mayor homogeneidad, menor presencia de posibles productos contaminantes en origen, requieren en muchos casos equipos y tecnología específica, y la incidencia del transporte en el coste de la valorización y puesta en obra de los áridos reciclados en la misma carretera es menor.

### Propiedades físicas

El tamaño de los escombros es muy heterogéneo y depende del tipo de técnica de demolición utilizada.

Estos residuos pueden tener impurezas y contaminantes como metales, vidrio, betún, materia orgánica y yeso.

### Propiedades químicas

La composición química de los **escombros de hormigón** depende de la composición del árido utilizado en su producción, puesto que más del 75% del total del hormigón lo constituye el árido, siendo el resto los componentes de hidratación del cemento, silicatos y aluminatos cálcicos hidratados o hidróxidos cálcicos. En función del árido utilizado (calizo o silíceo) se pueden distinguir<sup>(4)</sup> las siguientes composiciones químicas

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

**Tabla 5:** Composición química de los escombros de hormigón

La composición química de los **escombros mayoritariamente cerámicos** es muy heterogénea, dependiendo de las propiedades del componente principal. Como datos orientativos se pueden tomar los que figuran en la siguiente tabla<sup>(4)</sup>.

	Escombros cerámicos
SiO <sub>2</sub>	40-50
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6-8
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2-4
CaO	20-28
MgO	0-1

**Tabla 6:** Composición química de los escombros cerámicos



<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.1	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN</b>		

### 3.2.- PROCESAMIENTO

Hay que diferenciar dos fases en el procesamiento: la demolición y el reciclado de los materiales.

#### - *Demolición*

Si los escombros van a ser reciclados, 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). Asimismo, los procesos de demolición selectiva son fundamentales para disminuir la presencia de impurezas en los escombros, por ejemplo: el yeso.

#### - *Reciclado*

##### Plantas de Transferencia:

Son instalaciones para el depósito temporal de residuos de construcción y demolición que han de ser tratados o eliminados en instalaciones localizadas a grandes distancias. A veces es posible realizar la separación y clasificación de las fracciones de los residuos con lo que se mejora la gestión en las plantas de valorización y depósitos controlados que constituyen su destino final.

##### Plantas de valorización:

Son instalaciones de tratamiento de los residuos de construcción y demolición en las que se depositan, seleccionan, clasifican y valorizan las diferentes fracciones que contienen estos residuos, con el objetivo de obtener productos finales aptos para su utilización.

Las plantas de producción de áridos reciclados son bastante similares a las plantas de machaqueo de áridos naturales, incluyen machacadoras, cribas, mecanismos transportadores y equipos para la eliminación de contaminantes y electroimanes para la separación del acero.

La planta de tratamiento debe asegurar unas mínimas distancias de transporte, es decir, situarse lo más cerca posible del centro de la ciudad donde se originan la mayoría de los residuos de la construcción y donde se da una más amplia demanda de los productos del reciclaje de materias primas. También se pueden habilitar vertederos temporales de residuos y pequeñas plantas móviles que pueden emplearse para un tratamiento primario de los residuos.

Los sistemas de procesamiento utilizados dependerán de la aplicación final que se le vaya a dar al material reciclado (material para relleno, para zahorras en firmes para carreteras u hormigón) y de la cantidad de impurezas que contenga.

Las plantas se pueden clasificar en<sup>(5)</sup>:

1. Plantas de 1ª generación: carecen de mecanismos de eliminación de contaminantes, a excepción del acero y otros elementos mecánicos.
2. Plantas de 2ª generación: añade al tipo anterior sistemas mecánicos o manuales de eliminación de contaminantes previos al machaqueo, y elementos de limpieza y clasificación del producto machacado, por vía seca o húmeda. Son las más extendidas en el reciclado del hormigón.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.1	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN</b>		

3. Plantas de 3ª generación: dirigidas a una reutilización prácticamente integral de otros materiales secundarios, considerados como contaminantes de los áridos generados.

Además se puede realizar otra clasificación de las plantas según su capacidad de desplazamiento en: móviles, semimóviles y fijas.

Las *plantas móviles* están constituidas por maquinaria y equipos de reciclaje móviles que, aún disponiendo de una ubicación de referencia como almacén, suelen desplazarse a las obras para reciclar en origen. Utilizan un remolque de lecho plano como plataforma para el equipo de precibado, trituración, separación magnética y cribado final, junto con transportadoras, conductos y controles. Los sistemas se pueden montar en menos de un día mediante el despliegue de patas hidráulicas y la subida y alineación del equipo para conseguir un correcto flujo de materiales. Pueden procesar hasta 100 toneladas a la hora, suponiendo que la alimentación sea del mismo tamaño y que se emplee la separación magnética y los sistemas de cribado. Como se ha comentado anteriormente, estos equipos pueden procesar material con tamaño inferior a 700 mm, siendo necesaria la reducción del tamaño de los bloques mayores mediante martillos o cizallas hidráulicos.

Las *plantas semimóviles*, aunque también se entregan con camiones, son más grandes que las unidades móviles y se puede tardar hasta tres días en montarlas para su operación en un lugar determinado.

Las *plantas fijas* son instalaciones de reciclaje ubicadas en un emplazamiento cerrado, con autorización administrativa para el reciclaje de RCD, cuya maquinaria de reciclaje (fundamentalmente los equipos de trituración) son fijos y no operan fuera del emplazamiento donde están ubicados. Se montan de una forma permanente y proporcionan la mayor gama de capacidad. Estas plantas son en líneas generales, similares a las empleadas en áridos naturales, si bien incorporan de forma específica elementos para la separación de impurezas y otros contaminantes. Generalmente incluyen varios procesos de trituración y pueden procesar entre 300 y 400 toneladas por hora.

Una vez procesados los áridos se almacenan, teniendo en cuenta que <sup>(6)</sup>:

- Se deben almacenar por separado los áridos reciclados y los árido naturales, así como los áridos gruesos reciclados y los áridos finos reciclados.
- La absorción de agua del árido grueso reciclado es elevada, por lo que estos áridos deben ser usados normalmente en condiciones de saturación. Los almacenes de los áridos deben estar provistos de aspersores de agua para mantener estas condiciones de humedad.

### 3.3.- PROPIEDADES DEL MATERIAL PROCESADO

Se entienden como áridos reciclados a aquellos resultantes del tratamiento de material inorgánico previamente utilizado en la construcción.

Las características de los áridos de reciclados dependen:

- De las características de los materiales de los que proceden.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.1	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN</b>		

- De las características de los equipos de machaqueo utilizados en su producción.
- De la naturaleza de los cribados que se hayan realizado.
- De los procedimientos empleados para eliminar impurezas.

### 3.3.1.- Árido reciclado procedente de hormigón

Los áridos reciclados procedentes de hormigón presentan una gran 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 el tamaño del árido reciclado, presentando las fracciones finas unas peores propiedades (menor densidad, mayor absorción, mayor contenido de mortero, mayor contenido de impurezas, mayor contenido de partículas ligeras, mayor contenido de terrones de arcilla, mayor contenido de cloruros y de sulfatos).

#### Propiedades físicas

El producto reciclado del hormigón original tras el proceso de trituración, es una mezcla de árido grueso ( $\geq 4$  mm) y árido fino ( $< 4$  mm). El porcentaje de árido grueso que se obtiene varía del 70% al 90% de la masa total del hormigón original.

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<sup>(7)</sup>.

El coeficiente de forma del árido reciclado es similar al del árido natural, aunque suele presentar un porcentaje de lajas inferior.

La textura de los áridos reciclados suele ser rugosa y porosa, debido a la presencia del mortero que queda adherido a los áridos.

La densidad del árido reciclado 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 ( $> 2.000$  kg/m<sup>3</sup>). Los valores más habituales varían entre 2,07-2,65 kg/dm<sup>3</sup> en el caso de la densidad real y entre 2,10-2,64 kg/dm<sup>3</sup> para la densidad saturada con superficie seca.

Se puede establecer el control de la densidad como un índice de la uniformidad del árido reciclado.

La diferencia más marcada entre las propiedades de los áridos reciclados y los convencionales, es la absorción. Depende de la composición del hormigón original, situándose los valores más habituales entre 4-9%<sup>(8)</sup>.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.1	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN</b>		

Los áridos reciclados presentan un desgaste en el ensayo de Los Ángeles comprendido entre 25-45%<sup>(8)</sup>.

La peor calidad del árido reciclado es debida a la presencia de mortero adherido al árido natural, cuyo porcentaje varía entre 25-60%. Algunos estudios<sup>(8)</sup> han demostrado que el contenido de mortero está directamente relacionado con otras propiedades como la densidad, el coeficiente de Los Ángeles y la absorción. Debido a que las fracciones más finas presentan mayor contenido de mortero, tienen por lo tanto una peor calidad.

### Propiedades químicas

La caracterización química de los áridos reciclados es similar a la del residuo. Una parte de los componentes de hidratación del cemento quedan adheridos a las partículas más finas.

Entre los principales posibles contaminantes en los áridos reciclados se pueden considerar: las arcillas y suelos en general, el betún y los polímeros procedentes de los sellados de juntas, los filleres expansivos -también procedentes de juntas-, el yeso, los ladrillos refractarios con presencia de periclusa, los cloruros, materiales orgánicos, metales, vidrio, áridos ligeros, partículas de hormigón dañadas en un incendio, diversas sustancias reactivas y hormigón de cemento aluminoso.

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

El contenido de cloruros puede ser elevado cuando el árido reciclado procede de hormigones procedentes de obras marítimas, puentes en los que se utilicen sales fundentes, etc., pero en el resto de los casos presenta unos niveles aceptables.

El árido reciclado podría contener un elevado contenido de sulfatos, siendo especialmente perjudiciales los procedentes de contaminantes como el yeso cuando el hormigón procede de edificación. Los sulfatos presentes en la pasta de cemento del hormigón original no van a producir problemas en el hormigón nuevo. Si el árido reciclado procede de escombros de hormigón, se obtienen resultados favorables, cumpliendo, en general, las especificaciones que establece la EHE.

El contenido total de álcalis en el árido reciclado es elevado, debido en parte a los aportados por la pasta de cemento adherida al árido natural.

La gran heterogeneidad de los áridos reciclados y la incorporación de algunas impurezas, como madera, metales o yeso, puede producir contaminación por lixiviados, especialmente cuando 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.

Existen numerosas normas de ensayo para determinar la concentración de metales pesados y sustancias orgánicas en los lixiviados de los materiales de construcción:

- La norma alemana DIN 4226-100:2000 "Áridos para hormigón y mortero. Áridos reciclados",

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.1	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN</b>		

- la norma holandesa NEN 7345/95 “Leaching characteristics of solid earthy and stony building and waste materials”, describe el ensayo de difusión para obtener los lixiviados (medidos en mg/m<sup>2</sup>) en función del tiempo, para materiales de construcción no granulares y materiales residuales.
- la norma europea EN 12457-2/02 “Characterisation of waste-Leaching-Compliance test for leaching of granular waste materials and sludges-Part 2”

Los ensayos consultados de lixiviación sobre el árido reciclado, así como sobre el hormigón reciclado fabricado con él, han resultado en todos los casos favorables, satisfaciendo las diferentes normativas<sup>(53)(54)(55)</sup>.

Aunque algunos estudios han detectado problemas de resistencia a la helada en los áridos reciclados, estudios españoles<sup>(8)</sup> han demostrado que en el método de ensayo de la norma UNE-EN 1367-2:99 debe realizarse una preparación previa de la muestra. Con esta modificación, el árido reciclado puede cumplir la especificación establecida en la EHE.

### 3.3.2.- Arido reciclado cerámico

Las propiedades varían de acuerdo a la composición de los materiales, por lo que es necesario hacer una distinción entre los componentes principales y secundarios.

Se considera como áridos reciclados cerámicos a aquellos que contienen al menos un 65% en peso de los siguientes componentes: ladrillo y ladrillo silico-calcáreo, mezclados o no con hormigón

#### Propiedades físicas<sup>(6)(9)</sup>

La absorción es una de las propiedades físicas del árido reciclado de tipo cerámico que presenta una mayor diferencia con respecto al árido natural. Según los estudios consultados, la absorción del árido cerámico suele variar entre 6 y 25%, aunque cuando el árido reciclado incorpora además de material cerámico otros materiales como hormigón o árido natural, la absorción suele ser inferior a estos valores, situándose por debajo del 12%. La saturación se produce después de 30 minutos sumergidos en agua.

La densidad depende del tipo de ladrillo usado y de la cantidad de arena utilizada en la fabricación de los ladrillos. Como orden de magnitud se puede considerar que la densidad del ladrillo triturado está entre 1200 y 1800 kg/m<sup>3</sup>, mientras que la densidad de conjunto está comprendida entre 1000 y 1500 kg/m<sup>3</sup>. Cuando la proporción de hormigón triturado es elevada la densidad de las partículas puede aumentar hasta los 2200 kg/m<sup>3</sup>.

El coeficiente de Los Ángeles puede ser muy variable, encontrándose valores comprendidos entre 20% y 55% en los áridos de origen mayoritariamente cerámico.

Otro problema es la presencia de impurezas en áridos reciclados cerámicos, sobre todo de madera, yeso o vidrio. Esas impurezas afectan de manera importante a las propiedades del hormigón reciclado.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.1	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN</b>		

### Propiedades químicas

El contenido de sulfatos (SO<sub>3</sub>) -que puede ser debido a la presencia de mortero en los escombros, piezas de yeso u otros contaminantes-, no debería exceder de 1% en peso del árido seco. Aún con valores de SO<sub>3</sub> del 1%, si los áridos reciclados se utilizan en la fabricación de hormigón, éste puede sufrir una apreciable pérdida de resistencia, principalmente cuando el contenido de cemento es bajo.

Cuando se utiliza ladrillo triturado como principal componente, la pérdida por ignición es menor de 5% en peso. Si se utiliza ladrillo silico-calcáreo u hormigón la pérdida es mayor <sup>(6)</sup>.

### 3.4.- APLICACIONES

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.

Los destinos de estos materiales reciclados dependerán de la naturaleza o composición mayoritaria de los residuos. Así, 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.

Cada una de estas aplicaciones obliga a fijar distintos niveles de exigencias en las propiedades del árido reciclado.

#### 3.4.1.- Arido reciclado procedente de hormigón

##### 3.4.1.1 Obras de tierra y terraplenes <sup>(10 a 12)</sup>

Los residuos de la demolición de estructuras de hormigón pueden emplearse en obras de tierra y terraplenes. Para esta valorización hay que tener en cuenta la homogeneidad del residuo así como la ausencia de armaduras, contaminantes, y la granulometría. El empleo de estos escombros "limpios" en terraplén supone desaprovechar las posibilidades de estos materiales. Si a pesar de ello se utilizan en obras de tierra, se haría como si de materiales naturales se tratara. Según la norma francesa NF P 11-300, estos materiales están adscritos a la familia F7 de subproductos industriales y en este país se emplean en terraplenes y explanada los materiales resultantes del pretratamiento y los áridos reciclados no clasificados, siempre asociado a un tratamiento muy reducido, que puede limitarse a un machaqueo primario para satisfacer las exigencias granulométricas y en su caso, la eliminación de armaduras. Algunas administraciones norteamericanas de carreteras permiten el empleo de trozos de hormigón, siempre que no se supere el tamaño máximo (150-200 mm). En el caso de que el contenido en sulfatos solubles de los residuos -determinado según la norma francesa XP P 18 581- fuera superior al 7‰, la norma específica de terraplenes (NF P 11 300) señala que no se podrán estabilizar con ligantes hidráulicos, ni utilizarlos en zonas próximas a obras o capas tratadas con cemento, o en zonas inundables, ni tampoco en coronación de terraplenes.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.1	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN</b>		

Para prevenir la expansividad, hay que prestar atención al azul de metileno y al contenido en sulfatos, mientras que en la puesta en obra son la absorción de agua y la naturaleza frágil de los áridos reciclados, las variables a atender especialmente. Los departamentos del transporte de los estados de Illinois, Minnesota y Montana tienen especificaciones para la valorización de los escombros de hormigón y en particular, para los casos de empleo en obras de tierra y estabilizaciones.

### 3.4.1.2.- Carreteras

La incorporación de los materiales reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición a la infraestructura de una carretera, puede hacerse, siempre que se cumplan las condiciones técnicas y medioambientales exigidas, como materiales para explanaciones; en terraplenes y rellenos, y como áridos reciclados para distintas capas del firme.

En España las especificaciones técnicas que se refieren a la utilización de materiales en terraplenes y rellenos se recogen en los artículos 330 y 332 del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3). En el apartado 3.2, Características de los materiales, del art. 330, Terraplenes, se indica que *“Además de los suelos naturales, se podrán utilizar en terraplenes los productos procedentes de procesos industriales o de manipulación humana, siempre que cumplan con las especificaciones de este artículo y que sus características físico-químicas garanticen la estabilidad presente y futura del conjunto”*. Para rellenos localizados, art.332, se deben utilizar solamente suelos adecuados y seleccionados según el apartado 330.3, Materiales para terraplenes.

Las especificaciones técnicas que se refieren a la utilización de áridos reciclados en la construcción de capas de firmes de carreteras se encuentran esencialmente recogidas dentro de la normativa UNE-EN, el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3), y el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Conservación de Carreteras (PG-4).

En el PG-3 se hace mención expresa a la utilización de áridos reciclados procedentes de hormigón machacado en algunas unidades de obra para firmes de carretera como: Zahorras (art. 510) y Materiales tratados con cemento (suelocemento y gravacemento) (art.513). Además, se admite la utilización de materiales procedentes de residuos de construcción y demolición en Hormigón magro vibrado (art. 551) siempre y cuando hayan sido tratados adecuadamente para satisfacer las especificaciones técnicas establecidas. En algunos países se han utilizado estos áridos en mezclas bituminosas.

### Capas granulares sin tratar (Zahorras)

Se trata de la aplicación más común del hormigón triturado en carreteras, ya que puede absorber grandes volúmenes y normalmente se puede obtener la calidad deseada.

La mayor parte de los países que permiten la utilización de áridos reciclados de hormigón en carreteras, exigen a este material las mismas especificaciones que al árido natural, imponiendo además un contenido mínimo de hormigón y máximo de impurezas (materia orgánica, yeso, etc).

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.1	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN</b>		

Cuando se utilizan en capas granulares sin tratar, aunque inicialmente la capacidad de soporte puede ser menor que en las capas granulares convencionales, debido a la mayor dificultad para su compactación, a lo largo del tiempo se suelen cementar, igualando o superando la capacidad de soporte de otros materiales granulares. Generalmente se mezcla el material reciclado con arena de aportación que mejora su trabajabilidad y disminuye su permeabilidad.

En Francia, por ejemplo, el 75-80% de la producción de hormigón triturado se emplea como capa granular en este tipo de aplicaciones.

### **Materiales tratados**

El tratamiento del hormigón reciclado con cemento o ligantes bituminosos aumenta la resistencia del material, reduce la susceptibilidad frente al hielo, la permeabilidad y la posible lixiviación.

Suele ser necesario un contenido de ligante mayor en la mezcla para compensar la menor densidad del árido reciclado o la posible lixiviación.

#### **3.4.1.3.- Edificación y obra pública**

Las principales aplicaciones de los áridos procedentes de hormigón triturado son: árido grueso para hormigones, árido fino para morteros y finos para cementos.

#### **Árido para hormigón estructural**

En general, los áridos gruesos reciclados procedentes de hormigón, pueden ser utilizados tanto para hormigón en masa como para hormigón armado, manteniéndose los criterios de dosificación de los hormigones convencionales.

Las principales propiedades del hormigón reciclado son las siguientes.

La **demanda de agua** del hormigón fresco reciclado es mayor que la del hormigón fresco hecho con gravas naturales y el consumo de cemento para la misma resistencia algo mayor.

La **densidad** del hormigón reciclado es inferior a la del hormigón original; con el reemplazo del 100% del árido grueso, se puede obtener una densidad entre un 10-20% menor<sup>(13)</sup>.

Sustituciones de hasta 30% del árido convencional por árido reciclado, no alteran de forma significativa la **resistencia a compresión** del nuevo hormigón. Cuando se sustituye el 100% del árido grueso, la resistencia a compresión puede disminuir entre un 10 y un 20%<sup>(13)(14)</sup>.

El **módulo de elasticidad** del hormigón reciclado es siempre inferior (entre un 15 y un 40% ) al del hormigón de referencia<sup>(15)</sup>, y alcanza los valores menores cuando se utiliza también árido fino reciclado.

La **retracción y la fluencia** del hormigón reciclado se mantienen cuando el reemplazo del árido grueso es inferior a 20%, mientras que con un reemplazo del 100% del árido grueso la retracción puede aumentar hasta un 50% y la fluencia entre un 30-60%. Si se utiliza también árido fino reciclado ambos valores aumentan aún más<sup>(6)</sup>.



<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.1	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN</b>		

Para la misma dosificación, tanto la **absorción** como la **porosidad** del hormigón con árido reciclado aumentan. Según estudios españoles<sup>(16)</sup>, en un hormigón de referencia con absorciones comprendidas entre 5 y 6%, y porosidad entre 11 y 13%, puede alcanzar valores de absorción del orden del 8-9%, y porosidad entre 16-20%.

La **resistencia al hielo-deshielo** del hormigón reciclado depende de la resistencia al hielo-deshielo del hormigón original y de la dosificación del nuevo hormigón. Hormigones resistentes a las heladas darán lugar a hormigones reciclados que se comportarán bien frente a este tipo de ambiente.

El árido reciclado puede funcionar como un foco de propagación de la **carbonatación**, porque no impide el paso del CO<sub>2</sub> como un árido convencional, por lo que se debe tener un especial cuidado con la carbonatación.

Los áridos reciclados deberán limitar tanto el contenido de cloruros como de SO<sub>3</sub> para su uso en hormigones, al mismo valor que se contempla en las normas para los áridos convencionales.

La utilización de árido reciclado procedente de hormigón en hormigón estructural está incluida en el Anejo 15 de la EHE<sup>(17)</sup>, y establece unas limitaciones al uso del árido reciclado, cuyas líneas generales se señalan a continuación:

- La aplicación del árido reciclado se limitará a los casos de hormigón en masa y armado de resistencia característica no superior a 40 N/mm<sup>2</sup>, quedando excluido su empleo en hormigón pretensado.
- El árido reciclado debe obtenerse a partir del machaqueo de hormigón convencional, excluyendo el reciclaje de hormigones especiales tales como hormigones ligeros, hormigones con fibras o aquellos fabricados con cemento aluminoso, etc.
- Se contempla la utilización de la fracción gruesa del árido reciclado sustituyendo a un 20% en peso de la grava natural.
- La utilización del árido reciclado en hormigones que vayan a estar expuestos a ambientes agresivos, estará condicionada por la necesidad de tomar precauciones especiales.

El Anejo recomienda limitar el contenido de árido grueso reciclado al 20% en peso sobre el contenido total de árido grueso. Con esta limitación, las propiedades finales del hormigón reciclado apenas se ven afectadas en relación a las que presenta un hormigón convencional, siendo necesaria, para porcentajes superiores, la realización de estudios específicos y experimentación complementaria en cada aplicación.

La siguiente tabla recoge las especificaciones que debe cumplir el árido reciclado para esta aplicación:

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.1	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN</b>		

	<b>ÁRIDO RECICLADO</b>
Contenido de partículas < 4 mm	≤5%
Contenido de terrones de arcilla (*)	≤0,6%
Absorción	≤7%
Impurezas	
-Material cerámico	≤5%
-Partículas ligeras	≤1%
-Asfalto	≤1%
-Otros materiales (vidrio, plástico, metales, etc)	≤1%

(\*) Contenido máximo utilizando un 20% de árido reciclado, de forma que la combinación de árido reciclado y árido natural cumpla el límite de 0,25%

**Tabla 7:** Requisitos adicionales para el árido reciclado

En general, para hormigones reciclados con un porcentaje de árido grueso reciclado no superior al 20% se pueden utilizar las fórmulas del articulado, aunque para porcentajes mayores el Anejo propone unos coeficientes de corrección para poder utilizar la formulación propuesta en la EHE para estimar el módulo de elasticidad, la fluencia y la retracción del hormigón reciclado.

Resistencia a tracción	1
Módulo de elasticidad	0,8
Coeficiente de fluencia	1,25
Retracción	1,5

**Tabla 8:** Coeficientes de corrección para estimar las propiedades del hormigón reciclado fabricado con árido reciclado de hormigón

A nivel internacional, existe una gran variación entre los requisitos fijados por las diferentes normativas o recomendaciones, tanto en los requisitos exigidos al árido reciclado como en el uso de los hormigones reciclados.

### Árido para hormigón no estructural

La utilización de árido reciclado procedente de hormigón en hormigón no estructural está incluida en el Anejo 18 de la EHE, permitiéndose hasta un 100% de árido grueso reciclado, siempre que cumplan las especificaciones definidas en el Anejo 15 de la EHE<sup>(17)</sup> (Recomendaciones para la utilización de hormigones reciclados), recogidas en la Tabla 7.

### Árido fino para morteros

Una alternativa al empleo de estos áridos reciclados es su utilización como arena para la producción de morteros<sup>(18)(19)</sup>. Estos morteros presentan una resistencia a compresión algo menor que la de los morteros con árido natural. En lo referente a la absorción capilar y la adherencia presenta valores muy similares.

Considerando que los finos procedentes del hormigón machacado contienen una cierta cantidad de hidróxido de calcio, al mezclarlos con agua y materiales puzolánicos como cenizas volantes,

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.1	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN</b>		

humo de sílice o escorias de alto horno a temperatura ambiente adquieren propiedades hidráulicas y forman unos productos con una alta resistencia a compresión.

### **Cementos fabricados con finos procedentes de hormigón triturado**

Para este fin se utiliza una mezcla de finos menores de 5 mm procedentes de hormigón machacado (que se pulveriza para obtener la finura del cemento), escorias de horno alto pulverizadas o lodos con desechos de cemento procedente de las plantas de fabricación de hormigón, 2-3% de yeso y un acelerador inorgánico de fraguado<sup>(4)(6)</sup>. Comparando hormigones que tienen la misma consistencia y resistencia a compresión, hechos con cemento reciclado y con cemento Portland con escorias, se obtiene que presentan características similares en cuanto al desarrollo de la resistencia en el tiempo, retracción de secado y la resistencia a las heladas, mientras que el calor de hidratación es menor y la profundidad de carbonatación mayor al utilizar cementos reciclados.

En España no se fabrican esta clase de cementos, pero por ejemplo en Japón en el año 1988 ya se producían unos 2000 m<sup>3</sup> de hormigón hecho con cementos reciclados cada mes, para ser utilizados en elementos no estructurales, como aplicaciones para cimentaciones, muros de revestimiento o aplicaciones de hormigón en masa. El precio del hormigón fabricado con cemento reciclado resulta aproximadamente un 4% menor que el del hormigón normal.

### **3.4.2.- Árido reciclado procedente de residuos cerámicos**

#### **3.4.2.1 Obras de tierra y terraplenes<sup>(20)</sup>**

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. Esto implica notables costes, por lo que el objetivo es producir áridos que puedan ser utilizados en usos de mayor valorización, como capas de firme de modo que se puedan compensar en la medida de lo posible dichos costes. En el caso de áridos reciclados heterogéneos que no contengan sustancias peligrosas ni contaminantes inertes se podrían utilizarse en la construcción de rellenos y terraplenes, siendo interesante el aprovechamiento de la fracción 0/20 como material para la construcción de terraplenes.

#### **3.4.2.2.- Carreteras**

Los áridos reciclados procedentes de materiales cerámicos no cumplen en general las especificaciones que se exigen en nuestro país a los áridos para capas de firme como zahorras o materiales tratados con cemento. Su utilización en infraestructuras de carreteras se centra esencialmente en materiales para explanaciones (terraplenes y rellenos) de distinta categoría según su composición y características.

#### **3.4.2.3.- Edificación y obra pública**

##### **Árido para hormigón**

Una de las aplicaciones del árido reciclado cerámico es la fabricación de hormigones y morteros.

Dada la reducida densidad del escombros triturado, estaría en la condición de árido ligero, por lo que puede ser de aplicación para la obtención de hormigones ligeros sin finos. El hormigón no ligero fabricado con ladrillo triturado suficientemente denso, se puede utilizar en la construcción de

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.1	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN</b>		

estructuras de hormigón en masa y hormigón armado, tales como: muros de sótano, pilas de hormigón, chimeneas, todo tipo de productos de hormigón armado prefabricado, elementos para tejados, bloques de hormigón o tejas de hormigón para tejados. La resistencia de este tipo de hormigón reciclado disminuye considerablemente en relación con la del hormigón normal.

Las principales características de este tipo de hormigones son las siguientes:

**Dosificación del hormigón con áridos reciclados:** el contenido de cemento debe ser aproximadamente un 20% superior al de un hormigón normal<sup>(6)</sup>. Si se usa la fracción 0/4 mm de los escombros de albañilería triturada, se necesita una mayor cantidad de cemento para alcanzar la equivalente resistencia del hormigón. Para hormigones ligeros sin finos con ladrillos triturados, el contenido de cemento puede variar entre 130 y 170 kg/cm<sup>3</sup>, aunque se recomienda aumentar estos valores hasta 200-230 kg/m<sup>3</sup>.

El hormigón fabricado con ladrillo triturado presenta una peor **trabajabilidad**, debido a la textura rugosa de la superficie del ladrillo triturado. La **absorción** varía en función de la composición del árido reciclado empleado, alcanzando los valores más altos (aproximadamente entre el 22-30% del peso seco de los áridos)<sup>(6)</sup> cuando se utiliza árido procedente de ladrillos, valores intermedios con áridos procedentes principalmente de hormigón y los valores inferiores con el empleo de arena natural.

La **densidad** del hormigón no sólo depende del contenido de cemento, sino también de la densidad y la granulometría de los escombros. La densidad del hormigón fabricado con árido reciclado cerámico<sup>(6)</sup> varía entre 1600 y 2100 kg/m<sup>3</sup>, mientras que la densidad de los hormigones ligeros sin finos está comprendida entre 1400 y 1700 kg/m<sup>3</sup>.

La **resistencia a compresión** de este tipo de hormigones es reducida; las máximas resistencias alcanzadas están en 30 N/mm<sup>2</sup> con 350 kg/cm<sup>3</sup> de cemento y ladrillos de densidad cercana a 2 t/m<sup>3</sup>. Los valores más normales están en el rango 10-20 N/mm<sup>2</sup> <sup>(6)</sup>.

La **resistencia a tracción y flexión** del hormigón con áridos procedentes de ladrillos triturados no sufre grandes variaciones, pudiendo alcanzar en ocasiones valores superiores, hasta un 10%, a los del hormigón normal <sup>(6)(21)(22)(23)</sup>.

El **módulo de elasticidad** de hormigones con árido reciclado cerámico, está comprendido entre la mitad y dos tercios del de un hormigón normal de la misma resistencia. Como orden de magnitud<sup>(22)(23)</sup>, diferentes ensayos han obtenido en hormigones de resistencia a compresión igual a 32 N/mm<sup>2</sup> un módulo alrededor de 15.000 N/mm<sup>2</sup>.

Existe una relación lineal entre el módulo de elasticidad y la resistencia a compresión para este tipo de hormigones.

La **fluencia** es mayor para todo tipo de hormigones con árido reciclado cerámico.

La **retracción** de secado final del hormigón con árido reciclado cerámico es aproximadamente un 40% mayor que la de un hormigón ordinario (en particular entre 20 y 60% para hormigones con ladrillos triturados, cerca de un 49% para ladrillos silico-calcáreos triturados)<sup>(6)</sup>.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.1	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN</b>		

**Permeabilidad.** Los ensayos de penetración de agua dan profundidades hasta un 50% superiores a las obtenidas en los hormigones convencionales.

La **resistencia a las heladas** del hormigón con ladrillos triturados se considera inadecuada. Se produce una intensa descamación sobre los áridos cercanos a la superficie del hormigón.

La velocidad de **carbonatación** del hormigón con árido reciclado procedente de ladrillos o ladrillos silico-calcáreo, es mayor que en hormigones normales, debido a la porosidad del árido. Este efecto puede compensarse incrementando el contenido de cemento en el hormigón.

El hormigón con árido reciclado cerámico presenta una buena **resistencia al fuego** si se conserva convenientemente seco.

Las principales características que se le exige al árido grueso reciclado cerámico para la fabricación de hormigón se incluyen en la siguiente tabla (según las recomendaciones del TC 121 DRG de Rilem, 1994)<sup>(24)</sup>.

Exigencias obligatorias	RCAC Tipo I	Método de ensayo
Densidad seca mínima de las partículas (kg/m <sup>3</sup> )	1500	ISO 6783 y 7033
Máxima absorción de agua (%)	20	ISO 6783 y 7033
Máx. contenido de material de densidad(*) <1800 kg/m <sup>3</sup> (%)	10	ASTM C123
Máx. contenido de material de densidad(*) <1000 kg/m <sup>3</sup> (%)	1	ASTM C123
Máx. contenido de materiales extraños (metales, vidrios, materiales blandos, betún) (%)	5	Visual
Máx. Contenido de metales (%)	1	Visual
Máx. Contenido de materia orgánica (%)	1	NEN 5933
Máx. contenido de finos (<0,063mm) (%)	3	PrEN 933-1
Máx. contenido de arena (<4mm)	5	PrEN 933-1
Máx. Contenido de sulfatos (calculado como SO <sub>3</sub> )	1	Bs 812
Contenido máx. de partículas con textura superficial lisa (%)	30	NEN 5941
Pérdida de peso en los ciclos hielo-deshielo (%)	3	NEN 5924

(\*) determinada en condiciones de árido saturado con la superficie seca.

**Tabla 9:** Características de los áridos reciclados cerámicos para la fabricación de hormigón

Se debe limitar también el contenido de cloruros en función del tipo de hormigón a los siguientes valores<sup>(6)</sup>:

Fracción	Máximo contenido de cloruros en % del peso del árido seco		
	hormigón en masa	hormigón armado	hormigón pretensado
Fracción 0/4	1,0	0,1	0,015
Resto de fracciones	1,0	0,05	0,007

**Tabla 10:** Contenido máximo de cloruros del árido reciclado cerámico para la fabricación de hormigón

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.1	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN</b>		

Es importante el control de calidad para evitar reducir la calidad del hormigón fabricado, que de acuerdo con las experiencias prácticas, ha tenido su origen en la presencia de impurezas, en la utilización de un árido que originó segregación y en la falta de agua para hidratar el cemento.

En general, los áridos gruesos reciclados procedentes de residuos cerámicos, pueden ser utilizados tanto para hormigón en masa como para hormigón armado. Según las recomendaciones de la RILEM<sup>(24)</sup>, el árido reciclado procedente de escombros de albañilería se podría utilizar en hormigones con categoría resistente de hasta C 16/20, excepto en ambientes agresivos, en los que estaría prohibida su utilización.

La categoría resistente se puede incrementar a C 30/37 dependiendo de que la densidad de los áridos reciclados, determinada en condiciones de saturación con la superficie seca, sea superior a 2000 kg/m<sup>3</sup>.

En ausencia de datos precisos relacionados con un material reciclado específico, se han propuesto una serie de factores para evaluar las propiedades del hormigón reciclado, que se reflejan en la siguiente tabla<sup>(24)</sup>.

Resistencia a tracción	1
Módulo de elasticidad	0,65
Coeficiente de fluencia	1
Retracción	2

**Tabla 11:** Coeficientes de corrección para estimar las propiedades del hormigón reciclado fabricado con árido reciclado cerámico

El aumento de la fluencia al utilizar áridos reciclados se tiene en cuenta a través de la disminución del módulo de elasticidad.

### 3.5.- OBRAS REALIZADAS

#### 3.5.1.- Arido reciclado procedente de hormigón

##### 3.5.1.1.- Carreteras

Existe a nivel internacional una amplia experiencia en la utilización de áridos reciclados procedentes de hormigón en capas de firmes de carreteras, fundamentalmente en capas granulares. En Europa es práctica habitual en países como Francia, Reino Unido, Países Bajos, Alemania, Austria, Suiza y Dinamarca.

En nuestro país se están utilizando áridos reciclados procedentes de hormigón en capas granulares en polígonos industriales y urbanizaciones: En carreteras autonómicas y estatales la utilización ha sido escasa y generalmente no figuran relacionadas, ni se ha hecho un seguimiento de su comportamiento.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.1	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN</b>		

### 3.5.1.2.- Edificación y obra pública

Aunque a nivel práctico, el uso de árido reciclado procedente de hormigón para la fabricación de un nuevo hormigón, es muy reducido en España, existen ya algunos casos en los que se ha utilizado o está previsto utilizar áridos reciclados.

#### ***Puente de Marina Seca del Forum 2004 de Barcelona***

El puente de Marina Seca, una de las obras emblemáticas del FOURM 2004 de Barcelona, fue construido utilizando hormigón reciclado en alguno de sus elementos. Se utilizó un árido reciclado de un único origen (fracción 4/25 mm), con una absorción media de 6,7%, exento de cloruros, y sulfatos. Más del 95% del árido reciclado eran partículas de hormigón. La cantidad de finos inferiores a 0,063 mm fue del 1% y el aporte de finos menores de 4 mm fue del 10%, lo que obligó a una ligera corrección en la cantidad de arena.

Se utilizó una sustitución del 20% de árido reciclado previamente presaturado, con una grado de saturación entre el 80% y el 90%.

La resistencia obtenida fue de 47,8 N/mm<sup>2</sup>, y los resultados de los ensayos de penetración de agua fueron adecuados. La puesta en obra de este hormigón tampoco presentó ninguna dificultad.

#### ***Puente atirantado sobre el rio Turia<sup>(25)</sup>***

La experiencia piloto, que finalizará en el año 2008, propone la utilización de hormigón reciclado en un puente atirantado de hormigón armado, situado en Manises (Valencia), propiedad de la Diputación de Valencia.

Este puente se ejecutará como sustitución de una estructura de hormigón ya existente. El objetivo del proyecto es reciclar el material de hormigón procedente de esta estructura para la fabricación de parte del hormigón de la nueva estructura, utilizando una sustitución del 20% del árido natural por árido reciclado en el hormigón de un tramo de la losa.

Las condiciones de utilización de los áridos reciclados y del hormigón son las siguientes:

- El árido reciclado así producido se utilizará como sustitución de una parte del árido grueso natural, en un porcentaje no superior al 20%. El árido mezcla así utilizado deberá cumplir las especificaciones que establece la EHE para los áridos naturales.
- Calidad del hormigón de origen  $f_{cm}$  deberá ser superior a 25 N/mm<sup>2</sup>.
- Resistencia máxima hormigón reciclado  $f_{cm} < 50$  N/mm<sup>2</sup>.
- Estudios específicos en ambientes distintos al I y IIb.

Fuera de España la experiencia práctica en la utilización de hormigón reciclado es más amplia. Algunos de los proyectos llevados a cabo se resumen a continuación <sup>(26)</sup>.

#### **Países Bajos**

En 1988 se empleó aproximadamente 500 m<sup>3</sup> de hormigón reciclado en la construcción de los estribos de un viaducto en la carretera RW 32 cerca de Meppel.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.1	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN</b>		

En 1990 se construyó un segundo viaducto en esa misma zona. En este caso se utilizó árido grueso reciclado (en un porcentaje del 20%) para todas las partes de hormigón del viaducto. La cantidad total de hormigón reciclado que se usó fue de 11.000 m<sup>3</sup>.

En las obras de la compuerta del puerto en las proximidades de Almelo (en 1988) se emplearon unas 2.000 t de hormigón reciclado para la construcción de la losa de hormigón bajo el agua.

Debido a los buenos resultados obtenidos en la utilización de hormigón reciclado, desde 1991 se exige la utilización de árido de hormigón reciclado en un porcentaje del 20% de la fracción gruesa en todos los proyectos de hormigón, con excepción de las estructuras de hormigón pretensado.

### Reino Unido

La primera experiencia práctica en la que se utilizó hormigón con áridos reciclados en el Reino Unido se llevó a cabo en Watford en el año 1995 durante la construcción de un bloque de oficinas. Se empleó hormigón triturado procedente de la demolición de un edificio de 12 plantas en el centro de Londres. El árido grueso se utilizó para la construcción de cimentaciones, pilares y forjados.

Las características de cada tipo de hormigón quedan reflejadas en la siguiente tabla:

	CIMENTACIONES	FORJADOS	HORMIGÓN BOMBEADO
<b>Resistencia</b>	C25	C35	-
Cemento	>330 kg/m <sup>3</sup>	>330 kg/m <sup>3</sup>	>340 kg/m <sup>3</sup>
	50% de escorias de horno alto	70% de escorias de horno alto	
Relación agua/cemento	< 0,50	< 0,50	-
Cantidad de árido grueso reciclado	985 kg/m <sup>3</sup>	985 kg/m <sup>3</sup>	50 kg/m <sup>3</sup>
Asentamiento	75 mm	75 mm	-

**Tabla 12:** Características del hormigón reciclado utilizado en un bloque de oficinas en Watford

### Bélgica

Para la ampliación del puerto de Antwerp, se procedió en 1987 a la demolición de varios muros del puerto y la construcción de una compuerta mayor. La demolición se realizó con explosivos, originando unos 80.000 m<sup>3</sup> de escombros. Por consideraciones tanto ambientales como económicas se optó por la utilización de los escombros de hormigón para la fabricación de hormigón reciclado.

El hormigón producido disponía de suficiente resistencia a compresión ( $f_c$  de 35 N/mm<sup>2</sup>) y retracción aceptable (<150  $\mu$ m/m). Para mejorar la trabajabilidad del hormigón se optó por



<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.1	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN</b>		

presaturar los áridos reciclados antes de incorporarlos a la mezcla, corrigiendo así la cantidad de agua añadida.

Después de casi 15 años de servicio la estructura no ha presentado problemas de durabilidad.

### **Alemania**

En Alemania se usó árido reciclado para la construcción de grandes bloques de hormigón como elementos decorativos en el Centro de Exposiciones de Magdeburg (1999). Estos bloques se encuentran en el exterior y en contacto con agua. En este caso, solo se empleó árido grueso reciclado.

En 1993-1994 se construyó la sede de la Fundación Alemana para el Medioambiente (Deutsche Bundesstiftung Umwelt). Se empleó árido reciclado en la construcción de los elementos estructurales de hormigón, realizándose una estricta selección de los áridos reciclados y exhaustivo control de calidad. Se utilizaron 290 kg/m<sup>3</sup> de cemento Pórtland CEM I 42,5 R; el árido grueso era reciclado (con tamaños comprendidos entre 4 y 32 mm) y el árido fino arena natural. La mezcla contenía además 70 kg/m<sup>3</sup> de cenizas volantes y plastificante. Con un contenido de agua de 201 kg/m<sup>3</sup> se consiguió una resistencia cúbica de 35 N/mm<sup>2</sup>.

### **Dinamarca**

Uno de los proyectos más significativos sobre reutilización de escombros de demolición para la fabricación de hormigón ha tenido lugar en Dinamarca. La construcción del "Great Belt Link" una gran red de enlace entre Dinamarca y Suecia, suponía la modificación de la red de carreteras existentes y la demolición de varias estructuras, entre las que se encontraba la demolición de un puente de hormigón armado. En esta demolición se llevaron a cabo distintas investigaciones sobre técnicas de demolición y utilización del hormigón triturado como árido para un nuevo hormigón. Finalmente los escombros fueron procesados y empleados en la fabricación de hormigón, que se utilizó para la construcción de "La casa reciclada", en Odense<sup>(49)</sup> y las cimentaciones de pantallas acústicas. Esta casa reciclada consiste en un bloque de 14 apartamentos de tres pisos con sótano.

### **Japón**

En Japón se emplean los áridos reciclados como material para la fabricación de bloques de hormigón prefabricados.

## **3.5.2.- Arido reciclado procedente de residuos cerámicos**

### **3.5.2.1.- Carreteras**

En nuestro país no existe experiencia en la utilización de árido reciclado de residuos cerámicos en capas de firmes de carreteras. Si se han utilizado mezclas procedentes de hormigón y cerámico, por ejemplo en calles y carreteras de la Ciudad Olímpica de Barcelona.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.1	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN</b>		

### 3.5.2.2.- Edificación y obra pública

La experiencia práctica en la utilización de hormigón reciclado con áridos procedentes de escombros de albañilería es escasa, aunque se han llevado a cabo algunos proyectos que se resumen a continuación <sup>(26)</sup>.

#### Países Bajos

En los Países Bajos es habitual la utilización de árido reciclado procedente de hormigón (se exige su empleo en un porcentaje del 20% de la fracción gruesa en todos los proyectos de hormigón, con excepción de las estructuras de hormigón pretensado). Debido a la falta de disponibilidad de este tipo de árido reciclado ya se han llevado a cabo varios proyectos piloto donde se ha reemplazado el 20% del árido grueso por una mezcla de hormigón y ladrillo triturado.

En 1992 se empleó árido reciclado (mezcla de hormigón y ladrillo) en la construcción de los estribos de un viaducto cerca de Helmond.

En las obras de la compuerta del puerto en las proximidades de Schijndel (en 1992), se emplearon unos 300 m<sup>3</sup> de hormigón con árido reciclado procedente de una mezcla de hormigón y ladrillo.

Desde 1994 el Gobierno holandés permite el uso de este tipo de árido reciclado (mezcla de hormigón y ladrillo) en hormigón estructural, con un reemplazo máximo del 20% del árido grueso. A pesar de esta restricción se han llevado a cabo varios proyectos piloto que han demostrado la posibilidad de utilizar cantidades mayores de árido reciclado, siempre y cuando se tomen las precauciones necesarias.

Entre 1997 y 1998 se construyeron 272 casas unifamiliares empleando un 100% de árido reciclado. Se utilizó para la construcción de muros de carga de hormigón en masa y elementos de hormigón para fachadas y suelos.

#### Alemania

El uso del árido reciclado en Alemania data desde aproximadamente 1950 y se ha usado principalmente para la construcción de viviendas.

En 1996-1997, se desmanteló una zona militar a las afueras de Itzehoe que produjo aproximadamente unas 50.000 t de escombros cerámicos y unas 20.000 t de escombros de hormigón. Estos se utilizaron para la edificación nuevamente de esa misma zona.

#### Reino Unido

La primera experiencia práctica en la que se utilizó hormigón con áridos reciclados mezcla de hormigón y ladrillos se llevó a cabo en Cardington (1996), para la construcción de la losa de la segunda planta de un edificio de esta ciudad. La losa estaba fuertemente armada y tenía 0,5 m de espesor.

Se optó por una sustitución del 20% del árido grueso y se emplearon unas 100 t de árido reciclado (que contenía hasta un 50% de ladrillo). La dosificación del hormigón empleado fue la misma que

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.1	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN</b>		

la de la losa construida en la primera planta de ese mismo edificio, y para ambos hormigones se obtuvieron unas resistencias similares (60 N/mm<sup>2</sup> a los 91 días). El uso de árido reciclado no afectó al bombeo ni a la puesta en obra del hormigón.

## España

La única experiencia de la que se tiene constancia fue la construcción de la ciudad Olímpica de Barcelona <sup>(27)</sup>. Las construcciones situadas en esta zona fueron demolidas (alcanzando una cantidad aproximada de escombros de 1,5 millones de toneladas), para ello se utilizaron procedimientos selectivos de demolición, realizando in situ una primera eliminación de impurezas. Sólo se trataron materiales inertes como hormigón, piedra, cerámicas y ladrillos, procedentes de la demolición de estructuras, cerramientos y cimentaciones. Otros materiales mezclados o aquellos que contenían impurezas como madera, plásticos o acero se rechazaron. Los materiales reciclados se utilizaron para construir las calles y carreteras de la Ciudad Olímpica y estructuras de escollera en la línea litoral.

## **4.- CONSIDERACIONES MEDIOAMBIENTALES**

### **Generalidades**

La Ley 10/1998, de Residuos, de 21 de abril, establecía en su artículo 3 que tendrían consideración de residuos todos aquellos que figurasen en el Catálogo Europeo de Residuos (CER). Este Catálogo fue aprobado por la Decisión 94/3/CE de 20 de diciembre de 1993, y complementado con la Decisión 94/904/CE, ambas aprobadas en el Real Decreto 952/1997.

Las Decisiones Comunitarias 94/3/CE y 94/904/CE han sido derogadas por la Decisión 2000/532/CE mediante la que se aprueba La Lista Europea de Residuos. La orden MAM/304/2002 de 8 de febrero (con corrección de errores de 12 de marzo), publica en su Anejo 2 la mencionada Lista Europea de Residuos.

Los residuos de construcción y demolición vienen incluidos en la Lista Europea de Residuos en el Capítulo 17 correspondiente a "Residuos de la construcción y demolición" con los siguientes códigos:

- 17 01 Hormigón, ladrillos, tejas y materiales cerámicos
  - 17 01 01 Hormigón
  - 17 01 02 Ladrillos
  - 17 01 03 Tejas y materiales cerámicos
  - 17 01 06 Mezclas, o fracciones separadas, de hormigón, ladrillos, tejas y materiales cerámicos que contienen sustancias peligrosas
  - 17 01 07 Mezclas de hormigón, ladrillos, tejas y materiales cerámicos, distintas de las especificadas en el código 17 01 06

Los áridos reciclados procedentes de hormigón procederían de residuos tipificados con el código 17 01 01, mientras que los áridos reciclados procedentes de fábrica de ladrillo procederían de residuos tipificados con los códigos 17 01 02, 17 01 03 y 17 01 07.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.1	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN</b>		

Si bien la mayor parte de los residuos que se generan en actividades de construcción y demolición no suelen revestir características de peligrosidad, su recogida de forma no selectiva provoca la mezcla de distintos tipos de residuos que en general no son peligrosos pero que, al mezclarse, pueden dar lugar a residuos contaminados en su conjunto, lo que impide someterlos a un aprovechamiento apropiado, o a que se envíen a vertederos que no cuentan con las barreras de protección adecuadas al tipo de residuo que reciben.

Entre los materiales y sustancias que pueden encontrarse entre los RCD y que pueden tener alguna característica de peligrosidad cabe destacar:

- Aditivos de hormigón (inflamable)
- Adhesivos, másticos y sellantes (inflamable, tóxico o irritante)
- Emulsiones alquitranadas (tóxico, cancerígeno)
- Materiales a base de amianto, en forma de fibra respirable (tóxico, cancerígeno)
- Madera tratada con fungicidas, pesticidas, etc (tóxico, ecotóxico, inflamable)
- Revestimientos ignífugos halogenados (ecotóxico, tóxico, cancerígeno)
- Equipos con PCB (ecotóxico, cancerígeno)
- Luminarias de mercurio (tóxico, ecotóxico)
- Sistemas con CFCs
- Elementos a base de yeso (fuente posible de sulfhídrico en vertederos, tóxico, inflamable)
- Envases que hayan contenido sustancias peligrosas (disolventes, pinturas, adhesivos, etc)

Sin embargo la mayor parte de los RCD se pueden considerar inertes o asimilables a inertes, y por lo tanto su poder contaminante es relativamente bajo pero, por el contrario, su impacto visual es con frecuencia alto por el gran volumen que ocupan y por el escaso control ambiental ejercido sobre los terrenos que se eligen para su depósito.

### **Ventajas**

Los principales beneficios ambientales que se producen son:

- Disminución del volumen de escombros que se depositan en vertederos.
- Reducción del número de explotaciones necesarias para suministrar la materia prima original, con el consiguiente beneficio en cuanto a impacto ambiental y de protección de los recursos naturales.

### **Inconvenientes**

Los aspectos ambientales negativos que se deben destacar son:

- Generación de polvo, ruido y vibraciones producidos en las operaciones de tamizado y machaqueo en las plantas de procesamiento de los áridos, por lo que hay que estudiar el emplazamiento más conveniente para reducir en lo posible su impacto ambiental. En el caso de plantas fijas de reciclaje de áridos es conveniente situarlas en las proximidades de una planta de fabricación de hormigón.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.1	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN</b>		

- Posibles impactos sobre la salud, causados por el inadecuado manejo y/o protección frente a componentes peligrosos que pueden existir en los residuos ( particularmente en algunos de demolición), como el amianto.

## **5. ASPECTOS ECONÓMICOS**

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 han consultado las 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 vertido de residuos inertes. En la tabla 13 se incluyen algunos precios de admisión de los residuos en las plantas de reciclado<sup>(50)(52)</sup>.

	<b>COSTE DE VERTIDO DE RESIDUOS EN LAS PLANTAS DE RECICLADO</b>
RCDs mezclados	12 euros/t
RCDs de hormigón	6 euros/t
Hormigón limpio	4 euros/t
Residuo sucio	16 euros/t

**Tabla 13:** Costes de vertido de RCDs en una planta de reciclado

Por otra parte, si comparamos los precios de los áridos naturales con los de los áridos reciclados, los primeros pueden variar entre 10 y 20 euros/t<sup>(51)</sup>, mientras que los precios de los áridos reciclados suelen ser inferiores, según se recoge en la siguiente tabla (datos facilitados por varias plantas de reciclado)<sup>(50)(52)</sup>.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.1	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN</b>		

	<b>ARIDO RECICLADO</b>
Arena de miga	3,5 - 4,15 euros/t
Zahorra 0-20 mm	3,5 euros/t
Zahorra 0-40 mm	5 euros/t
Zahorra 0-60 mm	5 euros/t
Zahorra procedente de asfalto 0-40 mm	6 euros/t
Grava cerámica 6-12 mm	1,5 euros/t
Grava cerámica 12-80 m	3,5 euros/t
Grava de hormigón 6-20 mm	6,5 euros/t
Grava 20-40 mm	3,5 euros/t
Tierras para relleno	0,1 euros/t

**Tabla 14:** Precio de los áridos reciclados

## **6.- NORMATIVA TÉCNICA**

### **Terraplenes y rellenos**

#### *ESPAÑA*

En España las especificaciones técnicas que se refieren a la utilización de materiales en terraplenes y rellenos en carreteras se recogen en los artículos 330 y 332 del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3).

En el apartado 3.2, Características de los materiales, del art. 330, Terraplenes, se indica que *“Además de los suelos naturales, se podrán utilizar en terraplenes los productos procedentes de procesos industriales o de manipulación humana, siempre que cumplan con las especificaciones de este artículo y que sus características físico-químicas garanticen la estabilidad presente y futura del conjunto”*.

En el apartado 3, Materiales, del art. 332, Rellenos localizados, se indica que solamente se utilizarán suelos adecuados y seleccionados según el apartado 330.3, Materiales para terraplenes.

### **Capas de firmes de carreteras**

#### *ESPAÑA*

En España las especificaciones técnicas que se refieren a la utilización de áridos reciclados en la construcción de capas de firmes de carreteras se encuentran esencialmente recogidas dentro de la normativa UNE-EN, el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3) y el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Conservación de Carreteras (PG-4).

### Normativa UNE-EN

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.1	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN</b>		

Desde el 1 de junio de 2004 son de obligado cumplimiento en nuestro país las siguientes normas armonizadas relativas a áridos para capas de firmes de carreteras:

- UNE-EN 12620:2002, “Áridos para hormigón”.
- UNE-EN 13043:2002, “Áridos para mezclas bituminosas y tratamientos superficiales de carreteras, aeropuertos y otras zonas pavimentadas”.
- UNE-EN 13242:2002, “Áridos para capas granulares y capas tratadas con conglomerantes hidráulicos para uso en capas estructurales de firmes”.

Además, dentro de CEN se elaboró la Norma Europea EN 13285:2003, “Mezclas de áridos sin ligantes. Especificaciones”, no armonizada, y que ya ha recibido el rango de norma UNE-EN.

En las tres normas europeas armonizadas (UNE-EN 12620:2002, UNE-EN 13043:2002 y UNE-EN 13242:2002) se definen los “áridos reciclados” como los áridos resultantes del tratamiento de material inorgánico previamente utilizado en la construcción. En el apartado 1 de las normas europeas armonizadas, “Objeto y campo de aplicación”, se señala que en ellas se especifican las propiedades de los áridos obtenidos por tratamiento de materiales naturales, artificiales o reciclados para su utilización en las respectivas unidades.

Con la finalidad de considerar las distintas exigencias que pueden establecerse para una determinada característica de los áridos en función de las circunstancias del uso que se les vaya a dar, en las normas se establece, para algunas de sus características, una clasificación por categorías. La aplicación concreta de las normas hace necesario que se fijen las categorías de las distintas especificaciones en función de la utilización prevista. En las normas en vigor no está completado lo relativo a requisitos adicionales y métodos de ensayo específicos para áridos reciclados. Está previsto ir introduciendo, mediante enmiendas a cada norma, las cláusulas con especificaciones concretas.

Las normas armonizadas incluyen, entre otros, un anexo normativo sobre el control de producción en fábrica, y un anexo ZA, informativo, que recoge las cláusulas que contienen las condiciones cuyo cumplimiento permite al fabricante estampar el marcado CE en su producto. Además, se incluyen las tareas que tienen que realizar los fabricantes y los organismos notificados para certificar, así como la información que debe acompañar al marcado CE.

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

Mediante ORDEN FOM/891/2004, de 1 de marzo (BOE de 6 de abril de 2004), se actualizaron una serie de artículos del PG-3 relativos a firmes,. En el nuevo articulado se hace mención expresa a la utilización de materiales granulares reciclados en capas de firmes de carreteras en los siguientes artículos:

- 510.- Zahorras.
- 513.- Materiales tratados con cemento (suelocemento y gravacemento).
- 540.- Lechadas bituminosas.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.1	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN</b>		

- 542.- Mezclas bituminosas en caliente.
- 551.- Hormigón magro vibrado.

En cada artículo, en el apartado sobre las características generales de los áridos, se incluyen párrafos en los que se indica que el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares, 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. Si se considera conveniente, para caracterizar los componentes solubles de los áridos de cualquier tipo se empleará la norma NLT-326, Ensayo de lixiviación en materiales para carreteras (Método del tanque).

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

Desde el 18 de enero de 2002 está en vigor la Orden Circular 8/2001 sobre Reciclado de Firmes, que recoge los tres primeros artículos del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Conservación de Carreteras (PG-4), con los que se inicia su redacción:

- Artículo 20. Reciclado in situ con emulsión de capas bituminosas.
- Artículo 21. Reciclado in situ con cemento de capas de firme.
- Artículo 22. Reciclado en central en caliente de capas bituminosas.

En tanto que los artículos superan la tramitación en el ámbito europeo y son aprobados por el Ministerio de Fomento, en la propia Orden Circular se indica que serán de aplicación en los Pliegos de Prescripciones Técnicas Particulares para obras de conservación de carreteras.

Estas prescripciones técnicas se encuadran dentro del "Reciclado de pavimentos asfálticos" (Ficha técnica 5.1 del Catálogo).

### **Hormigón**

#### *ESPAÑA<sup>(17)</sup>*

En Noviembre de 2002 se constituyó el Grupo de Trabajo "Hormigón Reciclado" a instancias de la Comisión Permanente del Hormigón y de ACHE para elaborar un documento que complementara a la reglamentación actual de hormigón estructural (Instrucción EHE). La nueva EHE incluye un anejo (Anejo 15), que recoge las recomendaciones específicas sobre la utilización del árido reciclado procedente de hormigón en hormigón estructural.

Además, la utilización de árido reciclado procedente de hormigón en hormigón no estructural está incluida en el Anejo 18 de la EHE.

#### *RILEM<sup>(23)</sup>*



<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.1	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN</b>		

- RILEM (International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures): "Specifications for Concrete with Recycled Aggregates". Materials and Structures, N°27. p.p. 557-559, 1994.

#### *JAPÓN<sup>(28)(29)(30)</sup>*

- "Proposed standard for the use of recycles aggregate and recycled aggregate concrete". Building Contractors Society of Japan (BCS). 1977.
- "Proposed Recommended Practice for Design and Construction of Concrete Structures Made Using Recycled Aggregate". 1986.
- "Proposed Specification for Concrete Containing Recycled Coarse Aggregate". 1996.

#### *BELGICA<sup>(31)</sup>*

- VINCKE, J.; ROUSSEAU, E.: "Recycling of Construction and Demolition Waste in Belgium: Actual Situation and Future Evolution". Demolition and Reuse of Concrete and Masonry. 1994.

#### *AUSTRALIA<sup>(32)(33)</sup>*

- Guía australiana para la utilización de árido reciclado (RCA) en hormigón. 1998.

#### *HONG KONG<sup>(34)</sup>*

- Recomendaciones BS 812. 2002.

#### *ALEMANIA<sup>(35)</sup>*

- DIN 4226-1:2000: "Concrete Aggregate".

#### *REINO UNIDO<sup>(36)(37)(38)(39)(40)</sup>*

- BSG "Use of industrial by-products and waste materials in building engineering". British Standard Guide 6543. 1985.
- "Recycled Aggregates: BRE Digest 433" 1998.
- "Quality Control: The production of Recycled Aggregates. BR 392". ISBN 186081 381 X
- BS 8500-2:2002: "Concrete-Complementary British Standard to BS EN 206-1. Part2: Specification for Constituent Materials and Concrete".
- WRAP "Mix Design Specification for Low Strength Concretes Containing Recycled and Secondary Aggregates". 2002.

#### *BRASIL<sup>(41)</sup>*

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.1	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN</b>		

- "Recycled Aggregate Standardization in Brazil". Universidade Estadual Paulista, Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, Universidade de Taubaté. 2004.

#### FRANCIA<sup>(42)</sup>

- Guide technique pour l'utilisation des matériaux régionaux d'Île-de-France: les bétons et produits de démolition recyclés-LCPC, Paris. Diciembre 1996.

#### DINAMARCA<sup>(43)(44)</sup>

- Danish Concrete Code. "Use of recycled demolition rubble". 1989.
- Danish Concrete Association. "Recommendations for the use of recycled aggregates for concrete in passive environmental class". Publicación N°34, 1990.

#### PAISES BAJOS<sup>(45)</sup>

- CUR report nr. 125 "Crushed Concrete Rubble and Masonry Rubble as Aggregate for Concrete". FALTA AÑO

#### AUSTRIA<sup>(46)(47)(48)</sup>

- Austrian Quality Protection Association for Recycled Building Materials. "Guidelines for recycled building materials". 1992.
- Guidelines for Recycled Construction Materials from Building Construction, Application Cement-bonded Substances.
- Guidelines for Recycled Construction Materials from Building Construction, Application Unbound Substances.

## **7.- REFERENCIAS**

- [1] PLAN NACIONAL INTEGRADO DE RESIDUOS (PNIR) 2007-2015. Anexo 6. II Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición (II PNRCD).
- [2] PLAN DE GESTIÓN INTEGRADA DE LOS RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN DE LA COMUNIDAD DE MADRID (2002-2011). Consejería de Medio Ambiente. Comunidad de Madrid. Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental. [http://www.madrid.org/staticFiles/site\\_52811278/cit\\_13710/P\\_RCD.pdf](http://www.madrid.org/staticFiles/site_52811278/cit_13710/P_RCD.pdf)
- [3] SYMONDS, ARGUS, COWI Y PRC BOUWCENTRUM: "Construction and Demolition; Waste Management Practices, and Their Economic Impacts"; Report to DGXI, European Commission, Febrero 1999.
- [4] URCELAY, C. "Reciclado de escombros de demolición para la fabricación de cemento", Cemento-Hormigón, N°786. p. 149-155. 1997. <http://www.icce.es/icce/articulo29.htm>.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.1	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN</b>		

- [5] GEHO-CEB. "Demolición y reutilización de estructuras de hormigón", Recomendaciones y Manuales Técnicos (E-7), Editado por el Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. 1997.
- [6] RILEM (International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures). "Recycled aggregates and recycled aggregate Concrete", Recycling of Demolished Concrete and Masonry. RILEM Report 6, Edited by Hasen, T.C., Published by E&FN Spon, 2-6 Boundary Row, London SE 1 8HN, First edition, 1992.
- [7] MONOGRAFÍA ACHE "Utilización de árido reciclado para la fabricación de hormigón estructural". Comisión 2 Grupo de Trabajo 2/5 "Hormigón Reciclado". 2006.
- [8] M. SÁNCHEZ DE JUAN, P. ALAEJOS. MONOGRAFÍA CEDEX: "Estudio sobre las propiedades del árido reciclado: utilización en hormigón estructural". 2006.
- [9] KIBRIYA, T.; SPEARE, P.R.S.; "The use of crushed brick coarse aggregate in concrete", Concrete for Environment Enhancement and Protection. Published by E&FN Spon, 2-6 Boundary Row, London SE 1 8HN, p.495-503. 2004.
- [10] Bauchard, M., "Les matériaux de démolition en France. Le recyclage de la fraction inerte". Paris, 1992.
- [11] <http://ofrir.lcpc.fr>
- [12] Turner-Fairbanks Highway research Center and Federal Highway administration, "User Guidelines for Waste and By-product Materials in Pavement Construction, 2002.
- [13] VRIES, P. "Concrete re-cycled: crushed concrete as aggregate". 21st annual Convention of the Institute of Concrete Technology Coventry, April, 1993.
- [14] WAINWRIGHT, P.J.; TREVORROW, A; YU, Y.; WANG, Y. "Modifying the performance of concrete made with coarse and fine recycled concrete aggregates", RILEM (International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures). "Demolition and Reuse of Concrete and Masonry". Proceedings of the Third International RILEM Symposium, Edited by Lauritzen, E.K., Published by E&FN Spon, 2-6 Boundary Row, London SE 1 8HN, First edition, 1994. p. 319-330.
- [15] RAVINDRARAJAH, R.S.; TAM, C.T. "Properties of concrete made with crushed concrete as coarse aggregate", Magazine of Concrete Research, Vol. 37, nº 130, p. 29-38. March, 1985.
- [16] BARRA, M. "Estudio de la durabilidad del hormigón de árido reciclado en su aplicación como hormigón armado". Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña. 1996.
- [17] Instrucción de Hormigón Estructural EHE. Borrador 2007. <http://www.fomento.es/>
- [18] ALVAREZ, J.L.; URRUTIA, F.; LECUSAY, D.; FERNÁNDEZ, A. "Morteros de albañilería con escombros de demolición". Materiales de construcción Vol.47, N°246, p.43-48. España1997.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.1	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN</b>		

- [19] HAMASSAKI, L.T.; NETO, C.S.; FLORINDO, M.C. "Utilization of construction waste in rendering mortar". CONCRETE FOR ENVIRONMENT ENHANCEMENT AND PROTECTION. Concrete in the Service of Mankind. Vol 1. Proceedings of the International Conference held at the University of Dundee, Scotland, UK. June 1996, Edited by Dhir, R.K, Dyer, T.D, Published by E&FN Spon, 2-6 Boundary Row, London SE 1 8HN, First edition, 1996. p.485-494.
- [20] OCDE, "Stratégies de recyclage dans les travaux routiers", 1997.
- [21] PAKVOR, M.; MURAVLJOV, M.; KOVACEVIC, T. "Exploration of concrete and structural concrete elements made of reused masonry", RILEM (International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures). "Demolition and Reuse of Concrete and Masonry", Proceedings of the Third International RILEM Symposium, Edited by Lauritzen, E.K., Published by E&FN Spon, 2-6 Boundary Row, London SE 1 8HN, First edition. 1994. p. 391-404.
- [22] MANSUR, M.A.; WEE, T.H.; LEE, S.C. "Crushed Bricks as Coarse Aggregate for Concrete", CONCRETE FOR ENVIRONMENT ENHANCEMENT AND PROTECTION. Concrete in the Service of Mankind. Vol 1. Proceedings of the International Conference held at the University of Dundee, Scotland, UK. June 1996, Edited by Dhir, R.K, Dyer, T.D, Published by E&FN Spon, 2-6 Boundary Row, London SE 1 8HN, First edition. 1996. p. 505-514.
- [23] AKHTARUZZAMAN, A.A.; HASNAT, A. "Properties of Concrete Using Crushes Bricks as Aggregate", Concrete International. Febrero, 1983.
- [24] RILEM. "Specifications for concrete with recycled aggregates", Materials and Structures, N°27, p. 557-559, 1994.
- [25] ALAEJOS,P.; DOMINGO,A.,LÁZARO,C.;MONLEÓN,S.Y SÁNCHEZ,M. "Puente reciclado sobre el río Turia en Manises (Valencia)". III Congreso de Puentes y Estructuras de Edificación. Zaragoza. Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural (ACHE). 2005.
- [26] EUROPEAN THEMATIC NETWORK. "Use of recycled materials as aggregates in the construction industry", Recycling in construction. Combined Volume 2, Issue 3 & 4. March/September 2000. www.ETNRecy.net
- [27] MOREL, A.; GALLIAS, J.L.; BAUCHARD, M.; MANA, F.; ROUSSEAU, E. "Practical Guidelines for the Use of Recycled Aggregates in Concrete in France and Spain", RILEM (International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures). "Demolition and Reuse of Concrete and Masonry", Proceedings of the Third International RILEM Symposium, Edited by Lauritzen, E.K., Published by E&FN Spon, 2-6 Boundary Row, London SE 1 8HN, First edition. 1994. p. 71-81.
- [28] KASAI; Y: "Guidelines and the Present State of the Reuse of Demolished Concrete in Japan". Demolition and Reuse of Concrete and Masonry. Proceedings of the Third International RILEM Symposium, Edited by Lauritzen, E.K., Published by E&FN Spon, 2-6 Boundary Row, London SE 1 8HN, First Edition. pp. 93-104, 1994.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.1	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN</b>		

- [29] KAWANO, H.: "The State of Using By-Products in Concrete in Japan and Outline of JIS/TR on Recycled Concrete Using Recycled Aggregate". Public Works Research Institute. Proceedings of the 1st FIB Congress, 2002.
- [30] PSAWA, F.; NOGUCHI, T.: "New Technology for the Recycling of Concrete. Japanese experience". Concrete Technology for a Sustainable Development in the 21th Century. pp. 274-287, 2000.
- [31] VINCKE, J.; ROUSSEAU, E.: "Recycling of Construction and Demolition Waste in Belgium: Actual Situation and Future Evolution". Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, Proceedings of the Third International RILEM Symposium, Edited by Lauritzen, E.K., Published by E&FN Spon, 2-6 Boundary Row, London SE 1 8HN, First Edition, 1994. pp. 57-69.
- [32] CSIRO: "Construction and Demolition Waste". Building Innovation & Construction Technology, N°12, Abril 2000. [www.debe.csiro.au/inno-web/0400/conswaste.htm](http://www.debe.csiro.au/inno-web/0400/conswaste.htm).
- [33] SAGOE-CRENTSIL, K.; BROWN, T.: "Guide for Specification of Recycled Concrete Aggregates (RCA) for Concrete Production". CSIRO, Building, Construction And Engineering. Ecorecycle, Victoria. September 1998.
- [34] HONG KONG: "Specifications Facilitating the Use of Recycled Aggregates". Works Bureau Technical Circular 12/2002.
- [35] DIN 4226-1:2000: "Concrete Aggregate".
- [36] BSG "Use of industrial by-products and waste materials in building engineering". British Standard Guide 6543. 1985.
- [37] COLLINS, R.J.: "BRE Digest 433: Recycled Aggregates". Noviembre 1998.
- [38] "Quality Control: The production of Recycled Aggregates. BR 392". ISBN 186081 381 X
- [39] BS 8500-2:2002: "Concrete-Complementary British Standard to BS EN 206-1. Part 2: Specification for Constituent Materials and Concrete".
- [40] WRAP "Mix Design Specification for Low Strength Concretes Containing Recycled and Secondary Aggregates". 2002
- [41] DE OLIVEIRA, M. J. E.; DE ASSIS, C. S.; DE MATTOS, J.T.; "Recycled Aggregate Standardization in Brazil". Universidade Estadual Paulista, Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, Universidade de Taubaté. Conference on the Use of Recycled Materials in Buildings and Structures. Barcelona 2004.
- [42] Guide technique pour l'utilisation des matériaux régionaux d'Ile-de-France: les bétons et produits de démolition recyclés-LCPC, Paris. Diciembre 1996.
- [43] Danish Concrete Code. "Use of recycled demolition rubble". 1989.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.1	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN</b>		

- [44] Danish Concrete Association. "Recommendations for the use of recycled aggregates for concrete in passive environmental class". Publicación N°34, 1990.
- [45] CUR: "Report nr. 125: Crushed Concrete Rubble and Masonry Rubble as Aggregate for Concrete". (Dutch language, summary in English).
- [46] Austrian Quality Protection Association for Recycled Building Materials. "Guidelines for recycled building materials". 1992.
- [47] Guidelines for Recycled Construction Materials from Building Construction, Application Cement-bonded Substances. FALTA AÑO
- [48] Guidelines for Recycled Construction Materials from Building Construction, Application Unbound Substances. FALTA AÑO
- [49] BITSCH OLSEN E. "The Recycled house". RILEM (International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures). "Demolition and Reuse of Concrete and Masonry". Proceedings of the Third International RILEM Symposium, Edited by Lauritzen, E.K., Published by E&FN Spon, 2-6 Boundary Row, London SE 1 8HN, First edition, 1994. p. 521-527.
- [50] Información facilitada por UTE Planta de Navalcarnero (Madrid).
- [51] BEDEC. Banco de precios BEDEC PR/PCT. CONSTRUMÁTICA: Arquitectura, Ingeniería y Construcción. <http://www.construmatica.com/>
- [52] Información facilitada por TEC REC (Tecnología y Reciclado, S.L.).
- [53] ETXEBARRIA, M.: "Experimental Study on Microstructure and Structural Behaviour of Recycled Aggregate Concrete". Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña. 2004.
- [54] MUELLER, A.; WINKLER, A.: "Characteristics of Processed Concrete Rubble"; Use of Recycled Concrete Aggregate, Sustainable Construction; Ed. Dhir, Henderson y Limbachiya; p.p. 109-120, 1998.
- [55] WAHLSTRÖM, M; LAINE-YLIJOKI. J; MÄTTÄNEN, A; LUOTOJÄRVI, T; KIVEKÄS, L: "Environmental Quality Assurance System for Use of Crushed Mineral Demolition Wastes in Earth Constructions". Waste Material in Construction: Putting Theory into Practice. Edited by Goumans, Senden, and van der Sloot. 1997, pp. 725-734.

## **8.- ENTIDADES DE CONTACTO**

- ANEFHOP (Asociación Nacional Española de Fabricantes de Hormigón preparado)  
c/ Antonio González Porras nº 35 - 2º  
Tel. 91 4690420

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.1	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN</b>		

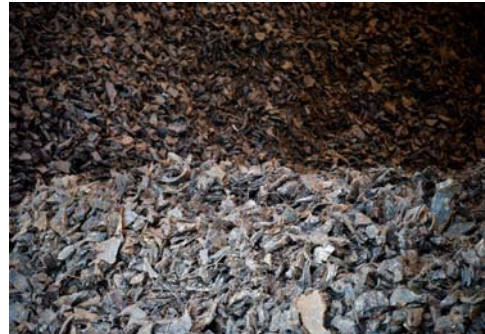
[www.hormigón.org](http://www.hormigón.org).

- EDA (European Demolition Association)  
P.O. Box 90606. The Hague.  
Tel. 31 70 3286801.
  
- FEDERACIÓN DE ÁRIDOS (FdA)  
Travesía de Téllez nº 4 entreplanta izquierda  
280007 Madrid.  
Tel. 91 5021417  
Fax 91 4339155
  
- GERD: (Gremio de Entidades del Reciclaje de Residuos)  
c/ Filadors nº 35-41 - 6º  
08206 Sabadell.
  
- CER: (Club Español de los Residuos)  
c/ Rioja nº 12  
28042 Madrid.  
Tel. 917 472 921  
Fax 913 295 493  
[www.clubresiduos.org](http://www.clubresiduos.org)

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.2	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>NEUMÁTICOS FUERA DE USO (NFU)</b>		
Nombre en inglés: Scrap tyres		



NFU enteros



NFU troceados



NFU en estructuras de contención



NFU construcción de taludes

## 1.- ORIGEN

Los neumáticos usados (NFU) provienen fundamentalmente de la industria automovilística. La distribución de los poseedores<sup>(23)</sup> es la siguiente: profesionales de la carreteras (65%); garajes y estaciones de servicio (19%) y distribuidores del producto,(16%).

Hasta la entrada en vigor del Real Decreto 1619/2005 en el que se establece la responsabilidad de la gestión del neumático cuando se encuentra fuera de uso (NFU), una gran parte de los neumáticos eran recogidos por los servicios municipales o comarcales, o transportados directamente por los talleres a los vertederos públicos, locales o comarcales; a veces los talleres los depositaban en vertederos privados de inertes, en algunos casos incontrolados o ilegales. La publicación del citado R.D. 1619/2005 ha marcado un antes y un después en el tratamiento del residuo.

Para dar cumplimiento a la responsabilidad de los productores descrita en el citado Real Decreto, los principales fabricantes de neumáticos han creado (mayo de 2005) un sistema integrado (SIGNUS) que asegura la gestión y adecuado tratamiento de los NFU generados en España, así como la promoción de la reutilización y valorización de los mismos. Para ello gestionan la recogida gratuita de NFU en todos los puntos de generación, su clasificación posterior con el objeto de



<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.2	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>NEUMÁTICOS FUERA DE USO (NFU)</b>		

asegurar el máximo porcentaje de recuperación, su transporte a los centros de almacenamiento y preparación, donde se preparan en función de su destino final. Desde estas plantas se realiza el transporte a las empresas dedicadas a su valorización, quienes certificarán la aplicación material (la utilización de dichos neumáticos como materia prima para la fabricación de otros productos) o energética (la utilización de los NFU como fuente energética alternativa), permitiendo cerrar de esta forma el círculo del reciclaje.

## **2.- VOLUMEN Y DISTRIBUCIÓN <sup>(1)</sup>**

Las estimaciones (2005) se hacen a partir del reparto por parque móvil de vehículos en España (Tabla 1), donde la distribución del parque móvil por Comunidades Autónomas es la siguiente (Tabla 2). En la Unión Europea se estima una generación anual de unos 2,5 Mt NFU y 1 G NFU acumulado<sup>(25)</sup>.

<b>NFU en España</b>	<b>Kt</b>	<b>%</b>
Mercado total de reposición	208	68,6
NFU procedentes de vehículos fuera de uso	37	12,3
NU Recauchutado	45	14,8
NU Importado	13	4,3
Total generado	303	100

**Tabla 1:** Volumen de NFU

<b>COMUNIDADES</b>	<b>CIFRAS PARQUE MÓVIL</b>
Andalucía	16,55
Aragón	2,84
Asturias	2,17
C La Mancha	4,64
C. – León	5,83
C.Valenciana	11,57
Cantabria	1,29
Cataluña	15,82
Extremadura	2,22
Galicia	6,19
La Rioja	0,68
Madrid	13,40
Murcia	3,26
Navarra	1,53
P. Vasco	4,49
Baleares	2,90
Canarias	5,49
Ceuta	0,15
Melilla	0,13

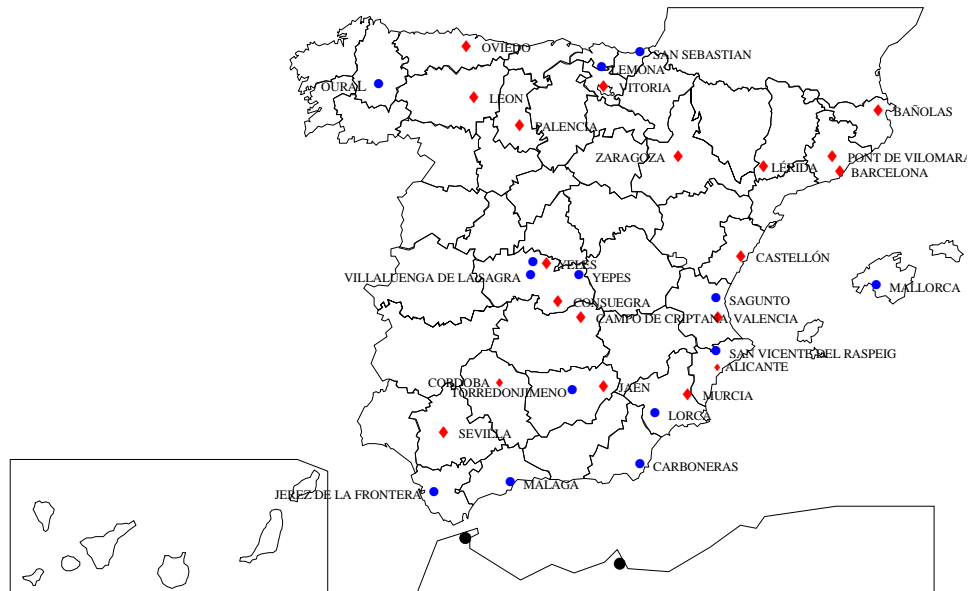
**Tabla 2:** Parque móvil por Comunidades Autónomas

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.2	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>NEUMÁTICOS FUERA DE USO (NFU)</b>		

En el siguiente mapa se sitúan las instalaciones dedicadas al reciclaje y a la valorización energética de NFU (Fuente: II Plan Nacional de Neumáticos Fuera de Uso 2008-2015).

**LEYENDA**

- ◆ Plantas recicladoras de neumáticos
- Plantas valorizadoras (valorización energética)



**3.- VALORIZACIÓN**

En el siguiente cuadro figuran datos sobre los porcentajes por destinos de los NFU en España y en la Unión Europea, según estudios realizados por SIGNUS Y ETRA.

DESTINO	ESPAÑA (2005)	UE (2005)
	%	%
Recauchutado	14,85	4,9
Reciclaje	13,5	44
Valorización energética	16,5	35
Vertido	49,8	
Exportación	4,95	
TOTAL	100,00	100,00

**Tabla 3:** Destino de los NFU

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.2	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>NEUMÁTICOS FUERA DE USO (NFU)</b>		

### 3.1.- PROPIEDADES<sup>(2)</sup>

La composición de los neumáticos puede variar de un continente a otro. Para el caso de Europa, una composición tipo de los neumáticos puede ser la siguiente:

MATERIAL	TURISMOS	CAMIONES
Caucho/elastómeros	48%	45%
Negro de carbono	22%	22%
Metal	15%	25%
Textil	5%	-
Óxido de cinc	1%	2%
Azufre	1%	1%
Aditivos	8%	5%

**Tabla 4:** Composición de los neumáticos

Como puede apreciarse el componente que se encuentra en mayor proporción son los cauchos naturales y sintéticos; la relación entre ambos varía en función del uso que se le vaya a dar al neumático.

El negro de carbono se incorpora en proporciones variables en la fabricación de las distintas partes de los neumáticos, consiguiéndose variaciones en la rigidez, y en la resistencia a tracción y la abrasión.

Los componentes metálicos del neumático proporcionan a su carcasa rigidez, resistencia y flexibilidad; constituyen un cordaje ligero de acero de alta resistencia. Los materiales textiles habitualmente utilizados en las carcasas de los neumáticos son el nylon, rayon y el poliéster. Durante la mezcla de materias primas para la fabricación del neumático se le añade al caucho y al negro de carbono una serie de aditivos como cargas, plastificantes, estabilizantes, agentes colorantes, acelerantes y retardantes. La misión de estos aditivos es modificar la dureza y resistencia del caucho e incrementar su resistencia a la abrasión, aceites, oxígeno, disolventes químicos y al calor.

El azufre se aporta durante el proceso de vulcanización, combinándose a temperaturas entre 120° y 160° con el caucho, lo que hace a este más resistente y elástico, contribuyendo a mejorar la durabilidad del neumático.

Entre las características propias de los neumáticos están la resistencia a la acción de los mohos, al calor, a la humedad, a la luz solar y los rayos ultravioletas, a algunos aceites y a muchos disolventes. Asimismo, no son biodegradables, ni tóxicos y retardan el desarrollo bacteriológico.

Desde el punto de vista térmico, los neumáticos, tanto de turismo como de camión, tienen prácticamente el mismo poder calorífico que el carbón (6.800 kcal/kg a 7.800 kcal/kg), y una tonelada de neumáticos equivale aproximadamente a 0,7 toneladas de fuel oil.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.2	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>NEUMÁTICOS FUERA DE USO (NFU)</b>		

### Propiedades físicas

Entre el 50 y el 60% de un neumático está compuesto de caucho natural o sintético. El primero presenta menor dificultad para su incorporación al betún que el segundo. La densidad de un neumático entero es de unos 0,15 t/m<sup>3</sup>.

### Propiedades químicas

Los monómeros más comunes utilizados en los procesos productivos son el estireno-butadieno, polisopreno y polibutadieno. Los NUF también contiene óxido de zinc, azufre y negro de carbono (20-30% combustión incompleta de hidrocarburos) y otros compuestos metálicos. El negro de carbono presenta un efecto antioxidante y antiozono, que en la valoración de los NFU como polvo de neumáticos en ligantes bituminosos, reduce el envejecimiento. La presencia de metales pesados es inferior al 0,1% en peso excepto para el zinc.

### Propiedades mecánicas

Debido a la forma tórica y a su elasticidad los NUF son difícilmente compactables.

## 3.2.- PROCESAMIENTO<sup>(2)</sup> Y/O TRANSFORMACIÓN

La valorización de los neumáticos abarca tres grandes tipos de tratamientos: el recauchutado, el reciclaje o su valorización energética.

En el reciclado de los neumáticos se pueden utilizar estos sin procesarlos o bien reducirlos de tamaño. Existen distintos procesos de reducción de tamaño de los neumáticos, desde los totalmente mecánicos a aquellos otros que combinan los tratamientos mecánicos con los químicos o térmicos. Aunque hasta la fecha sólo ha demostrado una cierta viabilidad económica el reciclado mecánico.

Los procesos exclusivamente mecánicos de reducción de tamaño de los neumáticos se realizan a la temperatura ambiente. Los más elementales emplean máquinas que cortan los neumáticos en mitades, cuartos, etc, o separan la banda de rodadura de las paredes de la carcasa.

Entre los procesos mecánicos, muchos comienzan triturando los neumáticos enteros, o bien cortándolos hasta tamaños comprendidos entre 25 y 300 mm. En algunos sistemas, previamente al troceado se eliminan los cables metálicos de los talones que los ajustan a las llantas; en otros, los elementos metálicos son separados magnéticamente tras el troceado. Los materiales textiles del neumático se retiran mediante equipos de aspiración.

El sistema más completo de reducción mecánica de tamaño es el granulado. En una primera fase se trocean los neumáticos hasta tamaños entre 50 y 300 mm. En una segunda fase, además de reducir el material a tamaños entre 5 y 25 mm, se separan magnéticamente los elementos metálicos. Posteriormente el material puede someterse a otros procesos de granulado o molido hasta reducirlo al tamaño deseado, clasificándose finalmente por tamaños (0-0,5 mm, 0,5-2mm, 2-7 mm, 7-15 mm) en función de la aplicación a la que se destina. Durante la fase final se retira el material textil mediante equipos de aspiración.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.2	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>NEUMÁTICOS FUERA DE USO (NFU)</b>		

Entre los procesos de reducción de tamaño que combinan los tratamientos mecánicos con los químicos o térmicos, destacan los criogénicos, En estos, tras una reducción mecánica de tamaño, el material troceado se lleva a una cámara de enfriamiento, donde se utiliza nitrógeno líquido para enfriarlo entre  $-80^{\circ}$  y  $-120^{\circ}$ , por debajo de la temperatura de transición vítrea. El material quebradizo procedente de la cámara es triturado mediante molinos de martillos y se separan los elementos metálicos y las fibras textiles. El material resultante es muy limpio, y puede alcanzar los 0,15 mm. Los costes de procesado con esta tecnología son lo suficientemente elevados como para que no se extienda demasiado.

### **Obtención del polvo de neumático**

Los tamaños inferiores al mm se conocen como polvo de neumático y son los que presentan mayor interés práctico. Se obtiene por dos procedimientos: el criogénico y el mecánico o ambiental. En cualquiera de ellos es preciso separar el caucho de los otros integrantes. Con el sistema criogénico se obtienen texturas muy lisas de características vítreas y corte angular, con buena superficie específica, de modo que estas texturas no son las más adecuadas para su mezcla con el betún.

Sin embargo, la obtención del polvo por tratamiento mecánico o ambiental mediante la trituración de la banda de rodadura con cuchillas, permite obtener una textura más rugosa, con una superficie específica mayor que el sistema criogénico, ambas cosas mejoran notablemente la compatibilidad y la interacción entre el betún y el caucho. No obstante, la trituración mecánica produce una mayor heterogeneidad dimensional, entre 2 y 7 mm, lo que perjudica la estabilidad del sistema betún-caucho. Con el fin de mejorar la compatibilidad del polvo con el betún se han introducido cambios tecnológicos en la trituración.

En resumen, el procedimiento seguido para la obtención del polvo del neumático tiene importancia en la interacción con el betún por lo que el control de variables de fabricación como la temperatura, el tiempo y la energía de cizalla inciden en la posterior obtención del betún-caucho.

### **3.3.- PROPIEDADES DEL MATERIAL PROCESADO<sup>(3)</sup>**

#### **Propiedades físicas**

El material procedente del troceado de neumáticos es plano, de forma irregular y puede, o no, contener trozos metálicos procedentes de las bandas de acero de la carcasa. El tamaño de este material puede variar entre 300 y 25 mm. El tamaño medio depende de la criba que se ponga. La densidad obtenida con este material sin compactar es variable en función del tamaño de los trozos, habiéndose obtenido valores entre 390 y 535 kg/m<sup>3</sup>. La densidad media para rellenos con este material compactado varía entre 630 y 840 kg/m<sup>3</sup>.

Para el material más grueso procedente del granulado, con tamaño entre 76 y 13 mm, se han obtenido densidades sin compactar entre 320 y 490 kg/m<sup>3</sup>, y densidades entre 570 y 730 kg/m<sup>3</sup> para el material compactado.

El polvo de neumático utilizado habitualmente en las mezclas asfálticas en caliente tiene el 100% de sus partículas de tamaño inferior a 2 mm. La mayor parte de las partículas del material utilizado en el "proceso húmedo" tiene tamaños comprendidos entre 0-0,830 mm. El peso específico del

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.2	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>NEUMÁTICOS FUERA DE USO (NFU)</b>		

polvo de caucho es aproximadamente de 1,15 y el producto debe estar libre de material textil, metálico y otros contaminantes.

### Propiedades químicas

Las principales componentes del material procesado son: caucho –natural y sintético –, negro de carbono, azufre, óxido de zinc y aditivos. En condiciones ambientales normales los fragmentos de neumático no son reactivos.

El polvo de neumático de menor tamaño requiere menos tiempo de reacción o “digestión” y también menos temperatura de mezcla. Las partículas más gruesas son más baratas de obtener pero requieren mayor tiempo y temperatura de digestión.

### Propiedades mecánicas

A pesar de que la resistencia al corte de los trozos de neumáticos depende del tamaño y forma de las partículas, se han obtenido<sup>(4)</sup> valores del ángulo de fricción interna comprendidos entre 19° y 26°, y valores de cohesión entre 4,3 kPa y 11,5 kPa. Los ensayos de compresibilidad han dado como resultado módulos de elasticidad entre 770 y 1200 kPa. La permeabilidad depende del índice de poros pero es comparable a la de una grava limpia (1,5-15 cm/s).

### Otras propiedades

Los neumáticos tienen un poder calorífico elevado, comprendido entre 28- 35MJ/kg. Una tonelada de neumáticos equivale aproximadamente a 0,7 t de fuel-oil.

## 3.4. APLICACIONES

### 3.4.1. Valorización energética

La valorización energética del NFU como combustible se ha desarrollado fundamentalmente en Japón y en EE.UU. Se basa en el gran poder calorífico del neumático (35 MJ/kg) similar al del carbón. En Europa también se están utilizando como combustible en plantas industriales (fábricas de cemento, ladrillo, papel, acerías, etc) y en centrales de producción de vapor y energía eléctrica. En Austria, por ejemplo, se utiliza el 60% de los neumáticos como combustible en fábricas de cemento, mientras que en Alemania, Francia y Reino Unido esta cifra alcanza el 38%, 8% y 6%, respectivamente.

En España algunas fábricas de cemento utilizan los neumáticos usados como combustible, aunque ocupa uno de los últimos puestos a nivel europeo en cuanto a valorización energética de estos residuos, que supone un 16,5% del total frente al 44% (2005) de media en la UE.

Las distintas experiencias llevadas a cabo han demostrado que es absolutamente factible la valorización en hornos de cemento hasta de un 20% del combustible utilizado, con incorporación total de los metales procedentes de la armadura del neumático, sin variación en los componentes de los gases emitidos, exceptuando la reducción de los óxidos de nitrógeno, y del SO<sub>2</sub>, por el menor contenido en azufre que el combustible tradicional.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.2	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>NEUMÁTICOS FUERA DE USO (NFU)</b>		

En cuanto a las emisiones de CO<sub>2</sub> se aprecia una disminución, ya que el contenido de carbono en el neumático es menor al utilizado en otro tipo de combustibles fósiles. La Directiva 87/2003 EC establece que el CO<sub>2</sub> proveniente de la combustión de fuentes de energía natural (biomasa) no computa a efectos de emisiones. Esto supone una posible disminución de emisiones de CO<sub>2</sub> en la combustión del neumático debido al caucho natural.

El clinker obtenido utilizando neumático troceado en un porcentaje de sustitución del 20% es similar a los obtenidos utilizando como combustible solamente coque.

Para el aprovechamiento energético, el neumático se puede presentar de las siguientes formas <sup>(23)</sup>,

- *Neumáticos en polvo*: Su utilización como combustible secundario se asemeja al fuel-oil, pero su coste es mayor que el propio combustible.
- *Neumático troceado*: El coste de implantación se reduce casi a la mitad en relación con los neumáticos enteros. El tamaño adecuado para permitir el diseño de una instalación automática oscila entre 50 x 50 – 300 x 400 mm.
- *Neumático entero*: El suministro de neumáticos se ve favorecido, pero la inversión de la instalación es el doble que la instalación de neumático troceado.

En la mayor parte de los hornos europeos que utilizan neumáticos, los emplean troceados con un tamaño aproximado de 100 mm o inferior.

Existen otros tipos de valorización energética como son los procesos de pirólisis, termólisis y gasificación. Estos procesos en la actualidad no han demostrado una viabilidad económica.

### 3.4.2.- Obras de tierra y terraplenes

Se han utilizado neumáticos troceados y granulados como **material ligero** o en **rellenos** y en la construcción de **terraplenes**. Esta aplicación presenta algunas ventajas como son la utilización de grandes cantidades de residuo, y se mejora la permeabilidad y la resistencia a la penetración de la helada. Aunque el material es resistente a las radiaciones ultravioletas y no biodegradable, su utilización puede tener alguna influencia en el medio ambiente, especialmente cuando se coloca bajo la capa freática, por lo que hay que hacer los estudios oportunos<sup>(3)(4)</sup>.

También existen otras aplicaciones como relleno de trasdós de muros, ya que debido a su alta deformabilidad son capaces de absorber el esfuerzo de compactación del relleno sin generar grandes empujes sobre el muro (unos 2/3 de los empujes que se consideran habitualmente). Su permeabilidad elevada hace que, además, actúen como drenes. Esto permite reducir de forma importante el coste de las estructuras de contención.

También se se pueden utilizar enteros o troceados como relleno de gaviones. En el caso de utilizarse los NFU enteros, éstos son comprimidos al meterlos en los gaviones<sup>(23)</sup>.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.2	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>NEUMÁTICOS FUERA DE USO (NFU)</b>		

### 3.4.3.- Carreteras

Las aplicaciones más extendidas de los NFU en carreteras son, en forma de granulados, para la fabricación de betunes-caucho, directamente como áridos, o filler para las mezclas bituminosas<sup>(3)(4)</sup> como una modalidad más de betún modificado. También se utilizan en elementos de seguridad vial y pantallas antirruído.

La fabricación de **betún-caucho** se suele denominar “proceso húmedo” en la terminología anglosajona. Fue desarrollado en los años 60, en Arizona, por el ingeniero americano Charles McDonald. En este proceso se mezcla el caucho granulado – tamaño de partículas entre 0-0,850 mm– con el betún, a una temperatura entre 150°C y 200 °C, durante un tiempo de 1 a 2 horas, de forma que se realice la unión física y química de ambos componentes. Al proceso se le suelen añadir diluyentes, aceites aromáticos y polímeros. La proporción de caucho en la mezcla suele variar entre el 5% y el 26% del peso de betún, para producción de betunes de alta viscosidad, dependiendo de la aplicación que se vaya a dar al ligante. El betún-caucho tiene una mayor viscosidad y una gran recuperación elástica y adhesividad. Las principales aplicaciones de este ligante son en:

- Membranas antifisuras, bien superficiales (SAM) o entre capas (SAMI).
- Membranas impermeabilizantes (en tableros de puentes).
- Masillas de sellado.
- Materiales para juntas de dilatación.
- Ligantes para mezclas en capas de rodadura, fundamentalmente en capas drenantes y capas delgadas.

La **incorporación** directa del granulado de caucho, **como parte del árido**, a la planta de mezclado se conoce como “proceso seco” y fue desarrollado por una compañía sueca en los años 60. El árido natural se dosifica con granulometría discontinua para acomodar las partículas de caucho, que suelen tener tamaños comprendidos entre 6,4 mm y 0,85 mm. Generalmente se utiliza entre un 3% y un 5% de granulado de caucho sobre el peso de mezcla. Se obtienen mezclas muy flexibles, adecuadas únicamente para capas de rodadura y cuya principal aplicación, hasta ahora, ha sido en zonas de formación de hielo, ya que su gran flexibilidad permite el despegue y rotura de la capa de hielo por la acción del tráfico.

Como ventajas técnicas se pueden resaltar:

- Menor susceptibilidad a la temperatura que las mezclas convencionales. (Aumenta su elasticidad y resistencia a temperaturas elevadas).
- Mayor resistencia al agrietamiento, tanto por fatiga como por reflexión.
- Mayor resistencia al envejecimiento y a la oxidación que las mezclas convencionales
- Aumenta la viscosidad del ligante, lo que proporciona películas más gruesas de betún

Entre las ventajas medioambientales que presentan se pueden resaltar:

- Reducción del nivel sonoro por rodadura
- Se cumple el principio de jerarquía de gestión de los residuos



<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.2	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>NEUMÁTICOS FUERA DE USO (NFU)</b>		

- Posibles ahorros materiales (disminución espesores de capa)

Desde el punto de vista de la seguridad vial:

- Mejora la adherencia de los vehículos en el asfalto
- Prolongación del tiempo de contraste de las marcas viales

Desde el punto de vista económico:

- Prolongación de la vida de servicio
- Disminución del coste de mantenimiento

#### 3.4.4.- Edificación y obra pública <sup>(6)</sup> a <sup>(11)</sup>

Hasta ahora sólo existen estudios a nivel de laboratorio sobre el empleo de neumáticos troceados como árido para hormigón. Éstos han demostrado que su incorporación produce una mayor resiliencia, durabilidad y elasticidad del hormigón, por lo que su uso podría ser beneficioso en construcciones que puedan estar sometidas a impactos o vibraciones.

Según los estudios realizados, la incorporación de neumáticos troceados en el hormigón puede producir una pérdida de hasta el 85% en la resistencia a compresión del hormigón cuando se sustituye el árido grueso, y hasta del 65% cuando es el árido fino el que se sustituye. La resistencia a tracción puede disminuir hasta un 50% en ambos casos<sup>(6)</sup>.

Al sustituir el árido grueso, el módulo de elasticidad se reduce hasta aproximadamente el 70% del hormigón original, y hasta el 50% cuando se sustituye el árido fino. Esta reducción del módulo de elasticidad indica una mayor flexibilidad.

Debido a la gran pérdida de resistencia que se produce, desde un punto de vista práctico no convendría sustituir más de un 20% del total de los áridos por neumáticos troceados<sup>(7)</sup>. Con este porcentaje, y para un hormigón de referencia de 34 N/mm<sup>2</sup> de resistencia a compresión se pueden obtener una resistencia de hasta 25 N/mm<sup>2</sup>.

Es posible aumentar la resistencia del hormigón mejorando la adhesión entre el caucho y la matriz, que se puede conseguir bañando las partículas con pasta de cemento<sup>(8)</sup>. Con este tratamiento se puede incrementar la resistencia a compresión del hormigón hasta en un 30% aunque la resistencia a tracción no presenta mejoras significantes. Así, se pueden obtener resistencias hasta de 29 N/mm<sup>2</sup>.

Otra característica de este hormigón es su baja densidad, que le hace apropiado para aplicaciones en las que se requiera peso reducido, como elementos para interiores en edificación.

También, presenta una rotura plástica dúctil, lo que indica que puede absorber una gran cantidad de energía plástica y resistir grandes deformaciones bajo compresión, por lo que lo hace favorable para aplicaciones en campos de vibración, como por ejemplo en bases aislantes para estructuras.

Para prevenir el fallo de estructuras debida a movimientos sísmicos, se están desarrollando técnicas sobre bases aislantes en edificios. Lo que se persigue con estos aislamientos es

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.2	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>NEUMÁTICOS FUERA DE USO (NFU)</b>		

controlar los movimientos que se transmiten del terreno a la estructura, para ello la excelente flexibilidad y capacidad de absorción de energía de este tipo de hormigón, lo puede hacer muy adecuado. Diversos ensayos realizados con este material han obtenido buenos resultados, aunque son necesarias futuras investigaciones antes de ser empleado en la práctica. La amortiguación obtenida en una estructura con base aislante de este tipo de hormigón fue mucho mayor que la obtenida en una estructura de hormigón sin base aislante.

### 3.4.5. Otras aplicaciones

- Relleno de balsas de infiltración de aguas pluviales tanto neumático entero como triturado (producto patentado en Francia denominado Draingon). Dicha aplicación ya se ha desarrollado en Francia, debido a las grandes ventajas que presenta como son la gran capacidad de drenaje, gran capacidad de almacenamiento de agua, inapelmazabilidad y su resistencia a agentes químicos y a los microorganismos.
- Vertederos: en los vertederos es necesario la existencia de capas drenantes para lixiviados y biogás, que no sean reactivos y con una capacidad de resistencia estructural. Los NFU cumplen las propiedades: drenantes, no compactables y no reactivos.
- Césped artificial: la utilización de granulado de NFU (1-2,5 mm) en campos de fútbol de césped artificial es una de las aplicaciones más desarrolladas en la actualidad. La utilización de granulado de NFU en campos de golf sería una aplicación que resolvería muchos problemas de lugares en los que no se puede instalar este tipo de complejos debido a la escasez de agua. Como ventajas de esta aplicación se pueden resaltar: que se puede colocar sobre toda clase de terrenos, ahorro en los costes de mantenimiento y de consumo de agua, resistencia climática, acabado limpio y cómodo para los usuarios y prevención de lesiones.
- Construcción de taludes: El neumático entero se puede utilizar en sustitución de piezas de hormigón o grandes piedras para evitar la erosión provocada por el agua

### 3.5. OBRAS REALIZADAS

Existe una amplia experiencia internacional en la utilización de neumáticos fuera de uso reciclados en la construcción de carreteras, fundamentalmente en los Estados Unidos<sup>(2) (3) (4)</sup>.

En España, se empezó en el año 1974, en el Centro de Investigación E.S.M. trabajando en formulas de incorporación de caucho al betún que se aplicaron con éxito en calles de la ciudad de Barcelona<sup>(12)</sup>.

Posteriormente, se ejecutó un tramo de ensayo en una carretera secundaria con tráfico ligero en el término municipal de Vacarisses, gracias a la colaboración entre distintas Comunidades Autónomas, organismos relacionados con el medio ambiente y empresas del sector, en colaboración con centros de investigación y Universidades.

En 1997 se realizó un nuevo tramo de ensayo de 850 m en la carretera B-140 entre Sabadell y Mollet del Vallés, con un tráfico T2, colocando una capa bituminosa de 5 cm de espesor de mezcla S-12, dosificada con un 2% de polvo de neumáticos y 6% de betún, en la mitad del tramo, y una

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.2	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>NEUMÁTICOS FUERA DE USO (NFU)</b>		

mezcla S12 convencional en la otra mitad<sup>(20)(21)</sup>. En Andalucía se han utilizado en varias obras microaglomerados de granulometría discontinua con betún modificado con polvo de caucho procedente del reciclado de neumáticos fuera de uso<sup>(13)(19)</sup>.

La utilización de trozos de neumáticos como áridos para hormigones es todavía con carácter experimental y no se tiene constancia de obras en las que se haya empleado este material.

En las tablas siguientes, se presentan numerosos ejemplos de tramos de carreteras en los que se han empleado NFU en mezclas de betunes.

Tramo	Año	Longitud (km)	Tráfico	Espesor de capa y tipo de mezcla (cm)	Caucho en el betún (%)	Betún (%)
C-433: Sevilla a Cazalla de la Sierra. SE-30	1996	0,300	T2	3	-	5,7
	1996	0,300	T1	3	-	5,7
M-300: Alcalá-Arganda del Rey m-221 Y m-222: Valdaracete a Brea del Tajo	1996	0,330	T2	5	-	4,9
	2002	12	T3	5(S-20)+5(D-20)	10	5,6
Travesía de Badarán (La Rioja)	2004	0,7	-	-	-	-
Travesía de Argamasilla de Calatrava (Ciudad Real)	2004	0,5	-	-	-	-
A-6: Tordesilla	2005	0,8	T0	6 (S-12)	9	5,0

**Tabla 5:** Tramos de “vía húmeda” con betún fabricado en central de betunes

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.2	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>NEUMÁTICOS FUERA DE USO (NFU)</b>		

Tramo	Año	Longitud (km)	Tráfico	Espesor de capa y tipo de mezcla (cm)	Caucho en el betún (%)	Betún (%)
A-372 y A-372: Ubrique-El Bosque	2002	16	T3	5(S-20)+2,5(F-10)	13%-0,4 mm	5,5
M-221 y M-222: Valdaracete	2002	12+	T3	5(S-20)+5(D-20)	13	5,6
AP-7	2002	1,8	T1	4 y 6(abierta-12,5)	20	9
	2004	4,2		6(abierta-12,5)	20	9
	2005	11,4		6(abierta-12,5)	20	9
		11,0		5(abierta-12,5)	20	9
		2,1		3(abierta-12,5)	20	9
VA-20:Ronda Este de Valladolid	2004	0,300	T0	6(S-20)	13	5,5
ZA-611: Toro a Venablo	2004	4	T2	4(S-20)	13	5,5
VA-404: Medina del Campo a Matapozuelos	2004	0,820	T3	6(S-12)	13	5,5
VA-113: Valladolid a Santovenia de Pisuerga	2004	0,150	T2	5	13	5,7
S-444: Revilla de Camargo -Puerte Arce	2004	7,7	T2	3+6(Abierta-12,5)	20	9
Urbano: Pº Canalejas (Salamanca)	2004	7	-	4(Abierta-12,5)	20	9
Urbano. Calle Soto. (Valladolid)	2004	1,2	-	4(Abierta-12,5)	21	9
A-4: Tembleque	2004	1,2	T0	5(Abierta-12,5)	20	9
RondaEste de Valladolid	2004	0,3	-	6(S-20)	13	5,15
ZA-611: Toro-Venialbo	2004	4		4+4(S-20)	13	5,2
				4(S-20)	13	5,2
LE-611: Carrizo de la Ribera a Hospital de Órbigo	2004	4	T2	6(S-12)	13	5,6
		0,3		6(S-12)	20	6,6
Urbano: Paseo Juan Carlos I de Valladolid	2004	0,4	-	3(M-10)	13	5,6
N-610: Becilla de Valderaduey-Benavente	2005	1,5	T1	5(S-12)	13	5,5
A-6: Tordesillas	2005	0,8	T0	6(PA-12)	9	5,0
LE-232 Sahagún-Almanza	2005	1	T3	4	13	5,5

**Tabla 6.** Tramos de "vía húmeda" fabricando el ligante en el lugar de empleo

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.2	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>NEUMÁTICOS FUERA DE USO (NFU)</b>		

Tramo	Año	Longitud (km)	Tráfico	Espesor de capa y tipo de mezcla (cm)	Caucho en el betún (%)	Betún (%)
C-433: Sevilla a Cazalla de la Sierra	1996	0,3	T2	3(F-10)	1	5,7
M-300: Alcalá-Arganda del Rey	1996	0,33	T2	3(F-10) 5(D-20)	1	6,1 5,2
Ayuntamiento de Alicante, Altea, Elche, Murcia, Orihuela y Torrevieja (varios tramos)	1998 a 2005	65	-	3(M-10)	0,5	5,2
Autovía del Noroeste	2003 a 2005	11	-	3(F-10)	0,5	5,2
Generalitat Valencia	1996 a 2004	18,5 4,5	- -	3(M-10) 5(S-12)	0,5	5,2
Diputación de Alicante	1999 a 2002	15	-	3(M-10)		
N-344: Travesía de Caudete	1999	1,1	-	3 (M-10)		
N-332: Favara	2004	2	-	3(M-10)	0,5	5,2
Carretera de Castraz	2004	1,5	T2	5(S-12)	1	5,34

**Tabla 7.** Tramos de “vía seca”

#### **4.- CONSIDERACIONES MEDIOAMBIENTALES**

##### **Generalidades**

La Ley 10/1998, de 21 de abril, de Residuos, establece el régimen jurídico básico aplicable a los residuos en España y faculta al Ministerio de Medio Ambiente para publicar el Catálogo Europeo de Residuos (CER) y la lista de Residuos Peligrosos, aprobados, respectivamente, por las Decisiones comunitarias 94/3/CE, de la Comisión, de 20 de diciembre, y 99/404/CE, del Consejo, de 22 de diciembre.

Estas decisiones han sido derogadas por la Decisión 2000/532/CE, de la Comisión, de 3 de mayo (posteriormente modificada por las decisiones de la Comisión, 2001/118/CE, de 16 de enero y 2001/119, de 22 de enero y por la Decisión del Consejo, 2001/573, de 23 de julio) mediante la que se aprueba la Lista Europea de Residuos, que, además de otras modificaciones, refunde las dos listas anteriormente mencionadas en una sola.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.2	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>NEUMÁTICOS FUERA DE USO (NFU)</b>		

Los neumáticos fuera de uso se incluyen como residuos en la Lista Europea de Residuos con el código 16 01 03, y están caracterizados como residuos no peligrosos.

La Directiva 99/31/CE del Consejo de la Unión Europea, sobre vertido de residuos, hace algunas menciones explícitas de los neumáticos fuera de uso, estableciendo la prohibición de su vertido enteros desde el 16 de julio de 2003, y la prohibición del vertido total desde el 16 de julio de 2006. Se excluye en ambos casos los NFU mayores de 1400mm.

La valorización energética de los neumáticos produce contaminación atmosférica, aunque con las instalaciones necesarias las emisiones pueden ser menos contaminantes que las que se producen al utilizar combustible tradicional. Según el principio de priorización, recogido en el art. 1.1 de la Ley 10/98, de Residuos, antes de proceder a la valorización energética del residuo se debe buscar una vía para su reutilización o reciclaje.

En el documento "Tyre Recycling after 2000: Status and Options"(2) se hace una amplia referencia a los estudios que se han realizado a nivel mundial, sobre el riesgo potencial que para el medio ambiente y la salud humana puede suponer el reciclado de los neumáticos fuera de uso. En ningún caso los neumáticos figuran como residuos peligrosos.

La mayor parte de la información existente sobre la utilización de los neumáticos fuera de uso en la ingeniería civil, procede de los Estados Unidos y Canadá. Aunque las conclusiones de los estudios llevados a cabo son generalmente válidas para Europa, no hay que olvidar que los neumáticos europeos tienen una mayor cantidad de acero y menor cantidad de óxido de cinc y azufre que los americanos.

Investigaciones realizadas en los Estados Unidos, desde 1989, sobre la seguridad a largo plazo, desde el punto de vista medioambiental, de la utilización de materiales procedentes de neumáticos reciclados, han puesto de manifiesto que la mayoría de los componentes detectados en las muestras analizadas lo están en porcentajes sensiblemente inferiores a los exigidos en las normas, incluidas las de aguas potables. Además, la mayoría de las sustancias que podrían potencialmente lixiviarse de los neumáticos -incluidos aluminio, bario, cromo, hierro, manganeso y cinc- se encuentran de forma natural presentes en bajos porcentajes en el agua freática.

En relación con su influencia en la salud humana, se han analizado distintas situaciones y factores, como:

- Incendios.
- Polvo emitido en las plantas de granulado.
- Inhalaciones.
- Ruido en las plantas de reciclado

En principio, los vertidos de neumáticos presentan un peligro potencial para el medio ambiente por el riesgo de incendios y porque constituyen un hábitat natural para organismos infecciosos.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.2	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>NEUMÁTICOS FUERA DE USO (NFU)</b>		

Virtualmente no existe posibilidad de una combustión espontánea de los neumáticos. En muchos casos los incendios se deben a falta de cuidado o son provocados. Una vez iniciados, los incendios de neumáticos son difíciles de extinguir y pueden durar semanas, e incluso meses. Los humos densos creados se pueden trasladar a grandes distancias.

Los incendios ocurridos en carreteras en los Estados Unidos durante los años 90, han llevado a la redacción de nuevas directrices de proyecto para minimizar el calentamiento interno de rellenos con neumáticos triturados(22). Para elevar la temperatura en estos rellenos hasta el punto de ignición se necesita una reacción exotérmica inicial, que potencialmente puede ser causada por: oxidación de los alambres de acero, oxidación del caucho, microbios que consumen los cordones de acero o que generan condiciones ácidas, y microbios relacionados con productos petrolíferos líquidos.

Por todo lo anterior, se recomienda utilizar en rellenos solamente neumáticos triturados en los que los elementos metálicos se hayan separado magnéticamente, evitar derrames de gasolina o gasoil sobre el relleno, no exponer los trozos a materias orgánicas y/o fertilizantes, y separar el relleno del suelo mediante una membrana impermeable.

Aunque no se conocen efectos perjudiciales sobre la salud, salvo las convencionales de cualquier material particulado, en el caso de una breve inhalación de polvo de neumáticos, se deben tomar precauciones para evitar su continua inhalación o contacto. Se recomiendan elementos protectores como guantes, gafas y mascarillas.

En el año 1991, el "Asphalt Rubber Producers Group", puso en marcha un estudio para determinar el impacto de las mezclas con betún-caucho en los trabajadores implicados en su puesta en obra. Los resultados indicaron que, no había una diferencia significativa entre el betún-caucho y los materiales convencionales.

Cualquier instalación de reciclado debe de tener en cuenta los límites de exposición ocupacional tanto de niveles de partículas como de niveles de ruido en ambiente laboral.

## **5.- ASPECTOS ECONÓMICOS**

Con la entrada en vigor del Real Decreto 1619/2005, que establece la responsabilidad de la gestión NFU por parte de los productores, se trata de suprimir la eliminación de los NFUs a través de vertederos, controlar su gestión y fomentar su reutilización, valorización y reciclado. Para ello, la empresa SIGNUS Ecovalor que gestiona los NFUs en España, ha establecido una tarifa que se aplica por la compra de cada neumático nuevo y recogida del usado. Estas tarifas varían en función del tamaño del neumático. Por ejemplo, para turismos la tarifa está comprendida entre 1,77 y 3,52 euros más IVA (1 enero de 2008).

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.2	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>NEUMÁTICOS FUERA DE USO (NFU)</b>		

## **6.- NORMATIVA TÉCNICA**

- PG-3 art-215 (betunes modificados); 540 (lechadas bituminosas), 542 (mezclas bituminosas en caliente) y 543 mezclas bituminosas en caliente para capa de rodadura)
- XPT47-751. Determination du format des produits issus su broyage primaire
- ASTM D-6270-68. Standard Practice for Use of Scrap Tires in Civil Engineering Applications
- PrEN 14243. European Standard. "Post-consumer tyre-Materials and applications".

## **7.- REFERENCIAS:**

- [1] MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE. "Plan Nacional de Neumáticos Fuera de Uso. 2000-2006", Madrid, 2000.
- [2] EUROPEAN TYRE RECYCLING ASSOCIATION (ETRA). "Tyre Recycling after 2000: Status and Options". París, March, 2000.
- [3] TRANSPORTATION RESEARCH BOARD (TRB). "Appropriate Use Of Waste and Recycled Materials in the Transportation Industry – An information Database", National Cooperative Highway Research Program, Project 4-21. Washington, DC, 2001.
- [4] EPPS, J.A. "Use of recycled rubber tires in highways", NCHRP Synthesis of Highway Practice 198, Transportation Research Board. Washington, DC, 1994.
- [5] FORSYTH, RAYMOND A. AND JOSEPH P. EAGAN, JR. "Use of Waste Materials in Embankment Construction", Transportation Research Record nº 593, TRB. Washington, DC, 1976.
- [6] KHATIB, Z.K.; BAYOMY, F.M. "Rubberized Portland Cement Concrete". Journal of Materials in Civil Engineering, Vol.11, nº3, p.206-213. 1999.
- [7] ELDIN, N.; SENOUCI, A.B. "Rubber –Tire Particles as Concrete Aggregate". Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 5, nº4, p.478-496. 1993.
- [8] LI, Z.; LI, F.; LI, J.S.L. "Properties of concrete incorporating rubber tyre particles". Magazine of Concrete Research, Vol. 50, nº4, p. 297-304. June, 1998.
- [9] TOPCU, I. B.; AVCULAR, N. "Analysis of Rubberized Concrete as a Composite Material". Cement and Concrete Research, Vol. 27, nº 8, p. 1135-1139. 1997.
- [10] TOPCU, I. B.; AVCULAR, N. "Collision Behaviors of Rubberized Concrete". Cement and Concrete Research, Vol. 27, nº 12, p. 1893-1898. 1997.
- [11] BIEL, T.D.; LEE, H. "Use of Recycled Tire Rubbers in Concrete". Proc., ASCE 3rd Mat. Engrg. Conf. Infrastructure: New Materials and Methods of Repair, p.351-358. 1994.



<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.2	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>NEUMÁTICOS FUERA DE USO (NFU)</b>		

- [12] TOMÁS RAZ, R. "Reutilización de neumáticos usados en la construcción de carreteras". Jornada sobre utilización de residuos en la construcción de carreteras. Madrid, marzo, 2001.
- [13] CASADO MARTÍNEZ, C. "Utilización de caucho reciclado procedente de neumáticos en la polimerización de betunes para la fabricación de mezclas bituminosas en caliente (vía húmeda)", I Congreso Andaluz de Carreteras. Granada, 1998.
- [14] GALLEGO, J.; TOMÁS R.; DEL VAL, M.A. "Neumáticos usados. Un residuo útil en la pavimentación de carreteras", Ingeopres nº 45. Madrid, 1996.
- [15] GALLEGO, J. ; TOMÁS, R.; DEL VAL, M.A. "Aprovechamiento de neumáticos usados en la fabricación de mezclas asfálticas", IV Simposio Español sobre Carreteras y Medio Ambiente. Torremolinos (Málaga), 1998.
- [16] GALLEGO, J.; DEL VAL, M.A. "Efecto del empleo de caucho de neumáticos usados por vía seca en las características de mezclas bituminosas en caliente", I Congreso Andaluz de Carreteras. Granada, 1998.
- [17] GONZÁLEZ HERRERA, D. "Estudio sobre el diseño y construcción de mezclas bituminosas en caliente con granos de caucho reciclado empleando husos granulométricos españoles", Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona, 1996.
- [18] MORENO BENÍTEZ, J.F. "Estudio de la utilización de aglomerado asfáltico con polvo de caucho procedente de neumáticos usados en el refuerzo de la Autovía A-92", IV Simposio Español sobre Carreteras y Medio Ambiente. Torremolinos (Málaga), 1998.
- [19] RAMÓN MONCHO, J.A. "Utilización de betunes modificados con polvo de caucho en capas de rodadura en la red secundaria de carreteras de Andalucía", II Congreso Andaluz de Carreteras. Cádiz, 2000.
- [20] VÁZQUEZ I RAMONICH, E.; RUBIO GUZMAN, B. "Mezcla bituminosa con polvo de neumáticos. Tramo de ensayo en la carretera B140", I Congreso Andaluz de Carreteras. Granada, 1998.
- [21] BRELCHA CARDELÚS, R. "Experiencia con el aprovechamiento de neumáticos en Cataluña". Jornada sobre utilización de residuos en la construcción de carreteras. Madrid, marzo, 2001.
- [22] FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. "Interim Design Guidelines to Minimize Internal Heating of Tire Shred Fills". July, 1997.
- [23] "Rellenos de NFU troceados en terraplenes y muros". Proyecto elaborado por ACCIONA Infraestructuras, Iberinsa y UPC (2006).
- [24] Guidance Manual: "Tire shreds as final cover foundation layer material at municipal solid waste landfills. California Integrated Waste Management Board". Sacramento, California (1998).

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.2	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>NEUMÁTICOS FUERA DE USO (NFU)</b>		

- [25] Guidance Manual: "Tire shreds as leachate drainage material at municipal solid waste landfills California Integrated Waste Management Board". Sacramento California (1998).
- [26] Guidance Manual: "Tire shreds as gas collection material at municipal solid waste landfills". Sacramento, California (1998).
- [27] Guidance Manual: Tire shreds as operations layer material at municipal solid waste landfills. Sacramento, California, (1998).
- [28] ALIAPUR: "End of Life tyres in electric arc furnaces: an industrial success story (2006).
- [29] ALIAPUR: "Caracteristiques et propriétés techniques des pneumatiques usages dans le cadre d'utilisations en genie civil (2005).
- [30] ALIAPUR: "Utilisation des pneumatiques usages entiers ou broyés en centers de stockage de déchets (2005).
- [31] ALIAPUR: Utilisation des pneumatiques usages entiers ou broyés en bassin de retention d'eaux pluviales (2005).
- [32] [http://ofrir.lcpc.fr/accueil/accueil\\_articles\\_theme.php](http://ofrir.lcpc.fr/accueil/accueil_articles_theme.php)
- [33] Gallego Medina, Juan y de los Santos Granados, Luis, "Mezclas bituminosas con alto contenido de caucho de neumáticos: tecnología, fabricación y comportamiento", Actas del VI Congreso Nacional de Firmes, León, Asociación Española de la Carretera, 2004. pp. 613-626.

## **8.- ENTIDADES DE CONTACTO**

- SIGNUS. Sistema Integrado de Gestión de Neumáticos Usados.  
[www.signus.es](http://www.signus.es)
- EUROPEAN TYRE RECYCLING ASSOCIATION (ETRA).  
7, rue Leroux 75116 Paris-France  
Tel. 33 1 45 003777, Fax 33 1 45 008347  
<http://www.etra-eu.org/>  
e-mail: [etra@euronet.be](mailto:etra@euronet.be)
- AGRUPACIÓN DE FABRICANTES DE CEMENTO DE ESPAÑA (OFICEMEN)  
C/ José Abascal nº 53  
28003 Madrid
- INSTITUTO PARA LA DIVERSIFICACIÓN Y AHORRO DE LA ENERGÍA (IDAE)  
Pº de la Castellana nº 95  
28046 Madrid  
e-mail: [www.idae.es](http://www.idae.es)

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.3	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>ESCORIAS Y CENIZAS DE INCINERADORA DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU)</b>		
Nombre en inglés: Municipal Solid Waste (MSW) Combustor Ash		



CENIZAS DE INCINERADORA

## 1.- ORIGEN

Según los datos recogidos en la Versión Preliminar del Plan Nacional Integrado de Residuos (2008-2015), se estima que en España se generaron durante el año 2004 un total de 22.735.142 t de residuos urbanos (RU). Estos residuos están constituidos en término medio por: materia orgánica (44,0%), papel-cartón (21 %), plástico (10,6 %), vidrio (7 %), metales férricos (3,4 %), metales no férricos (0,7 %), maderas (1 %) y otros (12,3 %). De estas cantidades, (49,8%) se eliminaron en vertedero (todavía el 3,2% en vertederos incontrolados), parte se compostaron (30,8%), se biometanizaron (0,9%), fueron recogidos de forma selectiva (vidrio, papel, y otros) el 10,8%, y el resto (7,7 %) se valorizaron energéticamente en plantas incineradoras<sup>(1)</sup>.

Los residuos urbanos brutos, bien frescos o procedentes de procesos previos, se pueden emplear como combustibles en una o varias líneas de incineración. En el horno se efectúa la combustión de los RSU de forma prácticamente completa, reduciéndose por término medio un 90% el volumen y un 70% el peso<sup>(2)</sup>. Se pueden distinguir tres tipos de hornos: hornos de parrillas, hornos de lecho fluido y hornos rotativos.

Se generan varios tipos de residuos: **cenizas de hogar o escorias** (residuos generalmente combinación de material total o parcialmente quemado que se descarga en las parrillas del horno),

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.3	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>ESCORIAS Y CENIZAS DE INCINERADORA DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU)</b>		

**cenizas volantes** (residuos constituidos por aquellas partículas que son arrastradas por la corriente de gases al exterior de la cámara de combustión) y **lodos**. En plantas con hornos de lecho fluido con reciclaje previo la producción de escorias es muy reducida.

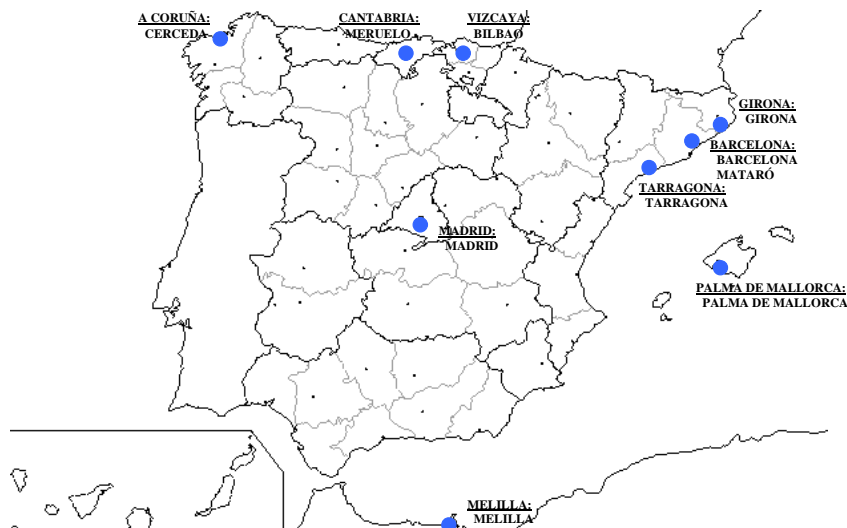
## 2.- VOLUMEN Y DISTRIBUCIÓN

En España existen un total de diez plantas incineradoras, repartidas según se indica en el mapa adjunto, con una capacidad de tratamiento actual de aproximadamente  $1,97 \times 10^6$  t/año, lo que supone del orden del 8,9 % del volumen anual de residuos sólidos urbanos generados. Cada año se producen aproximadamente 346 kt de cenizas de hogar y 48 kt de cenizas volantes<sup>(3)</sup>.

En el Plan Nacional de Residuos Urbanos del Ministerio de Medio Ambiente<sup>(1)</sup> se fijó el objetivo de valorización energética del 17,7% de los RSU en el año 2006, por lo que se estima un importante impulso en el sector de plantas incineradoras con recuperación energética.

El reciclado de los residuos procedentes de incineración conlleva un procesamiento bastante elaborado para obtener un material que resulte aceptable desde los puntos de vista técnico y medioambiental.

### LEYENDA



## 3.- VALORIZACIÓN

### 3.1.- PROPIEDADES <sup>(3)</sup>

Un problema que presenta la utilización de este tipo de residuos es la falta de homogeneidad en sus características. Esto es debido a las diferencias existentes entre las tecnologías empleadas en

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.3	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>ESCORIAS Y CENIZAS DE INCINERADORA DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU)</b>		

la combustión y en el proceso de limpieza de humos de las plantas de tratamiento, y en los procesos previos a la incineración (reciclaje, compostaje o ambas).

### Propiedades físicas

La **escoria** resultante de la incineración de residuos urbanos es un material de tipo granular con partículas en su gran mayoría inferiores a 1 cm de diámetro, formadas por los materiales no combustibles y/o inertes de los residuos urbanos que salen de la cámara de combustión después de la incineración a temperatura superiores a 850 °C, tales como trozos de vidrio, cerámica, metales etc. Incluyen también los materiales más finos que caen entre los intersticios de la parrilla. Dichas escorias a la salida del horno en general se enfrían con agua y se depositan separadamente de las cenizas y residuos de depuración de gases. Suponen el 85-95% en peso de los residuos totales del proceso de incineración. Son de color grisáceo, tienen una amplia distribución granulométrica de partículas con un elevado grado de humedad, que confiere cierta adherencia entre ellas, y morfología muy dispar. Las escorias son más porosas y menos resistentes que los áridos naturales, pudiéndose considerar como áridos de calidad media.

Bajo la denominación de **cenizas** se incluyen en general tanto las cenizas volantes como los residuos de depuración de gases. Son un material pulverulento con tamaño de partículas inferior a 250µm y una alta superficie específica, lo que unido a su composición química supone un alto riesgo de contaminación de las aguas.

A continuación se describen las principales propiedades físicas de cada unas de ellas:

<b>CENIZAS DE HOGAR<sup>(4)(5)</sup></b>		
Granulometría Porcentaje en peso (%)	0-1 mm	18
	1-2 mm	14
	2-4 mm	21
	4-6 mm	15
	6-16 mm	24
	16-40 mm	
Densidad de conjunto (g/cm <sup>3</sup> )		1 –1,1
Absorción de agua (%)		2,36
Valor de abrasión de Los Ángeles (%)		40

**Tabla 1:** Propiedades físicas de las cenizas de hogar de RSU

<b>CENIZAS VOLANTES<sup>(6)</sup></b>		
<i>Datos de una incineradora española de lecho fluido con reciclaje previo</i>		
Granulometría Retenidos acumulados (%)	0,08 mm	56,2
	0,16 mm	22,1
	0,32 mm	3,2
	0,63 mm	0,0
	1,25 mm	0,0
Densidad de conjunto (g/cm <sup>3</sup> )		0,8
Finura 45 µm (%)		61

**Tabla 2:** Propiedades físicas de las cenizas volantes de una incineradora española de lecho fluido con reciclaje previo

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.3	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>ESCORIAS Y CENIZAS DE INCINERADORA DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU)</b>		

### Propiedades químicas

Los análisis químicos demuestran que los principales componentes de las cenizas son: sílice, aluminio, hierro y calcio; también se pueden encontrar como componentes secundarios, titanio, magnesio, sodio, potasio o fosfato y en muy pequeñas cantidades bario, estroncio, rubidio y metales pesados como cobre, zinc, plomo, cromo, níquel o cadmio.

ÓXIDOS	CENIZAS DE HOGAR O ESCORIAS <sup>(7)</sup>	CENIZAS VOLANTES <sup>(6)(8)(10)</sup>			
		Incineradoras sin reciclaje previo		Incineradoras con reciclaje previo	
SiO <sub>2</sub>	54,6	9,73	26,71	<b>22,9</b>	32,7
CaO	11,1	30,25	26,62	<b>21,8</b>	23,73
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8,0	6,5	13,74	<b>23,8</b>	15,34
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8,5	0,8	3,24	<b>17,6</b>	2,76
MgO	1,5	1	2,44	<b>2</b>	1,87
K <sub>2</sub> O	1,3	2,3	1,97	<b>1,7</b>	0,56
Na <sub>2</sub> O	12,8	2,9	2,59	<b>2,5</b>	2,14
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	2,1	-	1,39	-	1,06
TiO <sub>2</sub>	-	0,79	2,49	-	2,62
SO <sub>3</sub>	-	7,1	10,73	<b>2,94</b>	3
MnO	-	0,03	0,13	-	0,12
Cl <sup>-</sup>	-	29	-	<b>2,6</b>	-

(\*) Los valores en negrita corresponden a las cenizas volantes de una incineradora española de lecho fluido con recuperación previa de materiales.

**Tabla 3:** Composición química de las cenizas de incineración de RSU

### Lixiviación

Cuando estos residuos se someten a pruebas de toxicidad, la concentración de metales tóxicos en los lixiviados excede en ocasiones los límites legales. Las cenizas volantes resultan más tóxicas que las escorias. Según la legislación tanto europea como nacional, las escorias o cenizas de hogar procedentes de la incineración de residuos sólidos urbanos están catalogados como residuos no peligrosos y no tóxicos. Por el contrario, las cenizas procedentes de la incineración de residuos sólidos urbanos están catalogados como residuos tóxicos y peligrosos.

Existen diferentes procedimientos para disminuir la toxicidad de los materiales generados en la incineración, como por ejemplo el lavado previo a su utilización, con el que se consigue eliminar casi totalmente los componentes más lixiviables tales como los cloruros, el cadmio, el zinc y los iones sulfato.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.3	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>ESCORIAS Y CENIZAS DE INCINERADORA DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU)</b>		

### Índice de actividad puzolánica

Se define el índice de actividad puzolánica como la relación entre la resistencia a compresión de una mezcla de cemento, cenizas volantes y arena, y la resistencia de la mezcla de referencia compuesta de cemento y arena.

El índice de actividad puzolánica de las cenizas de incineradora depende de las condiciones de combustión y de la composición del material incinerado, pudiéndose obtener valores similares a los de las cenizas volantes procedentes de centrales termoeléctricas. Al mejorar las condiciones de combustión el índice de actividad puzolánica aumenta.

### **3.2.- PROCESAMIENTO**

El reciclado de los residuos procedentes de incineradoras de residuos sólidos urbanos requiere un procesamiento bastante elaborado para obtener un material que sea aceptable desde los puntos de vista técnico y medioambiental. Se deben separar las escorias y las cenizas volantes, llevándose a cabo las siguientes técnicas de procesado en cada una de ellas:

#### Cenizas de hogar<sup>(11)</sup>

- *Enfriado* de la escoria en agua inmediatamente después de salir del incineradora.
- *Desferrización* por medios magnéticos.
- *Cribado* con un paso máximo de grano de 20 mm (Bélgica y Holanda) y 60 mm (Francia).
- *Eliminación de la fracción más fina* de las escorias, ya que en ella se encuentran concentrados los metales pesados (tomando como límite por ejemplo 2 mm).
- *Almacenamiento* de la escoria al aire libre durante varios meses (generalmente entre 1 y 3 meses) con el fin de obtener estabilidad volumétrica mediante un proceso de maduración. Durante esta etapa al aire libre es necesario tomar precauciones para que el contenido de humedad de la escoria alcance o conserve aproximadamente el nivel del óptimo Proctor.

#### Cenizas volantes<sup>(12)</sup>

- *Lavado* de las cenizas volantes que permite eliminar en casi un 90% el contenido de cadmio y cloruros y en un 50% los sulfatos y el zinc.
- *Estabilización y la solidificación* que a menudo se combinan para conseguir el mejor resultado posible con el fin de reducir los lixiviados de los componentes peligrosos. La solidificación es un proceso físico para encapsular los residuos con un material aglomerante. La estabilización es un proceso químico que transforma elementos contaminantes solubles en elementos con menor capacidad de solubilidad al añadir ciertos reactivos. Para la solidificación se utiliza normalmente cemento. Las cenizas cementadas han sido consideradas como residuo no tóxico, ni peligroso.
- *Tratamiento térmico* que implica la fundición de residuos a elevadas temperaturas desde 1.200

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.3	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>ESCORIAS Y CENIZAS DE INCINERADORA DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU)</b>		

a 1.500°C para transformar las cenizas en cristal no nocivo y muy estable (vitrificación). De esta forma se destruyen rápidamente las dioxinas y otros componentes orgánicos, disminuye su volumen y se facilita la recuperación de metales.

### 3.3.- PROPIEDADES DEL MATERIAL PROCESADO

#### 3.3.1.- Cenizas de hogar o escorias

Según su composición mineralógica, las escorias no son productos estables. Durante los primeros tres meses de almacenamiento se producen reacciones<sup>(13)(14)</sup> de hidratación, solidificación, reacciones de los sulfatos, formación de sales y reacciones del hierro, entre otras, dando lugar a la formación de escorias estables.

- Reacciones de hidratación
- Solidificación  $\text{Ca(OH)}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$
- Reacciones del sulfato  $\text{CaSO}_4 + \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaSO}_4 \cdot 0,5 \text{H}_2\text{O}$
- Formación de sales NaCl y KCl
- Reacción del hierro  $\text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow \gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$

#### 3.3.2.- Cenizas volantes

El lavado y posterior secado de las cenizas volantes produce una reducción del 30% del peso inicial de las cenizas, debido principalmente a la disolución de las sales. En el proceso se eliminan la mayor parte del cadmio, cloruros y zinc<sup>(15)(16)</sup>.

Elementos	Reducción de la concentración
Cd	90 %
Cu	3 %
Mo	5 %
Pb	9 %
Zn	66 %
Cl <sup>-</sup>	92 %
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	14 %

**Tabla 4:** Propiedades químicas de las cenizas volantes de RSU lavadas



<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.3	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>ESCORIAS Y CENIZAS DE INCINERADORA DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU)</b>		

El proceso de estabilización/solidificación de las cenizas volantes reduce principalmente las concentraciones en el lixiviado de Mo, Zn y Cl<sup>-</sup>, mientras que mantiene casi intacto el contenido de Cu<sup>(16)</sup>.

Elementos	Reducción de la concentración en el lixiviado
Cu	0 %
Mo	92%
Pb	5%
Zn	84%
Cl-	99,8%

**Tabla 5:** Propiedades químicas de las cenizas volantes de RSU estabilizadas

### 3.4.- APLICACIONES

La reutilización de los residuos procedentes de incineradoras ha sido fomentada no sólo por las preocupaciones medioambientales actualmente surgidas en las autoridades y en el público, sino también por el problema de la insuficiencia de espacio en los vertederos debido a las crecientes cantidades de desechos municipales que es necesario eliminar. Aunque en España el reciclaje de este tipo de residuos es muy reducido y se produce de forma puntual, en otros países europeos su utilización alcanza porcentajes mayores (principalmente de las escorias), tal y como se muestra en la siguiente tabla<sup>(11)</sup>:

PAÍS	ESCORIAS		CENIZAS	
	Producción 10 <sup>3</sup> t.	Reutilización %	Producción 10 <sup>3</sup> t.	Reutilización %
España	450	0	30	0
Bélgica	300	0	25	0
Alemania	2.600	69	270	0
Dinamarca	415	61	(*)	(*)
Francia	1.800	(*)	200	(*)
Países Bajos	650	7	85	41

(\*) sin datos

**Tabla 6:** Utilización de escorias y cenizas de RSU en Europa

El empleo de las escorias en el campo de la construcción puede presentar problemas medioambientales, debido al contenido de elementos tóxicos (en función de cada escoria en particular), y problemas técnicos, ya que pueden ser altamente expansivas.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.3	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>ESCORIAS Y CENIZAS DE INCINERADORA DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU)</b>		

Actualmente la utilización de las escorias de incineradoras urbanas se centra en terraplenes o firmes de carreteras, aunque existen estudios a nivel experimental sobre la aplicación de este residuo en bloques de hormigón prefabricado, ladrillos o en la producción de cemento.

### 3.4.1.- Obras de tierra y terraplenes

**Los terraplenes** y otros trabajos de movimiento de tierras, parecen ser los usos más prometedores de la escoria en la construcción de carreteras. Por una parte, los criterios técnicos de aceptación no tienen que ser demasiados rígidos; por otra parte se pueden absorber grandes cantidades de escoria en un determinado emplazamiento, lo que facilita la puesta en práctica de medidas e inspecciones protectoras desde el punto de vista del medio ambiente.

En España, la Comunidad Autónoma de Cataluña ha desarrollado legislación sobre la valorización de escorias de incineración de RSU. La Orden de 15 de febrero de 1996, de la Consejería de Medio Ambiente del Gobierno de la Generalitat de Cataluña sobre valorización de escorias, define el procedimiento a seguir para llevar a cabo su valorización, las condiciones que deben cumplir las escorias para ser consideradas como valorizables, los posibles usos a los que se pueden destinar las escorias valorizables (nivelado de terrenos, terraplenes, subbases de carreteras y restauración de zonas degradadas por actividades extractivas) y los condicionantes para estos usos.

En Dinamarca, aproximadamente entre un 70-90% de la escoria de fondo se utiliza en trabajos de movimiento de tierras, y recuperación de terrenos. Hay que señalar que este país ha condicionado el empleo de las escorias en función del resultado de los ensayos de lixiviación, por delante de su composición química, así solo aquellas que caen en la denominada categoría "A", asociada a menores lixiviados, pueden ser valorizadas en la forma indicada anteriormente<sup>(42)</sup>.

En Francia, la norma NF P 11-300 clasifica las escorias en la familia "F6", dentro de la clase "F" (suelos orgánicos y subproductos industriales) y permite su empleo en obras de tierra y terraplenes en función de los parámetros de naturaleza y resistencia mecánica. Esta clasificación remite a la "GTR" ("Guide Technique pour la réalisation des terrassements et couches de forme, SETRA-LCPC, 2000), en el que las escorias son organizadas en los siguientes grupos: "F61": "Escorias bien quemadas, cribadas, desimantadas, con escasa presencia de sustancias solubles y almacenadas durante varios meses", "F62", lo mismo que "F61" pero sin envejecimiento y "F63": "Escorias mal incineradas, sin tratamiento o con elementos solubles". Para la ejecución de terraplenes, sólo son utilizables las clases "F61" y "F62", siempre y cuando no se empleen en zonas inundables y a menos de 30 metros de cursos de agua, así como en las inmediaciones de captaciones de agua. En explanadas sólo es utilizable la clase "F61" y siempre que no se trate de mezclas con ligantes hidráulicos, por la exposición al riesgo de hinchamiento. La circular del Ministerio Francés de Medio Ambiente de mayo de 1994 limita el empleo de las escorias a los rellenos de menos de 3 m de altura, con la condición de que en superficie exista un firme o aparcamiento, un edificio cubierto o un recubrimiento vegetal de espesor no inferior a 50 cm

### 3.4.2.- Carreteras<sup>(17)</sup> a <sup>(21)</sup>

La capacidad de soporte inicial de las capas de escoria es algo inferior a las de zahorra natural o artificial, pero con el tiempo las escorias endurecen por envejecimiento, mejorando su comportamiento a largo plazo. Estas cualidades hacen que en algunos países se utilicen para

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.3	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>ESCORIAS Y CENIZAS DE INCINERADORA DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU)</b>		

**capas de subbase.** En Alemania, las subbases y las aplicaciones con ellas relacionadas absorben el 37% de la escoria reciclada.

La utilización de la **escoria como material de base** para carreteras **no es una práctica común**, pues sus propiedades no suelen satisfacer las funciones de un material de base. Sólo pueden cumplir los criterios de aceptación relativos a carreteras secundarias. En Bélgica y Alemania se han detectado problemas de hinchamiento ocurridos bajo capas delgadas de pavimento asfáltico; éste es el motivo por el cual en Alemania el espesor mínimo de la capa de mezcla bituminosa sobre una base de escoria es de 16 cm. El material puede ser utilizado bajo pavimentos de bloques o losas de hormigón.

La utilización para **capas de base de escorias estabilizadas con cemento**, presenta aspectos positivos debido al sustancial aumento de la capacidad soporte y al mejor comportamiento a la lixiviación. Todavía existen algunos problemas técnicos, como por ejemplo la presencia de metales pesados y vidrio que pueden reaccionar negativamente con el cemento.

La utilización de las **escorias en las mezclas bituminosas** no ha tenido mucho éxito, debido a la débil ligazón que se produce entre los granos de escoria y el betún, el alto contenido inicial de humedad de la escoria y el alto consumo de ligante como consecuencia de la porosidad de los granos. También existen problemas de mezclado y aplicación.

### 3.4.3.- Edificación y obra pública

#### ***Empleo de las cenizas de hogar como árido para hormigón***

Una posibilidad de aplicación es la sustitución parcial o total de los áridos del hormigón por residuos de la incineración de RSU, cuyo estudio por el momento únicamente se ha llevado a cabo en laboratorio.

Al sustituir parte de los áridos del hormigón por escoria (hasta un 25%) no se producen variaciones significativas en las características mecánicas ni en la durabilidad del hormigón<sup>(22)</sup>, aunque pueden aparecer problemas derivados del elevado contenido de cloruros y sulfatos y de la presencia de metales pesados, como: pérdida rápida de trabajabilidad, aumento importante del tiempo de fraguado y formación de hidratos expansivos durante el fraguado y endurecimiento.

Estos problemas se pueden solucionar, según los trabajos de laboratorio realizados, sumergiendo las escorias en una disolución de hidróxido sódico durante 15 días. Con este tratamiento se consigue reemplazar una parte del árido natural por escorias sin que afecte a la durabilidad del hormigón.

#### ***Empleo de las cenizas de hogar en bloques de hormigón prefabricado***

Existen estudios de laboratorio que indican que las cenizas de hogar o escorias procedentes de incineradoras urbanas podrían ser utilizadas en la fabricación de bloques de hormigón prefabricado, con hasta un 65% de cenizas de hogar (cumpliendo con la norma ASTM C90), si se someten a un tratamiento previo para obtener una granulometría y un tamaño máximo del árido adecuado y si se eliminan los materiales féreos. Los máximos valores de resistencias conseguidos<sup>(5)</sup> son de aproximadamente 17,25 N/mm<sup>2</sup>. Como las escorias poseen pocos finos, se

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.3	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>ESCORIAS Y CENIZAS DE INCINERADORA DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU)</b>		

pueden mezclar con arena, consiguiéndose valores mucho mayores de resistencia y densidad de los bloques, y una mayor trabajabilidad.

Estudios en el Reino Unido, dan como contenido óptimo de cenizas de hogar en el hormigón el 30% del total de los áridos<sup>(23)</sup>. Los bloques de hormigón fabricados con este porcentaje de cenizas de hogar cumplen con todos los requisitos exigidos en la norma BS 6073 (resistencia a compresión, resistencia a flexión, retracción y contenidos de cloruros).

Pueden presentar problemas por un contenido excesivo de elementos (Al, Na, K, Pb, Cl y SO<sub>4</sub>) en el lixiviado, por lo que su aplicación debería quedar reducida a zonas donde se reduzca la posibilidad de lixiviación de elementos contaminantes. Si las cenizas se someten a un lavado previo para eliminar las sales solubles, el campo de aplicación es mayor.

### **Empleo de cenizas de hogar como áridos ligeros artificiales**

Existen también diferentes estudios a nivel de laboratorio sobre la utilización de cenizas de hogar con el fin de producir árido artificial sinterizado para hormigón. La principal ventaja que ofrece esta aplicación es la completa utilización del residuo.

Las cenizas se someten a un tratamiento previo que consiste en una trituración, tamizado y separación de metales, tanto férricos como no férricos, mediante una cinta magnética; posteriormente el material se mezcla con arcilla, se sinteriza y se somete a cocción en un horno rotativo, obteniéndose así los áridos artificiales. Para que las cenizas se puedan sinterizar es necesario que antes de ser introducidas en el horno sean granuladas.

Con este procedimiento se obtienen unos áridos que presentan las siguientes propiedades<sup>(25)</sup>:

Densidad aparente (kg/m <sup>3</sup> )	900-1.120
Densidad real (kg/m <sup>3</sup> )	2.180-2.290
Absorción de agua (%)	11-15
Porosidad (%)	25-38

**Tabla 7:** Propiedades físicas del árido ligero fabricado con cenizas de hogar de RSU

El hormigón que contiene este tipo de áridos posee las siguientes características<sup>(26)</sup>:

- La forma redondeada de este tipo de árido mejora la trabajabilidad del hormigón.
- La densidad de los áridos es algo mayor que la de otros áridos ligeros artificiales, y produce hormigones con una densidad aproximada de 2.020 kg/m<sup>3</sup> (ligeramente superior a la de un hormigón ligero).
- Poseen una menor resistencia (tanto a compresión como a flexión) y un módulo de elasticidad también menor.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.3	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>ESCORIAS Y CENIZAS DE INCINERADORA DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU)</b>		

- La fluencia y retracción son mayores cuando se utilizan las cenizas volantes como áridos artificiales.

Los ensayos realizados en el hormigón con áridos artificiales<sup>(25)</sup>, por un periodo de hasta cuatro años y medio, demuestran que no existe apenas reducción de la resistencia durante este periodo de tiempo. El mayor problema reside en el elevado consumo energético que requiere la cocción en el horno.

### **Empleo de cenizas de hogar en la fabricación de ladrillos**

Las escorias que se obtienen en el proceso de incineración de RSU se pueden emplear como sustitutivo de la arena en la fabricación de ladrillos.

Estudios de laboratorio han demostrado que si se añaden pequeñas cantidades de cemento (entre un 4 y un 10%), se mejoran las resistencias tanto a compresión como a flexión de los ladrillos, llegando a alcanzar una resistencia a compresión de hasta 52 MPa para un contenido de escorias del 40% y un 10% de cemento<sup>(27)</sup>.

Tanto la resistencia a compresión como a flexión se pueden mejorar aumentando la presión de compactación en el proceso de fabricación.

Inmediatamente después de su fabricación, la resistencia a compresión alcanza valores comprendidos entre 10 y 17 MPa, por lo que pueden ser distribuidos inmediatamente, reduciendo así los costes de almacenamiento.

Este tipo de ladrillos presenta una excelente resistencia a la abrasión, que aumenta al aumentar el contenido de escorias, y una menor absorción de agua<sup>(27)</sup>.

### **Empleo de cenizas volantes para la producción de cemento de alinita**

El cemento de alinita fue desarrollado en la Unión Soviética hace dos décadas al aislar un nuevo compuesto en el clinker de cemento que contenía MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y CaCl<sub>2</sub>. Este compuesto recibe el nombre de alinita.

Las principales características tecnológicas de este tipo de cemento son su baja temperatura de formación (unos 1000°C) y sus excelentes propiedades ligantes. El proceso de producción del cemento de alinita consiste en la cocción de un crudo con una relación CaO/SiO<sub>2</sub> entre 2,3 y 3,2 y un contenido en cloruros entre 4,5 y 9,5 en tanto por ciento en peso<sup>(22)</sup>.

La mezcla es homogeneizada, peletizada, clinkerizada a temperaturas entre 950 y 1100°C y posteriormente enfriada. El contenido en cloruros del cemento, le confiere un rápido fraguado y endurecimiento por lo que sus usos y puesta en obra son particulares.

Se emplea fundamentalmente en aplicaciones que requieren una alta capacidad portante inicial y donde la durabilidad no es un requisito prioritario.

Las cenizas volantes generadas en las plantas de incineración tienen una composición química similar a la composición típica de un cemento de alinita, por lo que recientemente se han realizado

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.3	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>ESCORIAS Y CENIZAS DE INCINERADORA DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU)</b>		

diferentes estudios alemanes y americanos sobre la producción de cemento de alinita a partir de residuos de incineración.

Una de las aplicaciones de este tipo de cemento es su empleo para inmovilizar residuos tóxicos y peligrosos, ya que presenta un rápido fraguado.

### **Empleo de cenizas volantes como adición al hormigón**

Existen diversas investigaciones de laboratorio sobre el uso de cenizas volantes procedentes de la incineración de residuos sólidos urbanos como adición al hormigón a partir de la actividad puzolánica que pueden presentar.

El problema que origina el empleo de las cenizas volantes es la variedad de características que pueden presentar, pudiendo haber cenizas aptas para su empleo y cenizas que presenten serios inconvenientes tanto medioambientales como técnicos; por ello, los resultados pueden resultar dispares de unos estudios a otros.

Algunas investigaciones<sup>(28)</sup> indican que al sustituir hasta un 30% de cemento por cenizas volantes (obtenidas en un proceso con recuperación previa), se pueden obtener resistencias a compresión comparables con las de un hormigón sin cenizas volantes. Cuando no se realiza la recuperación previa, la resistencia del hormigón disminuye considerablemente.

La incorporación de estas cenizas volantes al hormigón aumenta la cantidad de agua de mezcla necesaria para alcanzar una determinada consistencia y el tiempo de fraguado. Además se suelen presentar problemas de expansibilidad y lixiviación.

### **Hormigones celulares o morteros celulares.**<sup>(35)(36)( 37)</sup>

Los morteros celulares están formados por cemento, agua, arena fina o molida y un producto capaz de crear, por medios físicos o químicos un gran volumen de burbujas de gas dentro de la masa de mortero.

En algunas cenizas, al contener anhídrita y aluminio metálico, al ser mezcladas con agua, cal y cemento, se producen mezclas expansivas y porosas. El hormigón celular se puede curar en autoclave, mejorando así su estabilidad.

Este mortero se caracteriza por su reducida densidad y elevada porosidad. En los morteros celulares, la ceniza y el agua forman un material expansivo y el cemento contribuye a la resistencia. Sin embargo, si se añade a la mezcla cal, las cenizas pueden además mejorar la resistencia del mortero.

Las cenizas de las incineradoras de RSU normalmente no tienen carácter puzolánico (apenas tienen sílice reactiva).

La dosificación del mortero debe cumplir unos requisitos para que éste sea de calidad, siendo recomendables las siguientes:

- sustituir la arena o la mayor parte de ella por la ceniza de incineradora,
- añadir un mínimo de cal,

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.3	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>ESCORIAS Y CENIZAS DE INCINERADORA DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU)</b>		

- la relación agua/cemento debe ser menor o igual a 1,6
- el volumen de ceniza será mayor o igual al 30% del volumen del mortero
- la consistencia del mortero debe ser muy fluida.

La ventaja que se obtiene al utilizar cenizas en el hormigón celular es un menor coste en la fabricación del mortero comparado con el que tradicionalmente se fabrica, ya que la ceniza sustituye a la arena, la anhidrita y el polvo de aluminio.

Debido a la alta heterogeneidad de las cenizas, se debe estudiar su dosificación óptima, analizar las propiedades del mortero y estudiar su lixiviación.

### **Arrecifes artificiales <sup>(31)(36)</sup>**

Se ha estudiado la posibilidad de construir arrecifes con bloques fabricados con un aglomerado de cenizas y cemento Pórtland. Estos estudios han obtenido que la resistencia de los bloques no disminuye tras un año de exposición y en cambio la resistencia de los bloques de cemento Portland, sí. También se ha comprobado que no hay desprendimiento de metales, ya que éstos quedan confinados en la matriz de cemento debido a la alta alcalinidad de la ceniza tras el contacto con el cemento y a la alcalinidad de agua del mar.

### **Hormigones de relleno o morteros de relleno <sup>(36)</sup>**

Se clasifican como hormigones de relleno al material destinado a la sustitución de suelo compactado en el relleno de zanjas, bases de pavimentos y cavidades que requieran de un relleno, siendo la matriz de dicho material el cemento. Estos hormigones requieren una gran fluidez y una baja resistencia. Se debe evitar la segregación y reducir la exudación y la retracción. La resistencia habitual que suelen alcanzar está entre 0,25 y 5,5 MPa (aumentando la resistencia con el aumento del cemento), y su densidad se sitúa entre 1,3 y 1,7 kg/m<sup>3</sup>. Su permeabilidad es similar a la de los rellenos granulares. Los hormigones de relleno con respecto a las bases granulares de relleno tienen ventajas como su versatilidad, reducción de maquinaria, habilitación rápida al tráfico, etc.

El uso de las cenizas de incineradoras de RSU en la fabricación del hormigón de relleno ha sido estudiado en nuestro país. Realizando una adecuada dosificación se pueden obtener hormigones con alta fluidez, sin exudación ni segregación y con resistencias similares e incluso superiores a las de los hormigones de relleno tradicionales.

Las cenizas provocan una expansión en las primeras horas de la hidratación, la temperatura ambiente influye notablemente en la cinética de la reacción, pudiéndose controlar mediante la desactivación de las cenizas con hidróxido sódico.

Una gran parte de elementos tóxicos de las cenizas son estabilizados en la matriz de cemento, se producen desprendimientos gaseosos debido a la alcalinidad del medio en reacción con las cenizas, la fase acuosa difiere de la del mortero tradicional (presentando esta última menor cantidad de cloruros, calcio y álcalis, mayor valor de pH, mayor velocidad de fraguado, etc)

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.3	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>ESCORIAS Y CENIZAS DE INCINERADORA DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU)</b>		

**Otros** <sup>(31)(32)(33)(34)(37)</sup>

Las cenizas y escorias de incineradora de RSU también se han utilizado en fase experimental en otras aplicaciones. Así, por ejemplo, se han construido embarcaderos y se ha estudiado la posibilidad de utilizar las cenizas para la fabricación de baldosas, tejas, paneles acústicos, etc.

### 3.5.- OBRAS REALIZADAS

Se conocen pocas aplicaciones de los residuos de incineradoras de residuos sólidos urbanos en España, pero sí en otros países como Alemania, Austria, Holanda, Dinamarca, Francia y los Estados Unidos de América, en los que se utilizan fundamentalmente las cenizas de hogar o escorias<sup>(11)</sup>.

En la mayoría de estos países las cenizas de hogar se pueden emplear en carreteras, terraplenes o bloques de hormigón prefabricado, siempre y cuando se realice un tratamiento previo de las cenizas.

El empleo de las cenizas volantes es más restrictivo, siendo la única aplicación posible en mezclas bituminosas.

**Holanda**<sup>(29)</sup>

En Holanda las cenizas de hogar o escorias se deben procesar para ser empleadas como material de construcción. Las principales aplicaciones que en la actualidad se le da a las cenizas de hogar son terraplenes y capas de bases de carreteras, aunque también se emplea como árido para hormigón y áridos para mezclas bituminosas.

Entre el 20-30% de las cenizas volantes producidas en la incineración de residuos sólidos urbanos se emplea actualmente como finos en mezclas asfálticas.

**Alemania** <sup>(30)</sup>

Aproximadamente el 50% de las escorias se utilizan en bases de carreteras y pantallas acústicas. También se están realizando estudios sobre el cemento de alinita.

**Gran Bretaña**

Actualmente en Gran Bretaña, se están utilizando las cenizas de hogar que se generan en tres incineradoras del país y se está elaborando una guía para su uso en distintos aspectos de la construcción.

**España**

En España se tiene experiencia en la reutilización de escorias en Cataluña, en donde la Generalitat ha regulado su utilización mediante la Orden del 12 de diciembre de 1996 sobre valorización de escorias. En las Islas Baleares, se han realizado dos pruebas de utilización de las escorias de una planta incineradora: como material para el terraplenado de 200 m de un camino



<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.3	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>ESCORIAS Y CENIZAS DE INCINERADORA DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU)</b>		

interior de sus instalaciones y en la ejecución de los terraplenes y la explanada de la estación de transferencia de residuos sólidos de Manacor-San Lorenzo<sup>(3)</sup>.

#### **4.- CONSIDERACIONES MEDIOAMBIENTALES**

La Ley 10/1998, de Residuos, de 21 de abril, establecía en su artículo 3 que tendrían consideración de residuos todos aquellos que figurasen en el Catálogo Europeo de Residuos (CER). Este Catálogo fue aprobado por la Decisión 94/3/CE de 20 de diciembre de 1993, y complementado con la Decisión 94/904/CE, ambas aprobadas en el Real Decreto 952/1997.

Las Decisiones Comunitarias 94/3/CE y 94/904/CE han sido derogadas por la Decisión 2000/532/CE mediante la que se aprueba La Lista Europea de Residuos. La orden MAM/304/2002 de 8 de febrero (con corrección de errores de 12 de marzo), publica en su Anejo 2 la mencionada Lista Europea de Residuos.

Las **escorias o cenizas de hogar** procedentes de la incineración de residuos sólidos urbanos vienen incluidos en la Lista Europea de Residuos en el Capítulo 19 correspondiente a "Residuos de las instalaciones para el tratamiento de residuos, de las plantas externas de tratamiento de aguas residuales y de la preparación de agua para consumo humano y de agua para uso industrial" con los siguientes códigos:

- 19 01 12 Cenizas de fondo de horno y escorias distintas de las especificadas en el código 19 01 11, y están caracterizadas como residuos no peligrosos.
- 19 01 11, y están caracterizadas como residuos no peligrosos.

Las **cenizas volantes** procedentes de la incineración de residuos sólidos urbanos vienen incluidos en la Lista Europea de Residuos en el Capítulo 19 correspondiente a "Residuos de las instalaciones para el tratamiento de residuos, de las plantas externas de tratamiento de aguas residuales y de la preparación de agua para consumo humano y de agua para uso industrial" con el siguiente código:

- 19 01 13 Cenizas volantes que tienen sustancias peligrosas, y están caracterizadas como residuos peligrosos.

Generalmente, la utilización de las cenizas, por separado o mezclada con la escoria, está prohibida en Europa en construcción de carreteras, y el material ha de ser eliminado como desecho químico. La composición química y la alta superficie específica de la ceniza representan riesgos considerables de contaminación de las aguas subterráneas. Solo es aceptable la utilización de las cenizas como filler de una mezcla bituminosa, porque los riesgos de lixiviación se ven reducidos por la completa encapsulación de la ceniza en el aglomerado. También está siendo objeto de investigación la utilización en materiales tratados hidráulicamente.

Normalmente, la utilización de la escoria procesada para construcción de carreteras está más aceptada. Se tienen que tomar medidas protectoras para controlar la contaminación del agua, además del análisis químico y las pruebas de lixiviación sobre las escorias. Las medidas

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: <b>4.3</b>	Mes: <b>DICIEMBRE</b> Año: <b>2007</b>
<b>ESCORIAS Y CENIZAS DE INCINERADORA DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU)</b>		

protectoras varían desde guardar una distancia mínima con respecto a los pozos de agua potable y los ríos, hasta la encapsulación totalmente estanca, con un filtro de arena - bentonita de los terraplenes de escoria. Los aspectos medioambientales de la utilización de los residuos de las incineradoras de RSU están casi exclusivamente relacionados con su comportamiento a la lixiviación, aunque la mayoría de los países europeos también limitan las concentraciones totales de sustancias dañinas en las escorias y cenizas.

## **5.- ASPECTOS ECONÓMICOS**

Las escorias de incineración de residuos sólidos urbanos con granulometría menor de 8 mm, por lo general, son vendidas a cementeras. El resto de granulometrías, si no son utilizadas en rellenos, terraplenes o firmes de carreteras, son transportadas a vertedero de inertes.

Las tarifas de vertido de este material depende del municipio en el que se encuentre el vertedero. Existen municipios con tarifas únicas por tonelada vertida y existen vertederos con tarifas dependiendo de la naturaleza del material que se vaya a verter. Como ejemplo de tarifa única se encuentra Madrid con un precio de 25,20 euros/t y como ejemplo de vertedero que depende de la naturaleza se encuentra el vertedero de Aizmendi en Guipúzcoa con un precio de vertido de escoria de 39,00 euros/t.

Las cenizas de incineradora de residuos sólidos urbanos al tratarse de materiales peligrosos se vierten en depósitos de seguridad o vertederos de residuos peligrosos.

## **6.- NORMATIVA TÉCNICA**

### **España**

- ORDEN de 15 de febrero de 1996, de la Consejería de Medio Ambiente del Gobierno de la Generalitat de Cataluña sobre valorización de escorias.
- ORDEN FOM/891/2004 (BOE de 6 de abril de 2004) por la que se han actualizado determinados artículos del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3).

### **Francia**

- Syndicat National du Traitement de la Valorisation des Dechets Urbains et Assimiles (1995): Guide méthodologique pour l'échantillonnage des mâchefers d'usine d'incineration d'ordures ménagères á la production sur flux. [www.fg3.fr/doc](http://www.fg3.fr/doc)
- Syndicat National du Traitement de la Valorisation des Dechets Urbains et Assimiles (1996): Guide méthodologique pour l'échantillonnage des mâchefers d'usine d'incineration d'ordures ménagères après maturation. [www.fg3.fr/doc](http://www.fg3.fr/doc)

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.3	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>ESCORIAS Y CENIZAS DE INCINERADORA DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU)</b>		

- SETRA-CSTR (1997): Note d'information CD 103 sur l'utilisation des mâchefers d'incineration d'ordures ménagères en technique routière. /Catalogue.setra.equipement.gov.fr/

## 7.- REFERENCIAS

- [1] MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE. "II Plan Nacional de Residuos Urbanos 2008-2015". Plan Nacional Integrado de Residuos (PNIR), 2008-2015, Versión Preliminar. 27 de noviembre de 2007.
- [2] IADE (INSTITUTO PARA LA DIVERSIFICACIÓN Y AHORRO DE ENERGÍA). Incineración de residuos sólidos urbanos. Manuales de Energías Renovables, Biblioteca Cinco Días. 1996.
- [3] TIRME, Departamento de Medio Ambiente y Calidad. "Reutilización de subproductos de la incineración de residuos urbanos en la construcción: escorias y cenizas". Octubre, 2000.
- [4] CHIMENOS, J.M.; FERNÁNDEZ, A.I.; SEGARRA, M.; FERNÁNDEZ, M.A.; ESPIELL, F. "Escorias de Incineración de RSU: una Nueva Fuente de Materiales", Residuos, nº 51, p. 82-88. 1999.
- [5] BERG, E.R.; NEAL, J.A. "Concrete Masonry Unit Mix Designs Using Municipal Solid Waste Bottom Ash", ACI Materials Journal, p. 470-479. Julio-Agosto, 1998.
- [6] ALAEJOS, P. "Estudio de la utilización de cenizas de plantas incineradoras de residuos urbanos como adición al hormigón", Laboratorio Central de Estructuras y Materiales, Informe Técnico para la Comunidad de Madrid. CLAVE CEDEX: 11-396-001. Madrid, 2000.
- [7] PERA, J.; COUTAZ, L.; AMBROISE, J.; CHABABBET, M. "Use of Incinerator Bottom Ash in Concrete", Cement and Concrete Research, Vol. 27, nº 1, p. 1-5. 1997.
- [8] HAMERNIK, J.D.; FRANTZ, G.C. "Physical and Chemical Properties of Municipal Solid Waste Fly Ash", ACI Materials Journal, p. 294-301. Mayo-Junio, 1991.
- [9] "Sustainable Construction: Use of incinerator ash", Proceedings of the International Symposium organized by the Concrete Technology Unit, University of Dundee, UK on 20-21 March 2000.
- [10] HALLIDAY, J.E.; DYER, T.D.; DHIR, R.K. "Use of Incinerator Fly Ash as a Pozzolan Activator", Ref. 9, p.447-456.
- [11] THIJS, M. "Empleo de cenizas volantes, escorias y residuos de incineradores urbanos en Europa", Programa SPRINT, Carreteras, nº 69. 1994.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.3	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>ESCORIAS Y CENIZAS DE INCINERADORA DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU)</b>		

- [12] NILSSON, K. "Tratamiento de residuos procedentes de la combustión", Residuos N° 35, p.32-37.
- [13] GOUMANS, J.J.J.M.; VAN DER SLOOT, H.A.; AALBERS, TH.G. "Waste materials in construction", Proceedings of the International Conference on Environmental Implications of Construction with Waste Materials. Maastricht, The Netherlands, November, 2000.
- [14] PFRANG-STOTZ, G.; REICHEL, J.; ROOS, R. "Chemical-Mineralogical Valuation of the Leachate Potential of Municipal Solid Waste Incineration (MSWI) Bottom Ashes", Ref. 13, p 975-983
- [15] GOUMANS, J.J.J.M.; VAN DER SLOOT, H.A.; AALBERS, TH.G. "Waste materials in construction: Putting Theory into Practice", Proceedings of the International Conference on the Environmental and Technical Implications of Construction with Alternative Materials, WASCOM 97. Houthem St. Gerlach, The Netherlands, 4-6 June, 1997.
- [16] MULDER, E.; ZIJLSTRA, R.K. "Pre-treatment of MSWI fly ash for useful application", Ref. 15, p 67-72.
- [17] FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (FHWA). "User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction". 1997.
- [18] COLLINS, R.J.; MILLER R.H. "Technology for use of Incinerator Residue as Highway Material", Federal Highway Administration, report no. FHWA/RD - 77/151. 1977.
- [19] HAYNES, J.; LEDBETTER, W.B. "Incinerator Residue in bituminous Case Construction", Federal Highway Administration Report No. FHWA-RD-76-12. Washington, D.C. 1975.
- [20] COLLINS, R.J.; CIESIELSKY, S.K. "Recycling and use of waste materials and sub-products in the highway construction", NCHRP Synthesis of Highway Practice 199, Transportation Research Board. Washington, DC. 1994.
- [21] CHANDLER ET AL. "An International Perspective on Characterisation and Management of Residues from Municipal solid Waste Incineration", Summary Report, International Energy Agency. 1994.
- [22] MACÍAS GARCÍA, M<sup>a</sup>A. "Viabilidad del Empleo de Cenizas de incineración en los Materiales de Construcción", Construcción y Medio Ambiente: XIV Curso de Estudios Mayores de la Construcción CCEMCO 98, Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja.
- [23] DYER, T.D.; DHIR, R.K.; COLLIER, T.C. "Precast Concrete Products Produced Using Incinerator Bottom Ash". Ref. 9, p.341-353.
- [24] GOUMANS, J.J.J.M.; VAN DER SLOOT, H.A.; AALBERS, TH.G. "Waste materials in construction", Proceedings of the International Conference on Environmental Implications of Construction with Waste Materials. Maastricht, The Netherlands,

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.3	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>ESCORIAS Y CENIZAS DE INCINERADORA DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU)</b>		

November, 1991.

- [25] WAINWRIGHT, P.J.; ROBERY, P. "Production and properties of sintered incinerator residues as aggregate for concrete", Ref. 24, p.425-432.
- [26] WAINWRIGHT, P.J.; BONI, S.P.K. "Some properties of concrete containing sintered domestic refuse as a coarse aggregate", Magazine of Concrete Research, Vol. 35, N°123, p. 75-85. Junio, 1983.
- [27] MUJAHID, T.; CHANG. W.F. "Strength Properties of Cement-Stabilized Municipal Solid Waste Incinerator Ash Masonry Bricks", ACI Materials Journal, p. 256-263. Mayo-Junio, 1994.
- [28] HAMERNIK, J.D.; FRANTZ, G.C. "Strength of Concrete Containing Municipal Solid Waste Fly Ash", ACI Materials Journal, p. 508-517. Septiembre-Octubre, 1991.
- [29] BORN, J.G.P.; VEELTURF, R.A.L. "MSWI Residues en the Netherlands Putting Policy into Practice", Ref. 15, p.841-850.
- [30] SHOW, K.Y.; TAY, J.H.; CHEONG, H.K. "Reuse of incinerator ash. Current and future trends", Ref. 9, p.467-478.
- [31] "Case Studies for MSW Ash Residue Re-Use Applications". [http://www.ieabioenergytask36.org/Publications/1998-2001%20Task%2023/Publications/The\\_Management\\_of\\_Residues\\_from\\_Thermal\\_Processes\\_Summary.PDF](http://www.ieabioenergytask36.org/Publications/1998-2001%20Task%2023/Publications/The_Management_of_Residues_from_Thermal_Processes_Summary.PDF)
- [32] Información facilitada por ELÍAS, X de la Borsa de Subproductes de Catalunya.
- [33] ELÍAS, X.: "Reciclaje de residuos industriales: Aplicación a la Fabricación de Materiales para la Construcción". Editorial Diaz de Santos. 2005. ISBN: 84-7978-437-7
- [34] ELÍAS, X.: "Tratamiento y valorización energética de residuos". Editorial Diaz de Santos. 2005.
- [35] ALAEJOS, P.; LEIRO, A.: "Utilización de cenizas de incineradora para la fabricación de hormigones celulares". Cemento y Hormigón. pp42-52, febrero 2002.
- [36] FRASSI DE SOUZA, K.: "Utilización de cenizas de plantas de incineradoras de residuos sólidos urbanos como material constituyente de hormigones de relleno". Tesis doctoral E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos. Madrid. 2005.
- [37] MARÍA IZQUIERDO.: "Valorització d'escòries d'incineració de residus sòlids urbans en capes granulars del ferm. Aplicació al tram experimental de Tagamanent". Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Catalunya. 2005.
- [38] BERG, E.R; NEAL. J.A.: "Concrete Masonry Unit Mix Designs Using Municipal Solid Waste Bottom Ash", ACI Materials Journal, p. 470-479. Julio-Agosto, 1998.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.3	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>ESCORIAS Y CENIZAS DE INCINERADORA DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU)</b>		

- [39] AMPADU, K.O.; TORII, K.: "Characterization of ecocement pastes and mortars produced from incinerated ashes". Cement and Concrete Research, Vol. 31, p. 431-436. 2001.
- [40] LIN, K.L.; WANG, K.S.: "Hydraulic activity of cement mixed with slag from vitrified Solid Waste Incinerator Fly Ash". Waste Management and Research, Vol.21, No.6, pp 567-574, 2003.
- [41] POLETTINI A., POMI R., CACANI G.: "The effect of Na and Ca salts on MSWI bottom ash activation for reuse as a puzzolanic admixture". Resources, Conservation and Recycling. Vol.43, n°4, pp. 403-418, 2005.
- [42] ASTRUP, T., "Treatment and utilization of MSWI bottom ashes in Denmark", Environmental aspects of utilisation of MSWI bottom ash as sub-base in road construction, 6<sup>th</sup> Int Conf on the Environmental and Technical Implications of Construction with Alternative Materials. Science and Engineering of Recycling for Environmental Protection, WASCON, 2006

## **8. ENTIDADES DE CONTACTO**

- AEVERSU (Asociación Empresarial de Valorización Energética de Residuos Sólidos Urbanos)  
c/ Cañada Real de medinas s/n  
28051 Madrid  
Tel. 91 7652273

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.4	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>LODOS DE DEPURADORAS</b>		
Nombre en inglés: Sewage Sludge		



LODOS DE DEPURADORA

### 1.- ORIGEN

En Europa se depuran aproximadamente 40 kg de agua por habitante al año, siendo en España en el año 2004 de 27 kg por habitante al año.<sup>(1)(2)</sup>

La tecnología más común para el tratamiento de aguas residuales municipales, es el proceso de lodos activos, un proceso biológico que genera grandes cantidades de lodos orgánicos. Estos lodos reciben el nombre común de lodos de EDAR (estación depuradora de aguas residuales).

En este proceso, la materia orgánica de las aguas residuales se oxida y se transforma en biomasa microbiana, mediante una amplia gama de organismos. El proceso se lleva a cabo generalmente en un gran tanque aireado, donde las aguas residuales y los microorganismos permanecen en contacto durante algunas horas. La mezcla fluye después a un tanque de decantación donde los coágulos microbianos caen al fondo y el agua residual tratada fluye por el desagüe. Los coágulos acumulados en el fondo del tanque se extraen después en forma de lodo: una parte se recicla al tanque de aireación, para mantener el proceso, mientras que el exceso de lodo, producido por el crecimiento microbiano, debe ser eliminado.

En la mayoría de los casos, el proceso va precedido de una decantación primaria, que también genera lodos orgánicos, aunque de naturaleza ligeramente diferente. Estos lodos primarios se deben eliminar conjuntamente con el exceso de lodos secundarios. La decantación primaria produce lodos que se bombean a un espesador, donde se concentran hasta un 7%. Por otra parte, la decantación secundaria con la adición del polielectrolito permite separar los flóculos de la materia orgánica de la inorgánica al conducir los lodos al espesador, que son concentrados al 4,8% aproximadamente <sup>(3)</sup>.

Los lodos separados del agua tratada en la última etapa del proceso, contienen más del 90% de agua y son altamente biodegradables, para facilitar el manejo y la eliminación de los lodos se

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.4	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>LODOS DE DEPURADORAS</b>		

suelen aplicar procesos de desecación. La deshidratación se suele realizar con procesos mecánicos ayudado de: una filtración al vacío, una centrífuga de camisa, una centrífuga de cesta, unos filtros de banda, unos filtros de prensa o unos filtros prensa de placa de volumen variable. La concentración de sólidos conseguida por la deshidratación es aproximadamente del 30%. En el tratamiento de decantación secundaria todos los lodos sufren una depuración biológica <sup>(3)(4)</sup>.

Otro factor importante es que la calidad de los lodos no es constante, varía según las características de diseño de cada planta, el tipo de aguas residuales tratadas, las industrias que las producen, la época del año, la climatología, la situación de la planta, etc.

Actualmente se pueden considerar las siguientes vías de valorización de los lodos:

- Reciclado de los nutrientes de los LD en agricultura.
- Valorización energética mediante digestión anaerobia.

Asimismo, las principales vías de eliminación de estos residuos son:

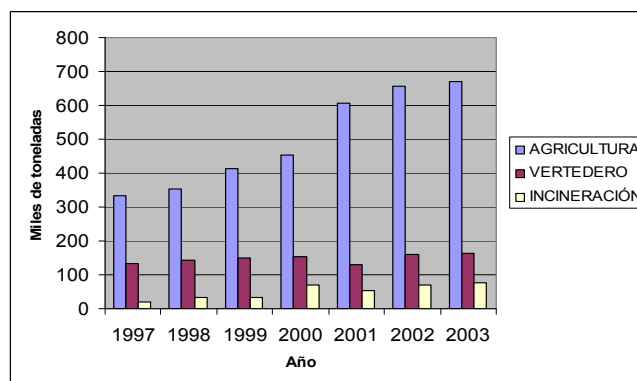
- Transporte a vertederos
- Incineración

## **2.- VOLUMEN Y DISTRIBUCIÓN**

El volumen de lodos de depuradoras (LD) generados en el año 2003 fue del orden de 1.012.000 T. de materia seca, y teniendo en cuenta su esperado crecimiento, se estima que en el año 2005 la cantidad de lodos generados podría situarse en torno a 1.300.000 T. de materia seca.

Se estima en un 22 por 100 aproximadamente los LD se depositan en vertedero, un 51 por 100 se destina a usos agrícolas y un 4 por 100 son incinerados. Se constata un gran aumento en la generación de este tipo de residuos como consecuencia del ambicioso programa de depuración de aguas urbanas llevado a cabo en los últimos años. De 1997 a 2003 ha habido un aumento en la producción de lodos del 47% <sup>(5)(6)</sup>.

La siguiente figura muestra la evolución de los usos de los miles de toneladas de lodos de EDAR (materia seca), en España <sup>(6)</sup>.



**Figura 1:** Evolución del destino de los lodos



<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.4	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>LODOS DE DEPURADORAS</b>		

También se estudia la posibilidad y en algunos lugares ya se está aplicando, de la utilización de LD, previamente desecados térmicamente, como combustible alternativo en las industrias tanto del cemento como de la cerámica, y así los residuos que no se pueden reciclar o reutilizar son objeto de una valorización energética en dichos hornos, aunque hay que destacar que los lodos poseen un bajo poder calorífico.

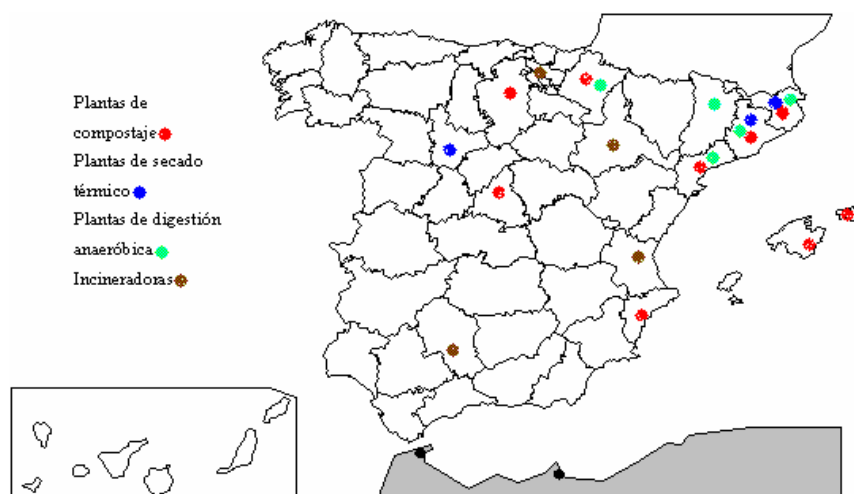
En lo referente a los equipamientos e infraestructuras existentes en la actualidad en España para la gestión de los LD, se dispone de plantas de compostaje en Reus, Vilaseca-Salou, Blanes, Manresa, Teia, Olot (Cataluña); Burgos (Castilla-León); Ciutatella, Felanitx, Sa Pobla y Ariany (Illes Balears); Aspe y Pinedo (Valencia); Madrid (2) y Guadalix de la Sierra (Madrid), y Pamplona y Estella (Navarra). La capacidad total de tratamiento de estas plantas es del orden de 560.000-600.000 toneladas/año de lodos deshidratados. También existen algunas plantas de iniciativa privada que utilizan lodos como una materia prima para producir compost <sup>(5)(7)</sup>.

Por otra parte, existen plantas de secado térmico en Banyoles, Granollers, Montornés del Vallés y Sabadell (Cataluña), y Valladolid (Castilla-León), y están previstas nuevas plantas en Asturias, Mataró y Rubí (Cataluña); León (Castilla-León); Valencia (Valencia); bahía de Mallorca (Illes Balears), y Madrid y Butarque (Madrid). Se estima en unas 680.000-700.000 toneladas/año de lodos deshidratados la capacidad total de tratamiento en España <sup>(5)</sup>.

En lo que respecta a la digestión anaeróbica o biometización existen ya algunas iniciativas en marcha en Navarra (Pamplona, Estella, Olite-Tafalla), en Cataluña (Reus, Sabadell, Girona, Lleida) y otras en proyecto en Andalucía (Jerez) y La Rioja (Logroño, Haro) <sup>(5)</sup>.

Se dispone de incineradoras de LD en Córdoba (Andalucía), Zaragoza (Aragón), Pinedo (Valencia) y Galindo (País Vasco). La capacidad total de incineración de estas plantas es del orden de 200.000 toneladas/año. de lodos deshidratados <sup>(5)</sup>.

El siguiente mapa muestra los lugares con plantas incineradoras de LD en España:



**Figura 2:** Plantas en España

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.4	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>LODOS DE DEPURADORAS</b>		

En la siguiente tabla se muestra la estimación del Plan nacional de lodos 2001-2006 para la generación de lodos y los posibles destinos, tanto en España como en Europa <sup>(5)</sup>, y se comprueba, comparándolo con los datos reales, que la producción de lodos total y la cantidad incinerada es similar a la esperada, la cantidad destinada a agricultura es superior a la esperada y la destinada a vertedero es menor que la esperada, lo que demuestra que se han cumplido las estimaciones del Plan.

		Producción de lodos		Reciclado		Vertedero		Vertido al mar		Incineración		Otros
		Miles T.	%	Miles T.	%	Miles T.	%	Miles T.	%	Miles T.	%	Miles T.
Total España	1998	787	12	410	52	268	34	57	7	52	7	0
	2005	1.088	13	589	54	367	34	57	5	75	7	0
Total Unión Europea	1998	6.588	100	3.447	52	1.762	27	297	5	1.248	19	193
	2005	8.331	100	4.536	54	1.554	19	57	1	1.986	24	198

**Tabla 1:** Estimaciones de generación, uso y gestión de los lodos, según el plan 2001-2006

### 3.- VALORIZACIÓN

#### 3.1. PROPIEDADES

El lodo activo tiende a acumular una serie de metales y compuestos orgánicos. Esta acumulación es una ventaja cuando se considera el grado de depuración obtenido del agua residual tratada, pero hace que la calidad del lodo dependa, fundamentalmente, de tres grupos de contaminantes principales: metales, contaminantes orgánicos y agentes patógenos <sup>(17)(54)</sup>.

#### 3.2. PROCESAMIENTO DE SECADO O DESHIDRATACIÓN

Para facilitar el manejo de los lodos se suele proceder a su secado o deshidratación.

En el caso de la deshidratación, se emplean unos filtros prensa obteniéndose una concentración sólida total del 20-25%.

En un túnel de secado térmico la energía necesaria para el secado se puede aportar de varias formas entre las cuales se encuentran el empleo de bombas de calor y el aprovechamiento del calor producido en sistemas de cogeneración. Con el túnel de secado se reduce el volumen de lodos en un 65% aproximadamente.

En algunos casos, se puede considerar el balnace energético como positivo cuando se emplea la energía procedente de la combustión del biogás y el excedente se transforma en energía eléctrica que se exporta a la red <sup>(53)</sup>.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.4	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>LODOS DE DEPURADORAS</b>		

La reducción térmica de los lodos conlleva unas ventajas entre las que destacan <sup>(1)(4)(8)</sup>:

- una máxima reducción de volumen,
- una destrucción de patógenos y compuestos tóxicos,
- una posible recuperación de energía.

Dicho tratamiento también conlleva desventajas entre las que se encuentran:

- un elevado coste de inversión y explotación,
- unas emisiones de aire y cenizas,
- una evacuación adecuada de las cenizas

También existe otra posibilidad de secado del lodo si se dispone de terreno, es el secado de lodos utilizando la energía solar. Este es un método que está utilizándose en algunos lugares de Francia y da resultados muy favorables. Según información facilitada por el Ministerio de Medio Ambiente, en España actualmente se está realizando un proyecto de I+D+i en Sevilla. El secado solar es un método utilizado para secar hasta la cantidad que se requiera los lodos deshidratados, siendo necesario mayor espacio cuanto más se quiera secar el lodo. Tras el secado, el lodo se puede valorizar en la agricultura, incinerar, verter o compostar. En comparación con los métodos tradicionales de secado este método es mucho más económico y ecológico <sup>(8)</sup>.

### 3.2.1. Propiedades de los lodos secos

#### Propiedades físicas

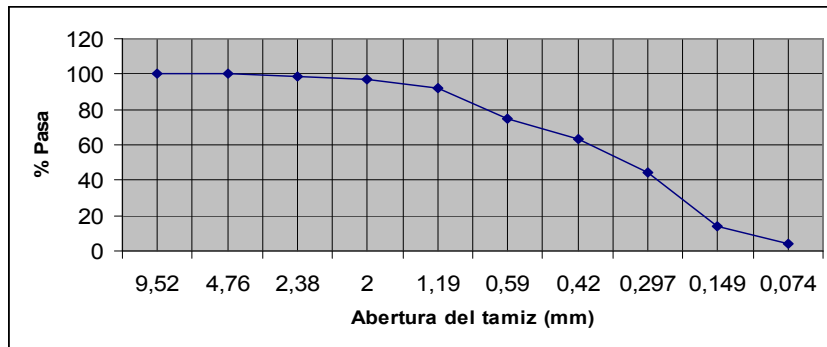
El lodo seco tiene una densidad de 0,5-0,6 T/m<sup>3</sup> y presenta un tamaño de grano fino. A continuación se describen las principales características físicas de los lodos <sup>(9)</sup>:

	Lodos secos
Peso específico	1,64 – 1,72
Humedad (%)	50,0 – 70,0
Densidad (T/m <sup>3</sup> )	0,5-0,6
Pérdida al fuego (%)	59,2 – 60,8
Valor de pH	8,10 – 5,50
Residuo del tamiz 180 μm (%)	4-5
Residuo del tamiz 90 μm (%)	98-99,6

**Tabla 2:** Propiedades físicas de los lodos secos

La siguiente figura muestra la granulometría del lodo de una planta de España <sup>(10)</sup>.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.4	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>LODOS DE DEPURADORAS</b>		



**Figura 3:** Granulometría de un lodo

### Propiedades químicas

La composición química de los lodos depende de la naturaleza del agua residual y de los productos químicos usados en el tratamiento de depuración de esta agua. Por ello, puede haber grandes variaciones de unas fuentes a otras.

La caracterización química de los lodos se presenta en la siguiente tabla <sup>(11)</sup>:

	Lodos secos
Ca (%)	11-13
Si (%)	1,3-2,1
Fe (%)	1,7-3,2
Mg (%)	0,7-0,9
Na (%)	0,1-0,22
K (%)	0,1-0,17
P (%)	0,8-1,2
Zn (%)	0,1-0,3
Cu (ppm)	90-333
Pb (ppm)	20-114
As (ppm)	1-2
Cd (ppm)	2-7
Hg (ppm)	1-3
Cr (ppm)	88-114
Ni (ppm)	34-42
Se (ppm)	<1

**Tabla 3:** Propiedades químicas de los lodos

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.4	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>LODOS DE DEPURADORAS</b>		

### 3.3. PROCESAMIENTO DE INCINERACIÓN

La incineración es el sistema más caro pero reduce el volumen del fango entre un 70% y un 90%, el cual, una vez inerte se puede depositar en vertederos controlados, añadir a masas cerámicas o vitrificar. Este sistema es muy utilizado en países como Francia, Austria, Dinamarca y Suiza.

Existen diferentes procesos de incineración, que dependen del horno donde se realice ésta, así se encuentran los hornos de lecho fluidificado, de pisos, mixtos y rotativos.

La incineración en hornos de pisos múltiples se utiliza para convertir el lodo deshidratado en cenizas inertes. Este tipo de incineración es de gran complejidad con lo cual sólo se suele utilizar en grandes plantas. Las temperaturas más altas en este tipo de horno se consiguen en el piso intermedio donde se quema el lodo y el combustible auxiliar para calentar el horno y mantener el proceso de combustión. El lodo que se quema debe tener un contenido en sólidos superior al 15% y si contiene entre un 15% y un 30%, suele ser necesario añadir un combustible auxiliar <sup>(4)</sup>.

El horno más utilizado en la incineración es el horno de lecho fluidificado que es un cilindro vertical de acero revestido con un material refractario. El horno contiene un lecho de arena y orificios para el mantenimiento de la combustión. Las dimensiones del cilindro varían entre 2,5 y 7,5 metros de diámetro. Antes de introducir el fango en el horno debe haber una temperatura entre 700 y 800°C. El lodo previamente secado se inyecta y se incinera a una temperatura que puede variar entre los 650°C y los 980°C. La evaporación del agua y la combustión de los sólidos del lodo se produce rápidamente. Las cenizas antes de salir del horno se someten normalmente a un lavado <sup>(4)</sup>.

#### 3.3.1. Propiedades de las cenizas

Las cenizas obtenidas tras la incineración de los LD, no contienen ni microorganismos ni materia orgánica, pero los metales pesados (el cinc, níquel, manganeso, ...) están más concentrados que en los LD debido a la reducción de volumen de estos tras la incineración. En cambio hay otros metales como el mercurio, el cromo y el plomo que se volatilizan tras la incineración <sup>(3)</sup>.

Las cenizas procedentes de la incineración de lodos contienen principalmente cuarzo y en menor medida mica, vermiculita y esmectita (colapsada).

#### Propiedades físicas

La cenizas presentan una granulometría continua y una densidad próxima a 0,85 g/cm<sup>3</sup>. El peso específico de las partículas está comprendido entre 2,44-2,96. Además presentan un gran porcentaje de finos menores de 0,075 mm (entre un 40 y un 90 % en algunas cenizas) y una forma muy irregular.

En la siguiente tabla se resumen las principales propiedades físicas de estos residuos <sup>(9)(12)(13)(14)</sup>:

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.4	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>LODOS DE DEPURADORAS</b>		

	Cenizas
Peso específico	2,44 – 2,96
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	0,90 – 1,10
Humedad (%)	0,5 – 28
Porosidad (%)	63,5 – 69,2
Absorción de agua (%)	7,80 – 9,60
Pérdida al fuego	3,60 - 5,20
Valor de pH <sup>(2)</sup>	8,97 – 9,03

**Tabla 4:** Propiedades físicas de las cenizas

### Propiedades químicas

La caracterización química de las cenizas procedentes de la incineración de los lodos de dos estaciones depuradoras en nuestro país aparece reflejada en la siguiente tabla, junto con los datos obtenidos de otras fuentes. La gran diferencia en cuanto a la humedad es debida al agua que se puede añadir a las cenizas para su mejor manejo.

Parámetros (%)	Cenizas de lodos de depuradora		
	Cenizas españolas <sup>(12)(15)</sup>		Otras fuentes <sup>(16)</sup>
Humedad	0,5	50	0,28
P. Fuego	5,1	8,8	1,4
R. Insoluble	16,1	-	-
SO <sub>3</sub>	12,4	1,8	0,01 – 3,4
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,4	3,2	2,6 – 24,4
SiO <sub>2</sub>	20,8	45,3	14,4 – 57,7
CaO	31,3	19,3	8,9 – 36,9
MgO	2,6	2,0	0,8 – 2,2
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14,9	15,0	4,6 – 22,1
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	6,70	0	3,9 – 15,4
K <sub>2</sub> O	0	1,6	-

**Tabla 5:** Propiedades químicas de las cenizas

### 3.4. OTROS TRATAMIENTOS APLICADOS A LOS LODOS

Otro de los posibles tratamientos térmicos que se le da al lodo es el de pirólisis, actualmente en fase de experimentación en nuestro país. Es un tratamiento en el que se realiza un calentamiento en ausencia de oxígeno que permite una división de las sustancias orgánicas del lodo debido a las reacciones de choque térmico y condensación. Este proceso de pirólisis es altamente endotérmico, al contrario que los procesos de combustión<sup>(4)</sup>.

Otro tratamiento es el de gasificación, que se define como la conversión termoquímica del lodo en un gas portador de energía por medio de una oxidación parcial a elevadas temperaturas<sup>(17)(18)</sup>.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.4	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>LODOS DE DEPURADORAS</b>		

Tanto en la gasificación como en la pirólisis se producen gases no condensables, gases condensables, un residuo carbonoso en la pirólisis y un residuo de cenizas en la gasificación. Los gases producidos y el residuo carbonoso pueden servir como combustibles para mantener el proceso de incineración.

Para la aplicación de los lodos o sus cenizas es necesario en muchas ocasiones aplicarle un tratamiento, que puede ser de: ceramización, absorción, adsorción, vitrificación o estabilización y solidificación. En la encapsulación, el elemento dañino que se encuentra encapsulado puede ser liberado si la red que envuelve al elemento es eliminada. El elemento contaminante quedará encapsulado o ceramizado dependiendo de las materias primas y del tamaño del grano. En cambio en la vitrificación las uniones de los elementos son debidas a compuestos químicos. También para desecar los lodos se utilizan mezclas a base de cal pero estas no garantizan la inertización del producto. Otros tratamientos son con técnicas termoplásticas o con polímeros orgánicos, pero así como con la cal, los resultados no son ni seguros ni económicos <sup>(1)(19)(20)</sup>.

### 3.5. LIXIVIACIÓN

La lixiviación se presenta cuando un material, no protegido, se pone en contacto con disoluciones acuosas o agua y éstas disuelven compuestos del material. Tras la lixiviación disminuyen la masa y las resistencias mecánicas entre otras cualidades y aumenta la porosidad. El agua de lluvia presenta una gran capacidad de lixiviación en los lodos y puede disolver la materia orgánica y los metales pesados. La lixiviación depende además de la naturaleza del residuo, de la forma de éste, del lugar donde se encuentre (siendo importante el pH del medio), de la cantidad de residuo que se acumule, etc.

Debido a la variación de las cualidades de los lodos según su procedencia hay que tener siempre en cuenta que se debe estudiar el lodo a tratar sin tener que coincidir exactamente sus cualidades con las de otros lodos. Así por ejemplo, analizando un lodo seco de una depuradora particular de España, se concluyó que no era un residuo inerte sino que era un residuo peligroso debido a su concentración de níquel en el lixiviado. Además de residuos inertes y peligrosos también se encuentran los no peligrosos, y se incluirán en una categoría u otra dependiendo de la legislación que haya respecto a su composición química <sup>(10)(21)(22)</sup>.

Algunos estudios constatan que el uso de los lodos y sus derivados con una matriz cementante adecuada hace que esta última dé estabilidad ante la lixiviación de los primeros, lo que implica que no haga falta darle al lodo y sus derivados ningún tratamiento de estabilización que aumentaría el coste del producto <sup>(23)(24)</sup>.

### 3.6. APLICACIONES

Existen diversas posibilidades de utilización tanto de los lodos como de las cenizas o los pellets en el campo de la construcción, aunque la mayoría de ellas se encuentran en fase de investigación en laboratorio.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.4	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>LODOS DE DEPURADORAS</b>		

### 3.6.1. Utilización de los lodos

#### Fabricación de ladrillos <sup>(9)(25)(26)(27)</sup>

Existen estudios sobre la valorización de fangos de EDAR en la fabricación de ladrillos. La introducción de fangos en el proceso resulta muy atractiva porque determinados materiales cerámicos disponen de gran capacidad de inertización de metales pesados.

Durante la cocción, los compuestos orgánicos del fango: celulosa, lignina, grasas, microorganismos patógenos, etc. se destruyen y en su lugar se crean unos poros cerrados que darán lugar a sus propiedades de aislamiento térmico. Los componentes inorgánicos (arcillas, tierras, metales pesados, etc.), quedan insertados en la matriz vítrea del cuerpo cerámico y, por tanto, inmovilizados.

Los costes de fabricación de un producto de cerámica estructural se pueden desglosar en un 25% correspondiente a la materia prima, un 25% de costes energéticos y un 50% de amortización y costes laborales<sup>(25)</sup>. En general la introducción de fangos en matrices cerámicas tiene aspectos positivos energéticamente, pudiéndose apuntar los siguientes:

- Importante ahorro energético durante la cocción cerámica en función de la presencia de materia combustible en la matriz cerámica aportada por los fangos (en cualquier caso, el balance total energético debe tener en cuenta también el proceso de secado).
- Ahorro del consumo de agua por la aportación de los fangos (contienen un promedio del 70% de humedad).
- Poder calorífico de los fangos, que aproximadamente se sitúa en las 3.400 kcal/kg.

El máximo porcentaje de lodos que se podría mezclar con la arcilla cerámica se sitúa entorno al 40%, aunque con esta cantidad, la adherencia de la mezcla es pobre y la textura superficial del ladrillo irregular. Así, las proporciones óptimas están entre el 10% y el 20%.

Variación de las propiedades de los ladrillos <sup>(9)</sup> (% de la mezcla de referencia sin lodos)			
PROPIEDADES		Incorporación del 10% de fangos	Incorporación del 40% de fangos
Peso específico		97%	83%
Retracción (Contracción)	Antes de la cocción	105%	100%
	Después de la cocción	102%	130%
Pérdida al fuego		200%	400%
Resistencia a compresión		70%	43%

**Tabla 6:** Variación de las propiedades de los ladrillos

La absorción de agua aumenta al aumentar el porcentaje de lodo, indicando una menor durabilidad.



<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.4	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>LODOS DE DEPURADORAS</b>		

Hay una patente de ladrillos (biobrick) que incorpora lodos de depuradoras. En Estados Unidos estos ladrillos se comercializan y ya se han llevado a cabo varios proyectos con ellos <sup>(26)</sup>.

Estos ladrillos tienen un porcentaje máximo de lodos de 25-30% y cumplen con todos los requisitos de las normas ASTM (American Society for Testing and Materials). Además de las propiedades técnicas, presentan un acabado bueno. Su color depende de la composición de los lodos, en función de la presencia en alto porcentaje de ciertos componentes como calcio, hierro, aluminio, cloro o sulfatos.

La siguiente tabla refleja las propiedades de este tipo de ladrillo (biobrick) y su comparación con ladrillos que no incorporan los lodos <sup>(25)(26)</sup>:

	Porcentaje de lodos (30%)	Porcentaje respecto a ladrillos sin lodos
Acabado	Excelente	-
Resistencia a compresión (MPa)	43	76%
Absorción (24 h.)(%)	6,1	120%
Densidad aparente (g/cm <sup>3</sup> )	0,6-0,9	-
Conductividad térmica (w/m <sup>o</sup> k)	0,36-0,23	-

**Tabla 7:** Comparativa de ladrillos (Convencionales-Con lodo)

Existe y se utiliza otro proyecto patentado llamado Ecobrick que pretende ceramizar una mezcla de lodo y arcilla con un residuo forestal. Al añadir el residuo forestal se permite trabajar con una concentración mayor de lodo debido a que el residuo forestal absorbe humedad. El lodo está prensado y húmedo sin necesidad de ningún otro tipo de tratamiento que encarecería el proceso. Las características del material obtenido en el proceso del Ecobrick son: una baja densidad debido a la gran porosidad creada por el residuo forestal y la materia orgánica del lodo y una alta capacidad de aislamiento térmico y acústico, sin influir de una manera importante en las resistencias siendo apto para cerramientos no estructurales. La economía de dicho producto se debe a que el secado y la cocción suelen consumir menos energía que el de una pieza estándar equivalente y además, debido a su baja densidad, los costes de transporte serán menores así como su puesta en obra <sup>(19)</sup>.

También se ha realizado algún estudio sobre la fabricación de ladrillos de LD, mediante infiltración con dióxido de carbono supercrítico. Al utilizar el LD con cal y arena, inicialmente se sometió al lodo a una quema a 573 K en un horno de convección natural y luego se mezcló con los demás materiales. Los materiales se moldearon y se sometieron a un prensado a 7 MPa para la fabricación de los ladrillos y tras ello se introdujo por infiltración el dióxido de carbono supercrítico. Esto llevó a la observación de que la carbonatación avanza hacia el centro del ladrillo formando frentes de carbonatación total y produciendo núcleos parcialmente carbonatados en los que la cal se encuentra rodeada por carbonato de calcio que actúa como un impermeabilizante al paso del dióxido de carbono supercrítico. Analizando las propiedades mecánicas del producto se observó que los ladrillos con una cantidad de cal superior al 20%, que son infiltrados durante 20 minutos a

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.4	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>LODOS DE DEPURADORAS</b>		

una presión de 6.86 MPa, pueden lograr conversiones de cal mayores al 70% y resistencias a compresión superiores a 8 MPa<sup>(28)</sup>.

### **Fabricación de hormigón**

Se han realizado estudios sobre la utilización de lodos secos de depuradora en el hormigón, siendo uno de ellos realizado en una planta de España. En dicho estudio se realizaron muestras de adoquines con un 2% de lodo seco sobre peso de cemento y se determinaron las propiedades de dicho producto comparadas con el producto sin adición del lodo. El estudio concluyó que la adición de lodos de depuradoras al hormigón puede suponer una disminución de la porosidad y de la absorción y un aumento de la resistencia mecánica, lo que lleva a que la utilización de los lodos en los adoquines aumente la durabilidad de estos últimos<sup>(29)</sup>. En cuanto a los contaminantes lixiviables que presentaron los adoquines se comprobó que estaban por debajo de los exigidos por la norma holandesa NEN, para la adición de residuos en matrices cementantes, lo que indica que sean clasificados como productos inertes<sup>(23)(29)(30)(31)</sup>.

Hay una empresa española que está estudiando la creación de baldosas de hormigón con la adición de lodos de depuradoras. Dicha empresa tiene como objetivo utilizar los lodos para la construcción de elementos de baja resistencia en obras públicas. No puede utilizarse para vigas ni para piezas que soporten mucha presión porque tienen una reducida resistencia. Es útil para baldosas, para apantallamientos acústicos o quitamiedos y separaciones en autovías y carreteras. Sin embargo, esta patente aún no puede comercializarse porque se haya en periodo de investigación<sup>(32)</sup>.

Otros estudios han obtenido que las resistencias de hormigones con un 2,5-5% de lodo son similares a las de un hormigón convencional, pero si se añade hasta un 10% las resistencias disminuyen considerablemente, lo que hace pensar que la adición de lodo en grandes proporciones al hormigón sea impensable. Estos estudios también muestran que la lixiviación de los metales pesados es prácticamente inexistente en los hormigones con pequeñas cantidades de lodos, aunque la porosidad aumenta y la carbonatación también. Al añadir pequeñas cantidades de lodo al hormigón, éste podría utilizarse como hormigón de baja resistencia o como bases y subbases de carreteras<sup>(23)(30)(31)(33)</sup>.

### **Fabricación de lana de roca**

En Europa se realizan algunos proyectos para la protección del medio ambiente. En uno de esos proyectos, en los que colaboran países de toda Europa, Dinamarca está desarrollando nuevas técnicas para convertir las cenizas de lodo en lana de roca, que se emplea para aislamiento tanto acústico como del fuego<sup>(34)</sup>.

#### **3.6.2. Utilización de pellets**

### **Fabricación de cementos**

Se están realizando estudios sobre la utilización de los pellets de los LD ((PLD), que son partículas de lodo seco con un diámetro comprendido entre 1 y 5 milímetros) para la fabricación de cementos. Unos primeros resultados muestran que sería posible reducir el resto de materias primas, especialmente la adición de caliza<sup>(35)(36)</sup>.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.4	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>LODOS DE DEPURADORAS</b>		

### Fabricación de morteros

Los PLD tienen una alta proporción de materia orgánica, entre un 45 o 50%, una elevada porosidad y presencia de fibras, pero aún así se están realizando ensayos de aplicación en morteros. Las pruebas demuestran que la resistencia disminuye con la adición de los pellets pero se pueden conseguir resistencias aptas para un elevado número de aplicaciones. Gracias a la alcalinidad y la impermeabilidad de los morteros, los pellets permanecen estables ante la lixiviación, encontrándose una alta capacidad de retención por la matriz hidráulica, una escasa lixiviación de los elementos metálicos y una despreciable liberación de elementos tóxicos. Además, se han conseguido resistencias considerables añadiendo acelerantes al mortero<sup>(23)(35)</sup>.

### Fabricación de hormigón

También se estudia la posibilidad de sustituir parte de la arena que compone el hormigón por PLD. Estudios realizados han obtenido las siguientes conclusiones<sup>(35)(36)</sup>:

- Una relación agua/cemento baja (0.5) estabiliza adecuadamente los pellets.
- Los hormigones con 6% de sustitución de arena por pellets se comportan adecuadamente a flexión y compresión.
- La forma de los pellets no varía con el amasado.

Si se utilizara este compuesto para pavimentos o cualquier otro uso, lo conveniente e incluso necesario sería añadir un acelerante a la mezcla para contrarrestar los efectos negativos de la materia orgánica de los pellets<sup>(36)</sup>.

Con estas observaciones se encuentra que podría ser utilizada dicha adición a los hormigones.

### 3.6.3. Utilización de cenizas

#### Fabricación de ladrillos

A la vista de los estudios realizados en laboratorio por equipos españoles<sup>(15)</sup>, la adición óptima de cenizas de LD a la pasta cerámica podría ser aproximadamente un 5%. Los valores obtenidos con este porcentaje de cenizas cumplen las normas españolas que están establecidas sobre materiales cerámicos.

Según estos estudios, el principal efecto beneficioso que produce la incorporación de cenizas es el aumento de la porosidad del material, disminuyendo la densidad del mismo, lo que induce a pensar en una posible mejora del aislamiento térmico y acústico.

A su vez, esta adición produce una disminución de la resistencia y de la densidad de los ladrillos, y un aumento de la succión y la absorción. Como valores orientativos produce una reducción aproximada del 17% en la resistencia a compresión, un aumento de casi el 60% en la succión, aumento del 15% en la absorción y reducción del 5% en la densidad aparente.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.4	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>LODOS DE DEPURADORAS</b>		

Otros estudios<sup>(9)</sup> han obtenido resultados mucho más favorables pudiendo incorporar a los ladrillos hasta un 50% de cenizas. Con este porcentaje la densidad de los ladrillos aumenta ligeramente al aumentar el contenido de ceniza y la resistencia es elevada (casi el 80% con un 50% de cenizas).

Su alto valor de absorción podría indicar problemas de durabilidad. La siguiente tabla refleja las propiedades de los ladrillos en función del porcentaje de cenizas añadidas <sup>(9)</sup>:

	% cenizas					
	0%		20%		50%	
Peso específico	2,38	100%	2,46	103%	2,58	108%
Pérdida al fuego (%)	5,4	100%	4,8	89%	4,6	85%
Resistencia a compresión (N/mm <sup>2</sup> ) <sup>a</sup>	87,2	100%	80	92%	69,4	78%
Absorción (%)	0,03		0,11		1,70	

**Tabla 8:** Propiedades de ladrillos con cenizas

### Fabricación de morteros

Algunos estudios experimentales sobre la adición de CLD en morteros<sup>(37)(38)</sup>, indican el carácter puzolánico de las mismas ya que al mezclarse con el Ca(OH)<sub>2</sub> endurecen en pocos días<sup>(36)</sup>.

Durante los primeros días se observa una reducción tanto de la resistencia a compresión como a flexión del mortero, aunque a partir del sexto día esta tendencia cambia, pudiéndose llegar a alcanzar un incremento del 15% en la resistencia a compresión y hasta un 5% en la resistencia a flexión a los 28 días para una sustitución del 15% de cemento por cenizas<sup>(39)</sup>.

Como parte negativa hay que constatar una reducción de la trabajabilidad, aunque esta reducción se puede compensar utilizando un superfluidificante comercial. Esta reducción se puede deber a dos factores: la forma irregular de las partículas de cenizas que impide su comportamiento como lubricante sólido, y la absorción de agua sobre la superficie de las partículas de ceniza<sup>(35)(40)</sup>.

El producto obtenido tras añadir entre un 10 y un 30% de ceniza presenta una baja porosidad, similar a la del producto inicial, lo que puede indicar que la durabilidad de dichos productos es similar. Además se observa una alta capacidad de inmovilización de los contaminantes de las cenizas gracias a su encapsulación<sup>(39)</sup>.

Según los ensayos realizados se considera que la mezcla de cemento/CLD es estable, que la presencia de sulfatos por parte de las cenizas no desestabiliza la matriz cementante y que las probetas con cemento blanco no experimentan expansión con las cenizas<sup>(35)</sup>.

### Fabricación de hormigón <sup>(14)(41)</sup>

Existen estudios a nivel de laboratorio sobre la posibilidad de utilización de las cenizas procedentes de la incineración de lodos para sustituir una parte del árido fino en la fabricación de hormigón.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.4	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>LODOS DE DEPURADORAS</b>		

Los resultados obtenidos son bastante favorables, mientras que la resistencia a compresión sufre pocos cambios (hasta una disminución del 20% con un 30% de cenizas), la resistencia a tracción es algo menor con valores comprendidos entre  $0,1f_c$  y  $0,2f_c$ . La resistencia a flexión es en cualquiera de los casos superior al mínimo establecido por el American Concrete Institute (ACI).

Según estos estudios, aunque la ceniza es un material absorbente, no experimenta cambios de volumen (no son expansivas). El exceso de agua que incorporan produce, no obstante, una considerable reducción de la resistencia y se debería tener en cuenta en la dosificación del hormigón, aunque lo preferible es secar las cenizas antes de incorporarlas al hormigón.

Aunque el análisis químico de las cenizas demuestra la existencia de sulfatos y cloro, su concentración es tan reducida que no parece que puede tener efectos negativos en el hormigón. Los ensayos de lixiviación realizados tanto al hormigón fresco como al hormigón endurecido han demostrado que las cenizas son inertes.

En la siguiente tabla se muestran los efectos en la resistencia que produce la incorporación de distintas cantidades de cenizas en el hormigón<sup>(14)</sup> en valores absolutos y como relación con el hormigón de referencia (sin cenizas):

PROPIEDADES (28 días)	Características del hormigón con cenizas			
	Incorporación del 10% de cenizas		Incorporación del 30% de cenizas	
	N/mm <sup>2</sup>	%	N/mm <sup>2</sup>	%
Resistencia a compresión	24,3	85 %	22,6	80 %
Resistencia a tracción	2,5	78 %	2,3	72 %
Resistencia de adherencia	6,2	85 %	5,6	78 %
Resistencia a flexión	4,0	91 %	3,7	84 %

**Tabla 9:** Propiedades del hormigón con cenizas

### Fabricación de aglomerantes con cemento/ceniza volante (CV)/CLD

Las CV proceden de las centrales termoeléctricas del carbón y son residuos pulverulentos con carácter puzolánico que al dosificarlos con los morteros y hormigones del cemento Portland dan un aumento relativo de las resistencias mecánicas a largo plazo. Al añadir CV al cemento en cantidades superiores al 30% en masa se producen conglomerantes con bajas resistencias en los primeros 28 días de curado. Las CLD poseen una puzolanidad importante incrementando las resistencias mecánicas de los morteros entre los 7 y los 28 días. Así mismo, las CLD reducen la fluidez de los morteros mientras que las CV la mejoran<sup>(42)(43)</sup>.

Al realizar la mezcla de cemento, CV y CLD junto con la arena o grava, se observan los siguientes resultados<sup>(14, 34)</sup>:

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.4	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>LODOS DE DEPURADORAS</b>		

-La CLD utilizada en morteros y hormigones demanda una gran cantidad de agua pero si se utilizan mezclas de CV/CLD se disminuye dicha demanda de agua debido al efecto lubricante de las CV.

-Generalmente las mezclas en igual proporción CV/CLD al incorporarlas a morteros presentan mayor resistencia mecánica que los morteros con CV e igual porcentaje de sustitución. Si se sustituye hasta un 30% la resistencia aumenta en tiempos cortos de curado y en cambio se si añade entre un 50 y un 60% dicho efecto se notará aproximadamente a los 28 días de curado, ya que la cal disponible ha disminuido.

-Al aumentar la temperatura de los morteros en su curado de 20 a 40°C se perciben mayores resistencias, a causa del incremento de la actividad puzolánica de los residuos.

-Generalmente la puzolanidad de las CV/CLD a 40°C es mayor en tiempos cortos de curado que las de las CV, pero a tiempos largos de curado las CV actúan mayormente.

Observando los resultados de la mezcla ternaria se puede concluir que la adición de CLD al mortero con CV daría como resultado un producto que alcanzaría resistencias más elevadas a edades más cortas, manteniendo elevadas reducciones de la cantidad de cemento y con un coste similar al del producto inicial.

### 3.7. OBRAS REALIZADAS

Debido al carácter todavía experimental en nuestro país, sobre la utilización tanto de los lodos de depuradoras como de las cenizas que se obtienen de su incineración, no existen obras realizadas hasta el momento. La investigación sobre el uso del lodo como material de construcción aumenta y se va notando una evolución en el interés de las empresas por dicho material. La mayor utilización de los lodos se da en las fábricas de cemento como elemento combustible, así desde el año 2003 se utiliza una pequeña parte del lodo seco producido en Alicante en la fabricación del cemento y en Cataluña desde el año 2005 hay un proyecto en el que dos fábricas cementeras también lo utilizan. Así mismo, hay empresas interesadas en la utilización de dicho material para este mismo uso por el resto de la geografía española. La valorización energética de los lodos es un procedimiento más utilizado en países como Suiza, Francia y Bélgica que en España gracias a que en esos países cuentan con las instalaciones específicas para su uso. <sup>(26)(44)(45)(46)(47)</sup>.

También existen unas patentes de ladrillos en las que se utilizan lodos como materia prima. Según las fuentes consultadas, en la actualidad estos ladrillos se emplean como material de construcción, aunque no se dispone de información de ninguna obra en particular.

En Francia, se han efectuado dos proyectos pilotos con un lodo procesado (lavado en la misma estación depuradora, del que resulta una composición con un 70% de materia mineral y 30% de materia orgánica y tras un cribado en trómel se elimina aproximadamente un 20% de la materia orgánica). El objetivo era comparar los impactos geotécnico y medioambientales frente a los causados por una arena convencional. Uno es una zanja drenante (Rossy, 1997) y el otro es una explanada de 300x5 m<sup>2</sup> (Vitry-sur Seine, 1999). Ambos han satisfecho las especificaciones de la guía LCPC-SETRA, por lo que el empleo de este material procesado se está comercializando con

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.4	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>LODOS DE DEPURADORAS</b>		

el nombre “Valori’sableR” por la empresa ECOPUR.y puede considerarse adecuado para la realización de rellenos en general y explanadas no tratadas<sup>(54)</sup>.

#### **4.- CONSIDERACIONES MEDIOAMBIENTALES**

La Ley 10/1998, de Residuos, de 21 de abril, establecía en su artículo 3 que tendrían consideración de residuos todos aquellos que figurasen en el Catálogo Europeo de Residuos (CER). Este Catálogo fue aprobado por la Decisión 94/3/CE de 20 de diciembre de 1993, y complementado con la Decisión 94/904/CE, ambas aprobadas en el Real Decreto 952/1997.

Las Decisiones Comunitarias 94/3/CE y 94/904/CE han sido derogadas por la Decisión 2000/532/CE mediante la que se aprueba La Lista Europea de Residuos. La orden MAM/304/2002 de 8 de febrero (con corrección de errores de 12 de marzo), publica en su Anejo 2 la mencionada Lista Europea de Residuos.

Los lodos procedentes de estaciones depuradoras de aguas residuales vienen incluidos en la Lista Europea de Residuos en el Capítulo 19 correspondiente a “Residuos de las instalaciones para el tratamiento de residuos, de las plantas externas de tratamiento de aguas residuales y de la preparación de agua para consumo humano y de agua para uso industrial” con el siguiente código:

- 19 08 05: Lodos del tratamiento de aguas residuales urbanas, y están caracterizados como residuos no peligrosos.

Las cenizas procedentes de la incineración de estos lodos vienen incluidos en la Lista Europea de Residuos en el Capítulo 19 correspondiente a “Residuos de las instalaciones para el tratamiento de residuos, de las plantas externas de tratamiento de aguas residuales y de la preparación de agua para consumo humano y de agua para uso industrial” con el siguiente código:

- 19 01 13 Cenizas volantes que tienen sustancias peligrosas, y están caracterizadas como residuos peligrosos.

El Plan Nacional de Lodos de EDAR 2001-2006, se propone proteger el medio ambiente y especialmente la calidad del suelo gestionando adecuadamente los lodos, así como el logro de los siguientes objetivos ecológicos <sup>(5)</sup>:

- Reducción en origen de la contaminación de los lodos.
- Caracterización de los LD generados en España, antes de 2003.
- Valorización de al menos el 80 por 100 de los LD, antes de 2007.
- Valorización en usos agrícolas del 25 por 100 de LD, previamente compostados, antes de 2007.
- Valorización en usos agrícolas del 40 por 100 de los LD tratados anaeróbicamente o sometidos a otros tratamientos, antes de 2007.
- Valorización energética del 15 por 100 de los LD, antes de 2007.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.4	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>LODOS DE DEPURADORAS</b>		

- Correcta gestión ambiental del 100 por 100 de las cenizas de incineración de LD.
- Reducción a un máximo del 20 por 100 los LD depositados en vertedero, antes de 2007.
- Creación de un sistema estadístico y bases de datos sobre LD y su gestión, que, junto con la información del Registro Nacional de Lodos, se integre en el futuro Inventario Nacional de Residuos. En este Inventario se desagregará la información siguiendo un modelo taxonómico e informático unificado, que será elaborado por el Ministerio de Medio Ambiente (MIMAM) en colaboración con el Ministerio de Agricultura, pesca y Alimentación (MAPA) y las Comunidades Autónomas.

Para los LD, son de aplicación todas las normas en vigor relativas a los lodos y en particular la ley de residuos 10/1998 que da priorización y responsabilidad al productor. A las instalaciones para la gestión de los LD les es así mismo de aplicación la Directiva 96/61, que entre otras cosas contempla la utilización de las mejores técnicas disponibles en las actividades de gestión de LD. Además según la directiva 86/278/CEE los LD deben tener un límite de metales pesados y debe haber un uso restringido de estos en lo suelos, entre otros requisitos<sup>(48)</sup>.

La utilización tanto de los lodos como de las cenizas, podría resolver dos problemas a la vez, uno medioambiental, como es el rápido llenado del vertedero, y otro económico, de disminución de costes, derivados del transporte y coste de vertido. Además, el tratamiento de dichos residuos con aprovechamiento de su contenido energético permite integrarlos en el proceso productivo y a la vez reduce el consumo de recursos naturales<sup>(18)</sup>.

Los lodos de las depuradoras (LD) tienen la peculiaridad respecto a otros tipos de residuos, de que su uso en el suelo está regulado por la Directiva 86/278/CEE relativa a la protección del medio ambiente y en particular de los suelos en la utilización de los lodos con fines agrícolas. Esta Directiva regula las condiciones de aplicación de los LD a los suelos agrícolas, condiciones orientadas a evitar el posible efecto nocivo sobre las aguas, el suelo, la vegetación, los animales y la salud humana.

## **5.- ASPECTOS ECONÓMICOS**

El destino con menor coste de los lodos actualmente es el vertido, pero este método no es adecuado ni sostenible. Estimaciones hechas por grupos en Europa dan un coste de entre 110 y 160 €/T. de lodo seco que se lleva al vertedero y en cambio el que se incinera conlleva un coste de entre 260 y 350 €/T., cantidad que podría disminuir y que es menor, en grandes plantas con gran capacidad de tratamiento<sup>(49)</sup>.

Actualmente en España el vertido del lodo deshidratado cuesta aproximadamente 70€/T., dependiendo el coste exacto de la distancia de la EDAR al vertedero, del volumen de producción, de la composición del lodo, etc. En el caso del secado de los lodos, los costes son muy variables ya que los sistemas de secado plantean numerosos problemas de estabilidad del proceso y las plantas no trabajan a pleno rendimiento, pero aun así se puede considerar que la producción de electricidad asociada al secado en la planta de cogeneración, compensa el coste del secado<sup>(63)</sup>.

La siguiente tabla muestra un resumen de los costes de las tecnologías disponibles en el año 2002<sup>(50)</sup>.



<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.4	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>LODOS DE DEPURADORAS</b>		

Tecnología	Material	Capacidad normal de las unidades t/año	Capacidad normal de las unidades Inversión Explotación tms/año	Inversión 10 <sup>6</sup> €	Inversión € / (tms/año)	Explotación € / tms
Secado térmico + quemador	Lodo deshidr.	50.000 - 200.000	11.500 - 46.000	4,8 – 13,8	290 – 410	105 – 130
Secado térmico +cogeneración	Lodo deshidr.	50.000 - 200.000	11.500 - 46.000	9,6 – 27,0	590 – 830	40 – 110
Secado STC + cogeneración	Lodo deshidr.	10.000 - 47.000	2.300 - 10.800	2,6 – 7,8	730 – 1.120	60 – 140
Secado eléctrico con bomba de calor	Lodo deshidr.	10.000 - 33.000	2.300 - 7.600	1,4- 2,8	360 – 610	150 – 220
Secado térmico +cogeneración+gasificación	Lodo deshidr.	50.000 - 200.000	11.500 - 46.000	14,4 – 39,1	850 – 1.250	30 – 110
Oxidación supercrítica (SCWO)	Lodo espesado	90.000	20.700	4,3	210	200
Sistema Vertech	Lodo espesado	622.000	28.000	36,1	1.290	250
Biometización+cogeneración	Forsu/lodo 80/20	35.000 - 140.000	8.100 - 32.200	12,0 – 28,8	890 – 1.500	70 – 140
Presecado +inciner.+ turbina a vapor	Lodo deshidr.	50.000 - 200.000	11.500 - 46.000	25,2 – 72,7	1.590 – 2.180	220 – 320
Presecado +incineración (Dordrecht)	Lodo deshidr.	240.000	55.200	77,5	1.400	250
Incineración + turbina a vapor	Lodo deshidr.	50.000 - 200.000	11.500 - 46.000	29,4 – 85,3	1.850 – 2.570	250 – 350
Compostaje windrow – s/bulking	Lodo deshidr.	10.000 - 150.000	2.300 - 34.500	0,5 – 3,1	90 - 240	20 – 85
Compostaje windrow	Lodo deshidr.	10.000 - 150.000	2.300 - 34.500	0,5 – 3,1	90 - 240	40 – 85
Compostaje túnel	Lodo deshidr.	10.000 - 150.000	2.300 - 34.500	2,5 – 18,3	530 – 1.080	90 – 170
Compostaje canal	Lodo deshidr.	10.000 - 150.000	2.300 - 34.500	1,2 – 7,8	220 – 510	60 - 140

Nota: tms (tonelada métrica seca)

**Tabla 10:** Costes de las tecnologías disponibles en 2002 para el tratamiento del lodo

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.4	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>LODOS DE DEPURADORAS</b>		

Tras un análisis de las inversiones realizadas por los países de Europa se comprueba que los costes de tratamiento de lodos son menores del 6% del coste destinado a los servicios del agua (49).

El siguiente cuadro muestra la estimación global de las inversiones para que se consigan los objetivos del plan nacional de lodos (5).

CONCEPTO	PROGRAMA	NÚMERO	INVERSIÓN NECESARIA €
PREVENCIÓN	REDUCCIÓN CONTAMINACIÓN EN ORIGEN	-	30.050.605
VALORIZACIÓN AGRÍCOLA	CARACT. ANALÍTICA DE LD Y MUESTRE DE SUELO	-	21.035.423
INVERSIONES EN INFRAESTRUCTURA	PLANT. DE COMPOSTAJE	40	68.515.379
INVERSIONES EN INFRAESTRUCTURA	MEDIDAS DE CORRECCIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL EN TRAT. TERMICOS	-	24.040.484
INVERSIONES EN INFRAESTRUCTURA	CENTR. DE RECOGIDA Y ALMAC.	60	36.060.726
INVERSIONES EN INFRAESTRUCTURA	APOYO A LA IMPLANT. Y MEJORA DE OTRAS LÍNEAS DE TRAT. DE LD	-	270.455.446
INVERSIONES EN INFRAESTRUCTURA	ADAPT. Y MEJORA DE PLANT. DE INCINERAC. Y VALORIZAC. ENERGÉTICA	4	7.212.145
I+D+I; MEJORA DE LAS PRACT. AMBIENTALES	DESARROLLO DE NUEVOS USOS DE LD	-	6.010.121
I+D+I; MEJORA DE LAS PRACT. AMBIENTALES	ELABORAC. DE CÓDIGOS Y PROGRAMAS DE APLIC. Y PROMOCIÓN DEL USO EN TERRENO PÚBLICO	-	6.010.121
SENSIBIL. Y FORMAC.	CONCIENC. CIUDADANA	-	2.404.048
SENSIBIL. Y FORMAC.	FORMACIÓN DE PERSONAL	-	2.404.048
CONTOL ESTADÍSTICO	CREAC. DE SISTEM DE INFORMACIÓN	-	1.502.530
TOTAL	TOTAL	-	475.701.080

**Tabla 11** : Estimación de inversiones para los objetivos del plan 2001-2006

## 6.- NORMATIVA TÉCNICA

No existe normativa específica que regule el uso de estos residuos, pero para su posible empleo en distintos materiales de construcción, los estudios de laboratorio manejan como referencia las normas existentes de cada material, donde se especifican las propiedades finales que deben cumplir.

### **Ladrillos**

- UNE 67.019. Ladrillos cerámicos de arcilla cocida. Definiciones, clasificaciones y especificaciones. 1996.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.4	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>LODOS DE DEPURADORAS</b>		

### **Morteros y hormigones.**

- Ministerio de Fomento. "Instrucción de Hormigón Estructural (EHE)" <sup>(51)</sup>.
- Ministerio de Fomento. "Instrucción para la Recepción de Cementos (RC-08)" <sup>(52)</sup>.

## **7.- REFERENCIAS**

- [1] BORSA DE SUBPRODUCTES DE CATALUNYA, XAVIER ELÍAS: "Criterios de valorización y tratamiento de residuos industriales en el diseño de producto. (Valorización de fangos de EDAR)". Febrero 2006. Postgrado de ingeniería química. Página web (Septiembre 2006): "[http://departamentos.unican.es/quimica/doctorado/Conferencias%202005-2006/Xavier%20EI%C3%ADas\\_Valorizacion%20integral%20de%20fangos%20EDAR.pdf](http://departamentos.unican.es/quimica/doctorado/Conferencias%202005-2006/Xavier%20EI%C3%ADas_Valorizacion%20integral%20de%20fangos%20EDAR.pdf)"
- [2] JORGE OLCINA CANTOS: "NUEVOS RETOS EN DEPURACIÓN Y DESALACIÓN DE AGUAS EN ESPAÑA". Año 2002. Página web (Septiembre 2006): "<http://www.cervantesvirtual.com>"
- [3] SUSANNA VALLS I DEL BARRIO: "ESTABILIZACIÓN FÍSICA Y QUÍMICA DE LOS LODOS DE DEPURADORA DE AGUAS RESIDUALES Y DE MATERIAL DE DEMOLICIÓN PARA SU UTILIZACIÓN EN INGENIERÍA CIVIL". Julio 1999. Tesis doctoral, UPC.
- [4] ANGEL ALFONZO HERRERA SUÁREZ: "ELIMINACIÓN DE LODOS DE UNA EDAR". Febrero 2003. Master en ingeniería del agua. Página web (Septiembre 2006): "[http://tar5.eup.us.es/master/ponencias/pdf/lodos\\_d.pdf#search=%22esquema%20general%20de%20una%20edar%20operaciones%20de%20pretratamiento%22](http://tar5.eup.us.es/master/ponencias/pdf/lodos_d.pdf#search=%22esquema%20general%20de%20una%20edar%20operaciones%20de%20pretratamiento%22)"
- [5] PLAN NACIONAL DE LODOS DE DEPURADORAS DE AGUAS RESIDUALES-EDAR (2001/2006).
- [6] MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE: "PERFIL AMBIENTAL DE ESPAÑA 2005". Página web (Septiembre 2006): "<http://www.mma.es>"
- [7] CONSULTA AL AYUNTAMIENTO DE OLOT. Página web (Septiembre 2006): "<http://ww2.olot.org/>"
- [8] MIGUEL MALDONADO CUESTA: "HELIANTIS, UNA SOLUCIÓN ENERGÉTICAMENTE ACEPTABLE PARA EL SECADO DE FANGOS". Año 2005. Página web (Septiembre 2006): "<http://hisagua.cedex.es/documentacion/revistas/dyna/31.pdf>"
- [9] TAY, J.H.: "Bricks manufactured from sludge". Journal of Environmental Engineering, Vol. 113, nº 2, p. 278-284. Abril 1987.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.4	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>LODOS DE DEPURADORAS</b>		

- [10] F.ALBAREDA PARÉS: “Durabilidad de hormigones con adición de lodos secos de depuradoras de aguas residuales”. Febrero 2003. Tesis doctoral. Página web (Septiembre 2006): “<http://biblioteca.upc.es/pfc>”
- [11] ZAFFARONI, C.: “ Utilización del lodo industrial como sustituto parcial del carbón y del fuel en una fábrica de cemento”. Residuos, Nº42, p. 24-32. Mayo/Junio 1998.
- [12] MONZÓ, J.; PAYÁ, J.; BORRACHERO, M.V.; CÓRCOLES, A.: “Utilización de las cenizas procedentes de la incineración de lodos de depuradora (CLD) en la construcción”. Actas del Congreso Nacional de Materiales Compuestos, 1995. p. 559-563.
- [13] TAY, L.H.; YIP, W.K.: “Sludge ash as lightweight concrete material”. Journal of Environmental Engineering, Vol. 115, nº 1, p. 56-64. Febrero 1989.
- [14] KHANBILVARDI, R.; AJSHARI, S.: “Sludge ash as fine aggregate for concrete mix”. Journal of Environmental Engineering, Vol. 121, nº 9, p. 633-638 Septiembre 1995.
- [15] HIDALGO, R.E.; GIRÁLDEZ L.V.; AYUSO, J.: “Uso de las cenizas procedentes del desecado de lodos de EDAR de Córdoba”. Ingeniería Civil, nº114, p. 111-117. 1999.
- [16] FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (FHWA). The User Guidelines for Waste and Byproduct Material in Pavement Construction. <http://www.fhrc.gov/hnr20/recycle/waste/begin.htm>
- [17] DIEGO OÑASTE ARRESTI: “Revalorización de los lodos de EDAR”. Página web (Septiembre 2006): “<http://personal.telefonica.terra.es/web/diegonate/id17.htm>”
- [18] BLANCA MUNIESA BASTIDA: “Ingeniería básica de una planta de gasificación de lodo seco de EDAR”. Diciembre 2005. Página web(Septiembre 2006): “<http://biblioteca.upc.es/PFC>”
- [19] J.A.CUSIDO Y L.V.CREMADES: “NUEVOS MATERIALES CERÁMICOS PARA LA CONSTRUCCIÓN MEDIANTE VALORIZACIÓN DE LODOS DE AGUAS RESIDUALES URBANAS: PROYECTO ECOBRICK”. Página web (Septiembre 2006): [http://www.aepro.com/congresos/2000\\_1/pdf/CH01.pdf](http://www.aepro.com/congresos/2000_1/pdf/CH01.pdf)
- [20] MATGA (GRUP DE MATERIALS I GESTIÓ AMBIENTAL): “ INNOVACIÓN TECNOLÓGICA Y VALORIZACIÓN”. Página web (Septiembre 2006): “<http://www.fitec.org/old/pdf/proyectos%20ecomed%2003/261,3,LA VITRIFICACIÓN>”
- [21] ANDRÉS YAGÜE VIAÑA: “INERTIZACIÓN DE LODOS SECOS DE DEPURADORA DE AGUAS RESIDUALES Y SU UTILIZACIÓN EN INGENIERIA CIVIL”. Proyecto de tesis doctoral. Departament d’enginyeria de la construcció, UPC.
- [22] XAVIER ELÍAS: “Nuevas vías de valorización de residuos industriales”. Abril 2002. Página web (Septiembre 2006): “<http://www.cnpml.org>”

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.4	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>LODOS DE DEPURADORAS</b>		

- [23] S.VALLS, E.VÀZQUEZ: "Stabilisation and solidification of sewage sludges with Portland cement". Página web (Septiembre 2006): "<http://bibliotecnica.upc.es>".
- [24] S.VALLS, E.VÀZQUEZ: "Leaching properties of stabilised/solidified cement-admixtures-sewage sludges systems". Página web (Septiembre 2006): "<http://bibliotecnica.upc.es>".
- [25] CASTELLS, X.E.: "Reciclaje de residuos industriales". Editado por Díaz de Santos, S.A. 2000.
- [26] ALLEMAN, J.E.; BERMAN, N.A.: "Constructive Sludge Management: Biobrick". Journal of Environmental Engineering, Vol. 110, nº 2, p. 301-311. Abril 1984.
- [27] FEENESTRA, L.; TEN WOLDE, J.G.; EENSTROOM, C.M.: "Reusing water treatment plant sludge as secondary raw material in Brick Manufacturing". Waste materials in construction: Putting Theory into Practice. Proceedings of the International Conference on the Environmental and Technical Implications of Construction with Alternative Materials, WASCOM 97, Houthem St. Gerlach, The Netherlands, 4-6 June 1997, Edited by Goumans, J.J.J.M.; Senden, G.J.; Slott H.A.; Published ESEVIER.
- [28] C.CABEZAS, G.BOLAÑOS Y A.SALAZAR: "Materiales de construcción a partir de lodos de plantas de tratamiento de agua, mediante infiltración con dióxido de carbono supercrítico". Año 2001. Página web (Septiembre 2006): "<http://supercriticos.univalle.edu.co>"
- [29] A.YAGÜE, S.VALLS, E.VÀZQUEZ, V.KUCHINOW: "Utilización de lodo seco de depuradora de aguas residuales como adición en adoquines de hormigón prefabricado". Año 2002.
- [30] S.VALLS, E.VÀZQUEZ: "Durability study of a sewage sludge-cement-sand system and its environmental impact". Página web (Septiembre 2006): "<http://bibliotecnica.upc.es>".
- [31] A.YAGÜE, S.VALLS, E.VÀZQUEZ: "Use of Cement Portland Mortar of Stabilised Dry Sewage Sludge in Construction Applications". Página web (Septiembre 2006): "<http://bibliotecnica.upc.es>".
- [32] ZICLA. Productos reciclados para la construcción. Página web [www.zicla.com](http://www.zicla.com) (Noviembre 2007)
- [33] A.YAGÜE, S.VALLS, E.VÀZQUEZ: "VALORATION ADDITION DRY SLUDGE SEWAGE IN CONCRETE". Página web (Septiembre 2006): "<http://congress.cimne.upc.es/rilem04/admin/Files/FilePaper/p261.pdf>"
- [34] MEDIO AMBIENTE DE EUROPA: "Savia nueva para el medio ambiente". Enero 2006. Página web (Septiembre 2006): "<http://ec.europa.eu>"
- [35] GIQUIMA: "PROYECTO PEL-CEN". Página web (Septiembre 2006): "<http://epsar.cop.gva.es/depuradorasv/>"
- [36] J.MONZÓ, J.PAYÁ, M.V.BORRACHERO, J.J.MORENILLA, M.BONILLA, P.CALDERÓN: "Some strategies for reusing residues from waste water treatment plants: preparation of

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.4	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>LODOS DE DEPURADORAS</b>		

binding materials". Conference on the Use of Recycled Materials in Building and Structures. Noviembre 9-11. 2004. Barcelona.

- [37] MONZÓ, J.; PAYÁ, J.; BORRACHERO, M.V.; CÓRCOLES, A.: "Use of sewage sludge ash (SSA)-cement admixtures in mortars". Cement and Concrete Research, Vol. 26, nº 9, p. 1389-1398. 1996.
- [38] MONZÓ, J.; PAYÁ, J.; BORRACHERO, M.V.; BELLVER, A.; PERIS-MORA, E.: "Study of cement-based mortars containing Spanish ground sewage sludge ash". Waste materials in construction: Putting Theory into Practice. Proceedings of the International Conference on the Environmental and Technical Implications of Construction with Alternative Materials, WASCOM 97, Houthem St. Gerlach, The Netherlands, 4-6 June 1997, Edited by Goumans, J.J.J.M.; Senden, G.J.; Slott H.A.; Published ELSEVIER.
- [39] C.M.A.FONTES, M.C.BARBOSA, R.D. TOLEDO FILHO, J.P. GONÇALVES: "POTENTIALITY OF SEWAGE SLUDGE ASH AS MINERAL ADDITIVE IN CEMENT MORTAR AND HIGH PERFORMANCE CONCRETE". Página web (Septiembre 2006): "<http://congress.cimne.upc.es/rilem04/admin/Files/FilePaper/p343.pdf>"
- [40] A.GONÇALVES, A.M.ESTEVES, M.CARVALHO: "INCORPORATION OF SLUDGES FROM A WATER TREATMENT PLANT IN CEMENT MORTARS". Página web (Septiembre 2006): "<http://congress.cimne.upc.es/rilem04/admin/Files/FilePaper/p278.pdf>"
- [41] TAY, J.H.: "Sludge ash as filler for Portland cement concrete". Journal of Environmental Engineering, Vol. 113, nº 2, p. 345-351. Abril 1987.
- [42] MONZÓ, J.; BORRACHERO, M.V.; PAYÁ, J.; GIRBÉS, I.: "Morteros de cementos compuestos a base de cenizas volantes de central termoeléctrica de carbón (CV) y cenizas procedentes de la incineración de lodos de depuradora (CLD)". Actas del III Congreso Nacional de Materiales Compuestos, Benalmádena, 1999. p. 477-483.
- [43] M.V.BORRACHERO, J.PAYÁ, J.MONZÓ, M.BONILLA, I.GIRBÉS: "Evolución de las resistencias mecánicas de sistemas ternarios cemento/cenizavolante/ceniza de lodo de depuradora: efectos puzolánicos complementarios" Año 2002.
- [44] ESTRATEGIA EMPRESARIAL: "Cemento más limpio y a un menor coste energético, apuestas medioambientales de Cementos Rezola". Página web (Septiembre 2006): "<http://publicaciones.estrategia.net/cs26/cla.htm>"
- [45] AGENDA DE LA CONSTRUCCIÓN SOSTENIBLE, NEWSLETTER 51: "Plan piloto sobre la utilización de combustibles alternativos en las fábricas de cemento". Página web (Septiembre 2006): "<http://www.apabcn.es/sostenible/>"
- [46] REVISTA TÉCNICA CEMENTO-HORMIGÓN: "El Conseller Milà anuncia un plan piloto sobre la utilización de combustibles alternativos en las fábricas de cemento de Cataluña". Marzo 2005. Página web (Septiembre 2006): "<http://www.cemento-hormigon.com/>"

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.4	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>LODOS DE DEPURADORAS</b>		

- [47] REVISTA TÉCNICA CEMENTO-HORMIGÓN: “CEMEX España y Saneamiento de Aguas de Valencia firman un convenio para el secado de lodos de la comunidad valenciana”. Diciembre 2003. Página web (Septiembre 2006): “<http://www.cemento-hormigon.com/>”
- [48] MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE: “Guía sobre compatibilidad de la aplicación de los Fondos Estructurales con la Política y Normativa Comunitaria de Medio Ambiente”. Año 2005. Página web (Septiembre 2006): “<http://www.mma.es>”
- [49] COMMISSION OF THE EUROPEAN COMMUNITIES: “PROPOSAL FOR A DIRECTIVE OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL ON SPREADING OF SLUDGE ON LAND”. Abril 2003.
- [50] CENTRO CANARIO DEL AGUA: “Análisis de la situación y posible evolución de las tecnologías para el tratamiento de lodos de depuración”. Página web (Septiembre 2006): “<http://www.fcca.es>”
- [51] MINISTERIO DE FOMENTO: “Instrucción de Hormigón Estructural (EHE)”. Página web (Septiembre 2006): “<http://www.fomento.es>”
- [52] MINISTERIO DE FOMENTO: “Instrucción para la recepción de cementos (RC-03)”. Página web (Septiembre 2006): “[http://normativaconstruccion.cype.info/6\\_01\\_c/](http://normativaconstruccion.cype.info/6_01_c/)”
- [53] J.J.MORENILLA, I.BERNÁCER, J.M<sup>a</sup>.SANTOS, J.MUÑOZ: “Funcionamiento del túnel de secado térmico de fangos de la edar de ibi (alicante)”. Página web (Septiembre 2006): “<http://epsar.cop.gva.es/depuradorasv/>”
- [54] HELAINE, D. “Les boues de curage des réseaux d’assainissement; caractéristiques et techniques de traitement/valorisation”, TMS, N°4, 2000.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.5	Mes: JUNIO Año: 2008
<b>RESIDUOS PLÁSTICOS URBANOS</b>		
Nombre en inglés: Urban plastic waste		



## RESIDUOS PLÁSTICOS URBANOS

### 1.- ORIGEN

Los Residuos Plásticos Urbanos (RPU) empleados para obtener el material plástico reciclado pueden proceder de diferentes aplicaciones, no obstante, la procedencia de los mismos está basada en dos grandes fuentes <sup>(1) (2)</sup>:

- Residuos procedentes de los procesos de fabricación, es decir, residuos que quedan al pie de la máquina, tanto en la industria petroquímica como en la transformadora.
- Residuos procedentes de la masa de residuos sólidos urbanos (RSU). Éstos se dividen a su vez en tres clases:
  - Residuos plásticos de tipo simple, los cuales se clasifican y separan en distintas clases.
  - Residuos mixtos, se definen como la mezcla de diferentes tipos de plásticos.
  - Residuos plásticos mixtos combinados con otros residuos tales como papel, cartón, metales.



<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.5	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>RESIDUOS PLÁSTICOS URBANOS</b>		

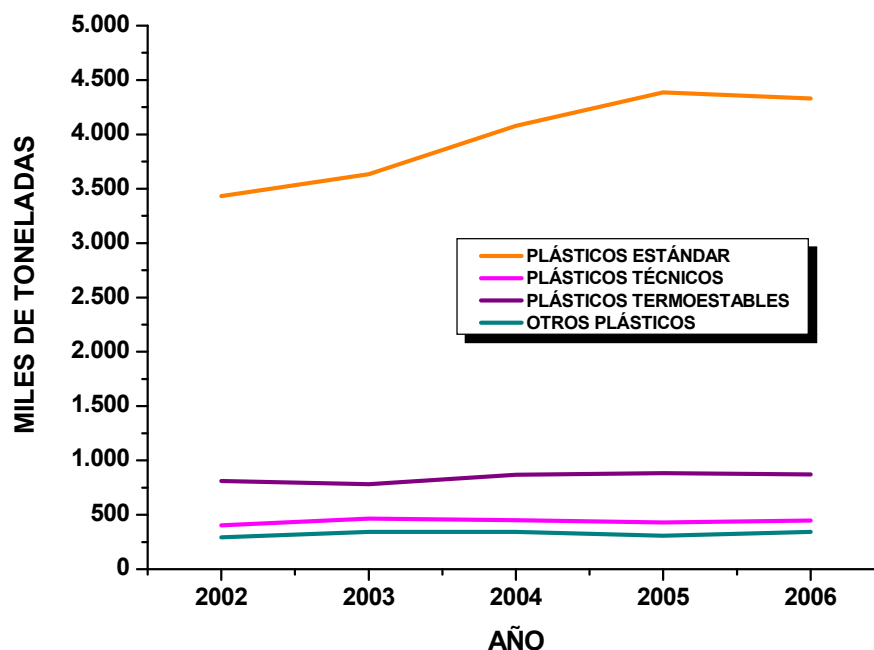
## 2.- VOLUMEN Y DISTRIBUCIÓN

### 2.1. CONSUMO APARENTE DE PLÁSTICOS EN ESPAÑA

El consumo aparente de los plásticos en España, al igual que su producción, ha experimentado un crecimiento importante a lo largo de estos últimos años, como se puede observar en las figuras 1 y 2 a través de datos bibliográficos obtenidos por el Centro Español de Plásticos (CEP) en el periodo de 2002 a 2006 <sup>(3)</sup>.

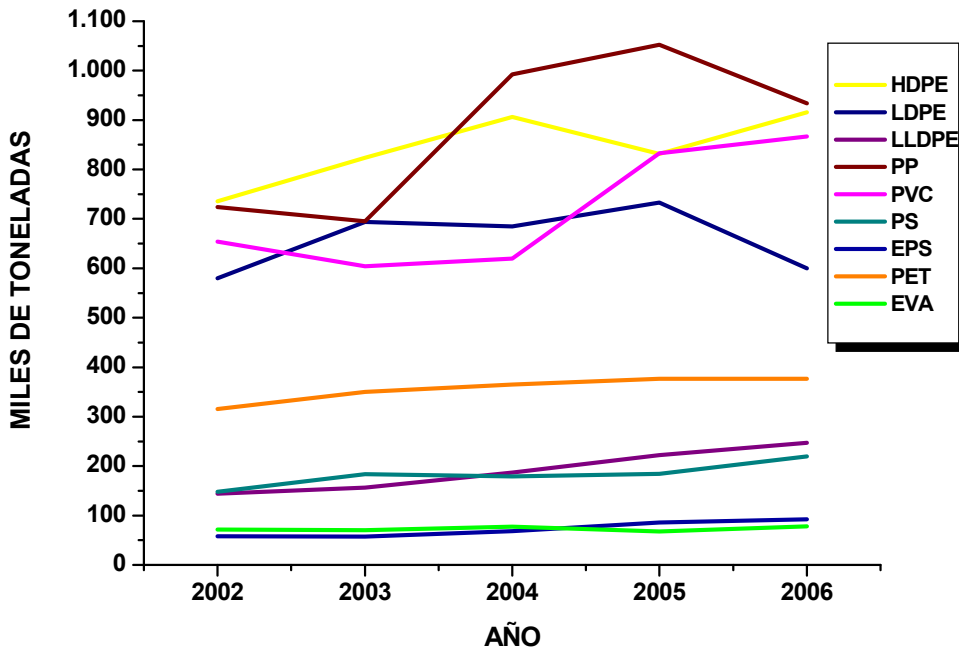
A la vista de estos datos se puede decir que el consumo aparente de los plásticos ha ido aumentando en las distintas familias, destacando la de los plásticos estándar o termoplásticos que constituyen el 72 % del consumo total de plásticos. Además, se aprecia una tendencia de crecimiento constante del consumo de plásticos en los últimos años (5 % anual), impulsada fundamentalmente por los mercados del envase y de la construcción.

En las figuras 1 y 2 se puede observar el crecimiento del consumo de los plásticos desde el año 2002 al 2006, apreciándose una ligera disminución en el año 2006 respecto al anterior.



**Figura 1:** Consumo aparente de plásticos por familias en España.  
(Fuente: Centro Español de Plásticos)

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.5	Mes: JUNIO Año: 2008
<b>RESIDUOS PLÁSTICOS URBANOS</b>		



**Figura 2:** Consumo aparente de plásticos estándar en España.  
(Fuente: Centro Español de Plásticos)

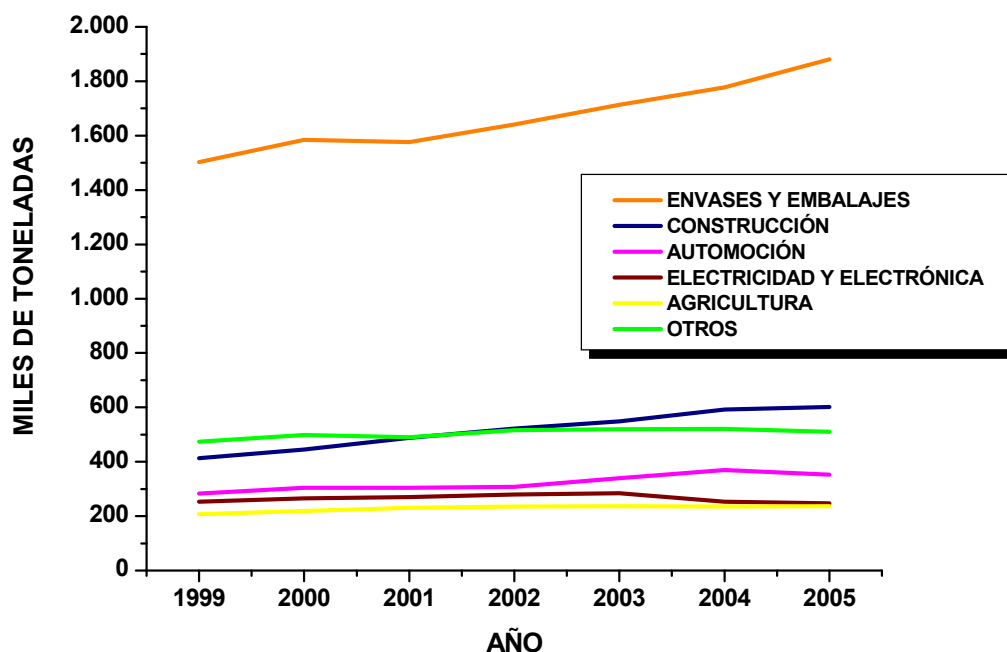
Los mercados a los que pueden destinarse los distintos tipos de plásticos producidos en España son muy variados, entre ellos cabe destacar el del envase y embalaje y el de la construcción.

A partir de los datos representados en la figura 3 se puede deducir que el mercado de las aplicaciones de los plásticos reciclados seguirá creciendo y a la vez las exigencias legislativas serán cada vez más estrictas en lo que se refiere a los aspectos medioambientales y de salud<sup>(3)</sup>.

El sector del envase y embalaje invade la gran mayoría de las actividades manufactureras y muestra un gran dinamismo, pues solamente en España este mercado mueve 15.000 millones de euros.

Por otro lado, el mercado de la construcción puede considerarse como el motor de la economía española ya que es un campo con un gran potencial de crecimiento para la industria del plástico, con un porcentaje de casi el 15 % del consumo aparente, es decir, alrededor de 891.000 Tm<sup>(3)</sup>. Puede decirse que la construcción es el segundo mercado para los plásticos, el cual, comprende multitud de aplicaciones, tanto sustituyendo materiales tradicionales como creando nuevas posibilidades. Entre las aplicaciones más relevantes cabe destacar: tuberías, sistemas de canalización, perfilera, aislamientos, recubrimientos y otros.

## RESIDUOS PLÁSTICOS URBANOS



**Figura 3:** Principales aplicaciones de los plásticos reciclados en España.  
(Fuente: Centro Español de Plásticos)

## 2.2. GENERACIÓN DE RESIDUOS PLÁSTICOS EN ESPAÑA

Los materiales plásticos originales a través de su ciclo de vida se convierten en residuos plásticos. En el caso de los envases y embalajes en un periodo de tiempo muy corto pasan a ser residuos urbanos o industriales, mientras que los materiales empleados en la construcción pueden llegar a alcanzar un periodo de vida útil superior a 25 años. En cualquier caso, se podría decir que casi todo el material plástico virgen termina por transformarse en residuo <sup>(4)</sup><sup>(5)</sup>.

Es lógico pensar que el constante incremento en el consumo de los materiales plásticos genera un aumento paralelo de residuos plásticos, por tanto, la gestión de estos últimos representa un valor añadido ambiental (Fuente ANARPLA, del año 1997 al 2003 el aumento de residuos plásticos en España ha sido del 36,4 %).

En España, el sector del reciclaje de plásticos está compuesto por empresas distribuidas de forma irregular por el territorio nacional.

La evolución experimentada en los últimos años muestra que el reciclaje de los plásticos ha estado marcado por dos hitos clave: el Sistema del Punto Verde iniciado en 1998 y la Directiva Europea 94/62/CE de Envases y Residuos de Envases con objetivos de reciclado que debían

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.5	Mes: JUNIO Año: 2008
<b>RESIDUOS PLÁSTICOS URBANOS</b>		

cumplirse en 2001. Ambos factores han motivado que el crecimiento anual del reciclaje haya sido espectacular, permitiendo alcanzar, e incluso superar, dichos objetivos. ECOEMBES (Ecoembalajes España S.A.), en su informe anual de 2006, destaca que el crecimiento del reciclaje de envases de plástico superó en un 20 % la cifra alcanzada en el año anterior <sup>(6) (7)</sup>.

### **3.- GESTIÓN DEL RESIDUO**

La estimación de los residuos plásticos urbanos (excepto embalajes) recogidos en España en el año 2005 ascendió a 251,3 miles de toneladas.

#### **3.1. PROPIEDADES DEL RESIDUO**

En esta ficha se van a considerar únicamente los materiales poliméricos pertenecientes a la familia de los termoplásticos por ser los más habituales en los residuos plásticos urbanos.

Los termoplásticos son fácilmente reciclables ya que se funden al calentarse y, por tanto, se pueden moldear repetidas veces sin que sus propiedades originales sufran grandes alteraciones. Sin embargo, durante los distintos ciclos de reprocesado van sufriendo modificaciones, por lo que no es aconsejable reciclarlos más de 5 ó 7 veces.

Los termoplásticos más conocidos son: polietileno de baja densidad (PEBD o LDPE), polietileno de alta densidad (PEAD o HDPE), polipropileno (PP), polietilentereftalato (PET), policloruro de vinilo (PVC), poliestireno (PS), poliestireno expandido (EPS) y policarbonato (PC)<sup>(8) (9)</sup>.

Los plásticos tienen un elevado poder calorífico y por este motivo se podría llegar a considerar que la única vía de sus residuos sea la valorización energética. Sin embargo ésta debe reservarse para aquellas fracciones de residuos plásticos que no pudieran ser tratadas por medio del reciclaje mecánico o químico.

#### **3.2. VALORIZACIÓN MATERIAL**

##### **3.2.1. Reciclaje mecánico**

El reciclaje mecánico consiste en trocear el material e introducirlo en una extrusora para fabricar granza reciclada y después transformarla (extrusión, inyección, etc). Este tipo de reciclaje se considerará exclusivamente para aquellos productos procedentes del consumo.

Las condiciones que se han de cumplir en un reciclaje mecánico son <sup>(4)</sup>:

- plásticos no muy degradados en los procesos de transformación y/o utilización.
- una completa separación de los plásticos por tipos y para ello es conveniente una recogida selectiva de los mismos.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.5	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>RESIDUOS PLÁSTICOS URBANOS</b>		

- ausencia de materiales o partículas extrañas que puedan dañar a los equipos de transformación o interfieran en las características físicas del producto.
- recogida en cantidades suficientes para la viabilidad industrial y económica del proceso.

Las etapas de un reciclaje mecánico son <sup>(10)</sup> a <sup>(12)</sup>:

- limpieza: acondicionamiento para obtener una materia prima adecuada, sin suciedad o sustancias que puedan dañar tanto a las máquinas como al producto final.
- clasificación: selección y separación de los plásticos. Se han desarrollado varias técnicas de separación basadas en métodos físicos de diferente naturaleza: técnicas de flotación-hundimiento basadas en la diferencia de densidad, utilización de disolventes, técnicas espectroscópicas, técnicas electrostáticas, técnicas basadas en la incorporación de marcadores químicos y otras.
- trituración o molienda: obtención de un tamaño de grano adecuado mediante cuchillas de acero inoxidable.
- lavado: eliminación de cualquier tipo de suciedad o impureza mediante lavado, aclarado y centrifugación (secado). Seguidamente los residuos se vuelven a moler y a secar.
- obtención de granza: se realiza mediante un proceso de extrusión. El material se homogeneiza por fundición y, a continuación, se moldea la masa fundida en forma de filamentos. Tras la extrusión el plástico pasa a través de un filtro para eliminar los restos de contaminantes distintos a los plásticos y se corta en pequeños trozos con una hélice obteniendo la granza reciclada.

Posteriormente, el material se enfría con agua solidificándose en forma de “pellets”. La granza reciclada húmeda pasa por una centrífuga. Una vez que la granza está seca se pasa mediante una corriente de aire a una tolva, a través de la cual se van llenando los sacos.

No todos los materiales están en condiciones de ser sometidos a un reciclaje mecánico, bien porque están muy degradados y no darían productos con buenas características, o porque se encuentran mezclados con todo tipo de sustancias por lo que su separación y limpieza no resultaría rentable <sup>(14)</sup>.

El reciclaje mecánico es la alternativa más desarrollada para recuperar los residuos plásticos, aunque a veces este tipo de reciclaje no es el más adecuado, debido a que el rendimiento no es suficiente para poder lograr una eficiencia económica a través de una eficiencia ecológica <sup>(13)</sup> <sup>(15)</sup>.

En estos casos, existen otras opciones para alargar la vida de estos materiales a través de diferentes tipos de reacciones químicas. Estas opciones de recuperación se denominan reciclaje químico o valorización energética.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.5	Mes: JUNIO Año: 2008
<b>RESIDUOS PLÁSTICOS URBANOS</b>		

### 3.2.2. Reciclaje químico

El reciclaje químico puede considerarse como un proceso complementario al mecánico ya que ofrece posibilidades que resuelven las limitaciones de este último. Entre ellas se encuentra la necesidad de disponer de grandes cantidades de residuos plásticos limpios, separados y homogéneos para poder garantizar la calidad del producto final <sup>(16)</sup>.

El reciclaje químico es un proceso mediante el cual se produce la descomposición del polímero para obtener los componentes de partida (monómeros). A partir de estos monómeros, y tras un nuevo proceso de polimerización, se obtienen nuevos materiales poliméricos <sup>(9)</sup>.

Su aplicación es viable tanto a mezclas de distintos polímeros, lo que evita la separación por tipos reduciendo los costes de recolección y clasificación, como a polímeros termoestables <sup>(11)</sup>.

El reciclaje químico puede realizarse mediante diferentes procesos que pueden clasificarse en <sup>(13)</sup> <sup>(17)</sup>:

#### ➤ Despolimerización térmica

Este tipo de reciclaje químico agrupa las tecnologías que permiten la transformación de los polímeros en monómeros u oligómeros mediante aporte de calor, sin que un reactivo químico intervenga en las reacciones de ruptura de las cadenas. Incluye diversos procesos como la pirólisis de algunos plásticos, microondas o tratamientos a muy alta temperatura.

##### ▪ Pirólisis

La pirólisis se lleva a cabo bajo condiciones de reacción severas ( $T^a > 450$  °C y elevados tiempos de residencia) ya que es necesario aportar grandes cantidades de calor para romper el enlace carbono-carbono. La ruptura de las cadenas tiene lugar a través de una reacción primaria con una velocidad suficiente. Además, se forman radicales a partir de reacciones secundarias menos selectivas que dificultan el control de esta reacción primaria <sup>(18)</sup> <sup>(19)</sup>.

Este proceso permite obtener los monómeros (etileno o propileno) pero en presencia de numerosos subproductos y con bajos rendimientos, por lo que se están dedicando grandes esfuerzos para poder emplear catalizadores en estas reacciones. Si no se aplican estas condiciones los polímeros se transforman en materias químicas de tipo petroquímico como el gas de síntesis o parafinas <sup>(18)</sup>.

##### ▪ Hidrogenación o hidrocrqueo

Este tipo de proceso implica el tratamiento térmico del residuo plástico en presencia de hidrógeno, normalmente a temperaturas moderadas (400-500 °C), y elevadas presiones (10-100 kPa). En ellos se emplean catalizadores bifuncionales (con funciones de craqueo e hidrogenación) compuestos por metales de transición soportados sobre matrices ácidas <sup>(13)</sup>.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.5	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>RESIDUOS PLÁSTICOS URBANOS</b>		

El hidrocraqueo da lugar a la formación de productos altamente saturados que pueden usarse directamente como combustible o como materia prima en refinería. Es un proceso versátil que permite el tratamiento de mezclas de plásticos y la obtención de hidrocarburos líquidos con rendimientos cercanos al 85 %. Sin embargo, el uso de hidrógeno a altas presiones y temperaturas resulta costoso y requiere medidas de seguridad especiales <sup>(13)</sup>.

- Craqueo térmico

Este tipo de proceso implica la ruptura de las cadenas poliméricas constitutivas de los residuos plásticos por acción del calor en ausencia de oxígeno. Normalmente, el producto de reacción es una mezcla heterogénea de hidrocarburos con una distribución muy amplia de tamaños moleculares. La proporción de hidrocarburos líquidos, gaseosos y sólidos es función de la temperatura a la que se desarrolla el proceso, que suele efectuarse entre 500 y 800 °C <sup>(13)</sup>.

#### ➤ **Disolución**

Los procedimientos de disolución de los plásticos permiten recuperar los polímeros purificados eliminando los materiales contaminantes contenidos en los desechos. Éstos no implican la modificación química de las moléculas de polímeros, pero no corresponden ni a un reciclaje mecánico ni a una valorización energética de los residuos <sup>(17)</sup>.

#### ➤ **Solvólisis**

El término solvolisis define un procedimiento por el que el disolvente actúa también como reactivo. En función de la naturaleza del disolvente se distinguen distintas clases de solvolisis como la quimiólisis (glicólisis, hidrólisis y metanolisis), en donde se utilizan también fluidos supercríticos <sup>(13) (17)</sup>.

- Hidrólisis

Normalmente se realiza en medio básico (saponificación), lo que facilita el proceso, pero necesita una etapa de post-tratamiento para transformar el producto en monómeros utilizables. Este procedimiento permite tratar los desechos coloreados y mezclados.

- Metanolisis

Es un avanzado proceso de reciclaje que consiste en la aplicación de metanol en el PET. Este poliéster se descompone en sus moléculas básicas, incluidos el dimetiltereftalato y el etilenglicol, que pueden polimerizarse nuevamente para producir resina virgen.

- Glicólisis

Se realiza con etilenglicol y en condiciones menos severas que la metanolisis y la hidrólisis, lo que reduce los costes económicos, aunque es menos eficaz que ellas para el tratamiento de desechos coloreados y mezclados.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.5	Mes: JUNIO Año: 2008
<b>RESIDUOS PLÁSTICOS URBANOS</b>		

Los productos de la reacción pueden utilizarse para recuperar PET o como precursores de espumas de poliuretano o poliésteres insaturados.

➤ **Otras despolimerizaciones químicas**

En el reciclaje químico existen otros procesos entre los que destacan aquellos que se realizan con un reactivo químico determinado (un ácido, un derivado del fenol, etc.) o los que se llevan a cabo mediante craqueo catalítico.

El craqueo catalítico de residuos plásticos presenta una serie de ventajas respecto a los procesos de craqueo térmico, como por ejemplo la posibilidad de trabajar a menores temperaturas de reacción (300-400 °C) gracias a la presencia de catalizadores. Además, una adecuada selección de los mismos permite controlar la distribución de los productos obtenidos.

Una alternativa interesante consiste en el reformado catalítico de los gases obtenidos en el craqueo térmico de los residuos plásticos dando lugar a diversos productos como gasolina, gasóleo y queroseno entre otros <sup>(13)</sup>.

A partir de la separación de los procesos en las diferentes clases, se puede definir una matriz “clase de proceso/tipo de plástico tratado” tal como se muestra en la tabla 1, en la que se presenta un reflejo de la situación del reciclaje químico de los plásticos en Europa durante el año 2002 <sup>(17)</sup>:

- Se distinguen nueve grandes grupos de polímeros que pueden someterse al reciclado químico; los polímeros de adición (PE; PP; PVC; PS; Polimetilmetacrilato, PMMA) se tratan principalmente con la despolimerización térmica; mientras que los polímeros de condensación (PET; Poliamidas, PA; PC; Poliuretano, PUR) aceptan la mayoría de los tratamientos químicos.
- La disolución puede aplicarse a la mayoría de los plásticos. Desde el punto de vista de la calidad de los materiales reciclados es, sin embargo, menos satisfactoria que la despolimerización térmica.

Estos procesos de reciclaje químico se encuentran en tres estados distintos de desarrollo, como se puede observar en la figura 4.

El proceso de reciclaje químico más desarrollado industrialmente es el de la solvolisis, a continuación le sigue la despolimerización térmica y en último lugar se encuentra el de la disolución (ver figura 4). En los dos últimos casos, la explotación a escala industrial es muy similar a la de la escala de planta piloto, mientras que en el caso de la solvolisis la diferencia es mayor.

Los grandes grupos químicos internacionales colaboran activamente con los laboratorios en la investigación de los procesos de reciclaje químico para iniciar la fase de desarrollo en planta piloto.

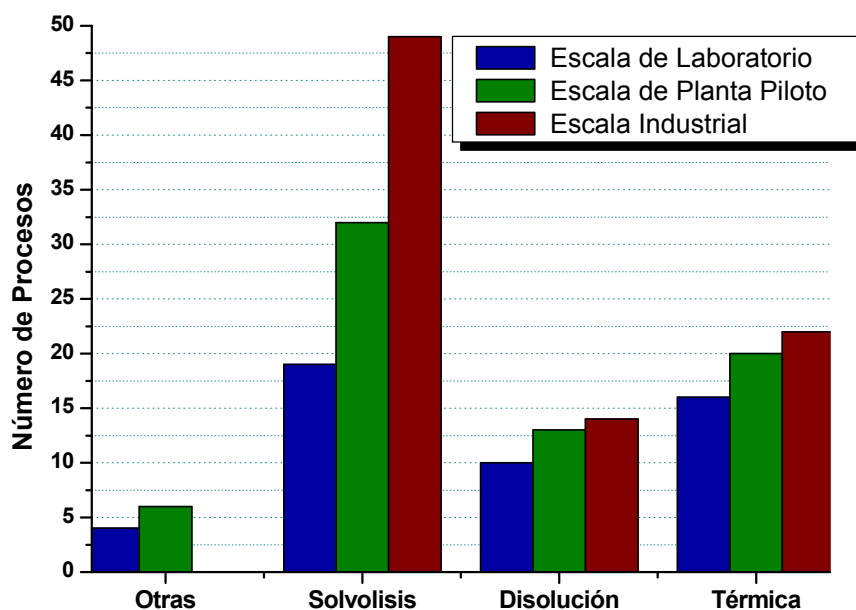


<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.5	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>RESIDUOS PLÁSTICOS URBANOS</b>		

	PE/PP	PVC	PS	PET	PA	PMMA	PC	PUR	Total
<b>Despolimerización térmica</b>	4	1	11	2	2	7			27
<b>Disolución</b>	2	3	4		6		1		16
<b>Solvolisis</b>				26	10		2	7	45
Glicolisis				15	1		1	6	23
Hidrólisis				5	9			1	15
Metanolisis				6			1		7
<b>Otras despolimerizaciones químicas</b>					1		3	1	5
<b>Total</b>	6	4	15	28	19	7	6	8	93

**Tabla 1**

Distribución de reciclaje químico en función del residuo plástico en Europa en 2002.  
(Fuente: ADEME)



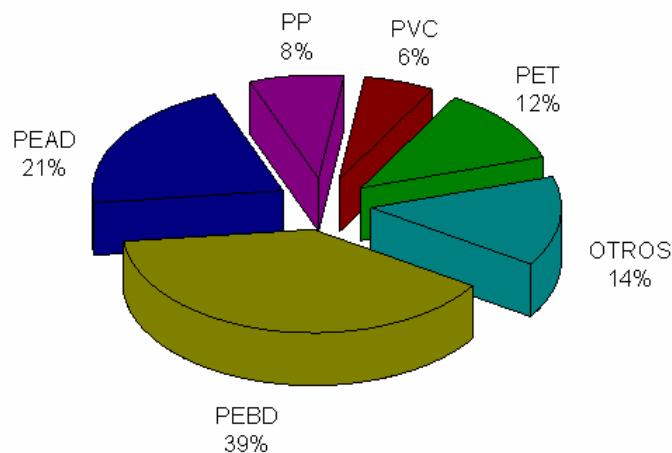
**Figura 4:** Representación de desarrollo de los diferentes procedimientos en Europa en 2002.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.5	Mes: JUNIO Año: 2008
<b>RESIDUOS PLÁSTICOS URBANOS</b>		

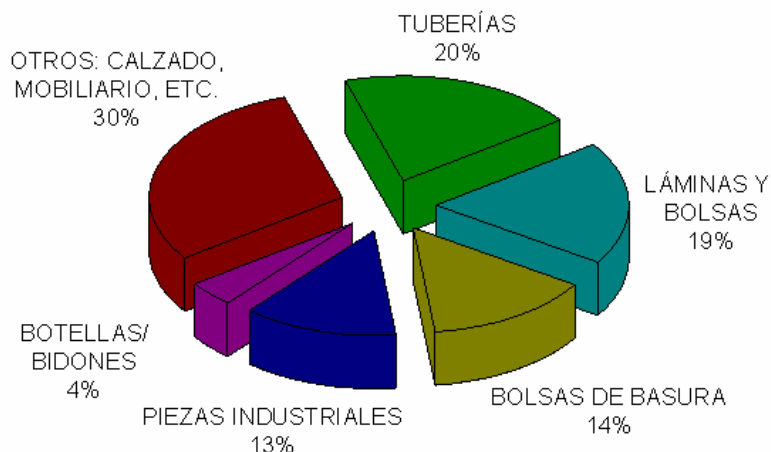
(Fuente: Datos de ADEME)

### 3.3. RECICLAJE DE PLÁSTICOS EN ESPAÑA

En los últimos años se ha producido un progreso importante en el índice de reciclaje, por lo que España se sitúa en primera línea dentro del conjunto de los países europeos. Según datos de la Asociación Nacional de Recicladores de Plásticos (ANARPLA), en el año 2005, los materiales más reciclados en España fueron los polietilenos, con el 21 % para el PEAD y el 39 % para el PEBD, con respecto al total de granza reciclada (figura 5). En la figura 6 se muestran los principales destinos del plástico reciclado en España.



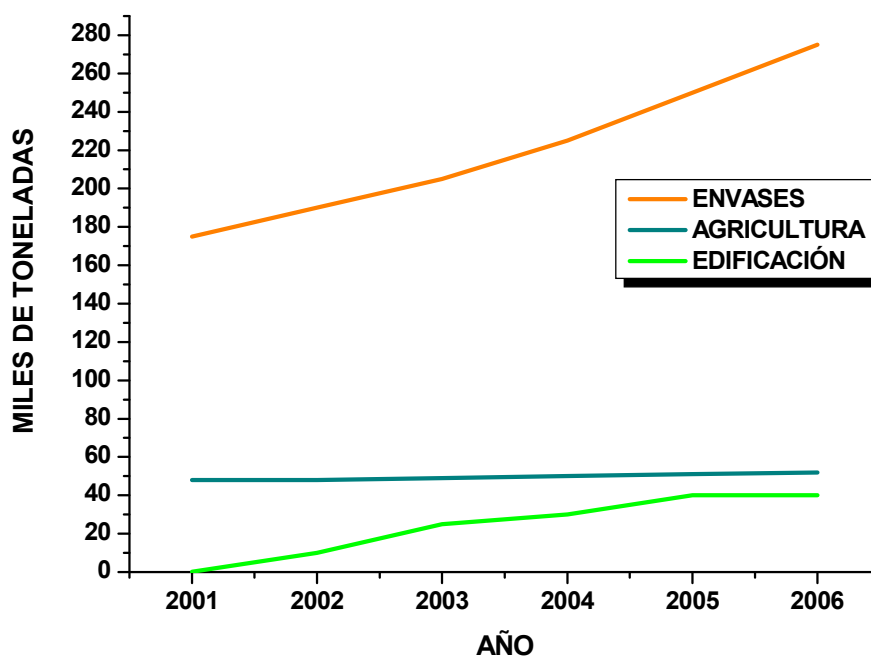
**Figura 5:** Principales plásticos reciclados en España en 2005.  
(Fuente: ANARPLA)



**Figura 6:** Principales aplicaciones de los plásticos reciclados en España.  
(Fuente: Centro Español de Plásticos)

## RESIDUOS PLÁSTICOS URBANOS

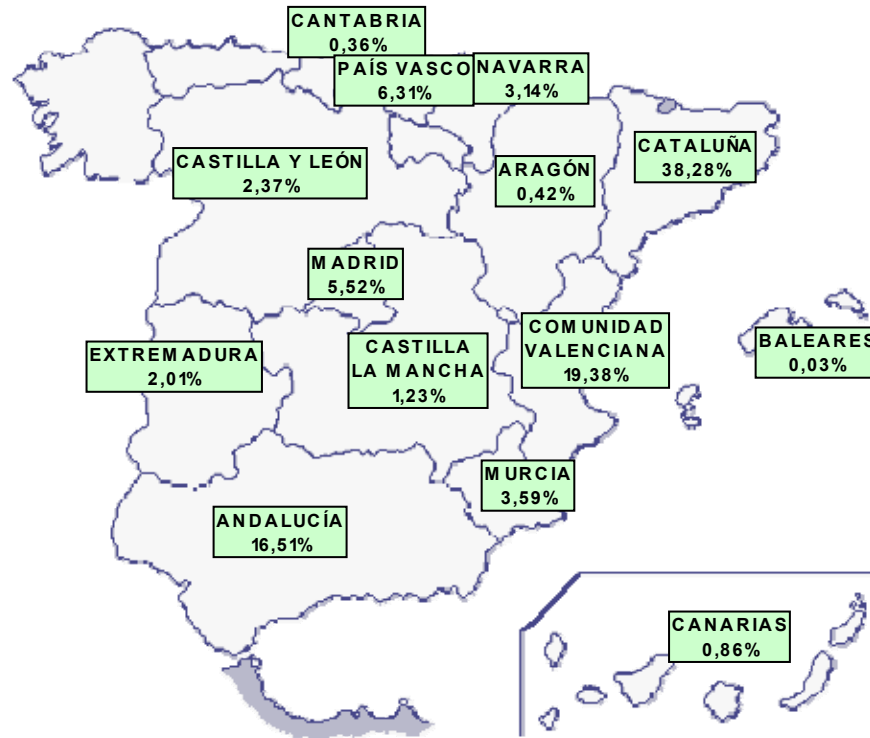
La evolución del reciclaje de residuos poliméricos por sectores según datos de CICLOPLAST, se muestra en la figura 7, en donde el sector de los envases es el que más recicla, siendo además el consumidor más relevante de material plástico.



**Figura 7:** Evolución del reciclaje de residuos plásticos por sectores en España.  
(Fuente: Centro Español de Plásticos)

La distribución porcentual de la producción de reciclaje de plásticos por comunidades españolas en el año 2006 se puede observar en el mapa representado en la figura 8. Cataluña con el 38 %, Andalucía con el 16 % y Valencia con el 19 % suponen el 73 %. Si a estas comunidades se les añade Madrid, el País Vasco, Murcia y Castilla la Mancha, se alcanza el 90 % de las 481.162 toneladas recicladas ese año en España.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.5	Mes: JUNIO Año: 2008
<b>RESIDUOS PLÁSTICOS URBANOS</b>		



**Figura 8:** Distribución del reciclaje de plásticos en España por CC.AA. en 2006.  
(Fuente: CICLOPLAST)

### 3.4. VALORIZACIÓN ENERGÉTICA

La valorización energética es un proceso de recuperación del calor sensible contenido en los gases, el rendimiento obtenido depende de la tecnología y del proceso de valorización y/o combustión empleado <sup>(20)</sup>.

Este procedimiento de recuperación está reservado para aquellas fracciones de residuos plásticos que no pueden ser tratadas por medio del reciclaje mecánico o químico. Este método es aconsejable en el caso de tener materiales plásticos deteriorados, sucios o mezclados con otros materiales difíciles de separar <sup>(10)</sup>.

Los procesos de valorización energética pueden clasificarse en:

#### ➤ **Combustión (incineración)**

La combustión directa o incineración en masa es el sistema más elemental y antiguo de recuperación energética de los RSU. Se define como un proceso exotérmico de oxidación completa de la materia a alta temperatura para convertirla en gas (principalmente dióxido

**RESIDUOS PLÁSTICOS URBANOS**

de carbono y vapor de agua) y cenizas, además de calor, por lo que éste se convierte en el único componente energético útil del proceso. El comburente utilizado es el oxígeno <sup>(21)</sup>.

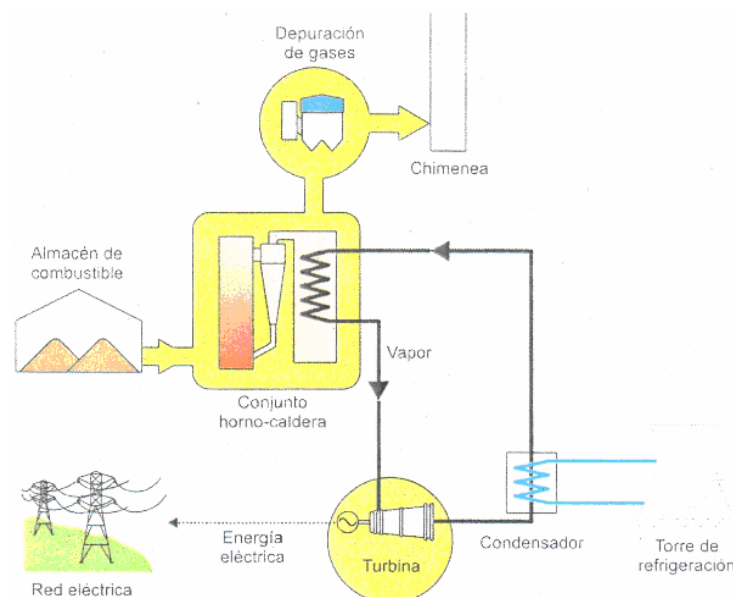
Normalmente es difícil lograr una combustión completa, por lo que en los procesos de combustión reales se suelen originar cantidades diversas de partículas sin quemar que contienen carbono, así como escorias y alquitranes que disminuyen su eficiencia energética y causan problemas medioambientales si no se eliminan adecuadamente.

Actualmente es posible la destrucción térmica de los contaminantes orgánicos contenidos en los residuos mediante la incineración en hornos de lecho fluidizado, sobre todo, de los compuestos formados por dioxinas y furanos mediante una técnica controlada de incineración sin regiones frías ligada a la regulación de la potencia de la combustión a temperaturas superiores a 850 °C <sup>(20)</sup>.

En la figura 9 se presenta un esquema de un sistema de incineración con recuperación de energía.

### ➤ Pirólisis

El proceso de pirólisis consiste en la descomposición térmica de la materia orgánica por la acción del calor en ausencia de oxígeno, denominándose también combustión con defecto de aire. La naturaleza y composición de los productos finales dependen de las propiedades de la naturaleza del residuo tratado, de las condiciones de operación y de los tiempos de residencia del material en el reactor <sup>(18) (19)</sup>.



**Figura 9:** Sistema de incineración con recuperación de energía.  
(Fuente: SOGAMA).

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.5	Mes: JUNIO Año: 2008
<b>RESIDUOS PLÁSTICOS URBANOS</b>		

Los principios de la pirólisis se pueden dividir en dos grandes grupos, aquellos cuya aportación de calor al proceso se lleva a cabo utilizando como combustible la fracción gaseosa de la pirólisis, y aquellos en los que la energía la proporciona la combustión de una parte de la carga <sup>(20)</sup>.

Inicialmente, la pirólisis fue concebida como un método de obtención de productos combustibles, y cada vez se está enfocando más hacia un sistema de recuperación de materias primas susceptibles de ser utilizadas en la síntesis orgánica, es decir, hacia un reciclaje químico <sup>(22)</sup>.

Los sistemas como la pirólisis, cuyo principio de funcionamiento es teórico, generan menos gases que la incineración convencional, pero precisan de un grado de homogeneidad muy alto del residuo, tanto físico como químico, a la entrada del proceso <sup>(20)</sup>.

La pirólisis se desaconseja ya que el balance económico del proceso es negativo debido a las necesidades energéticas que las reacciones químicas endotérmicas requieren. Además los productos obtenidos se encuentran lejos de las especificaciones comerciales por su baja calidad.

#### ➤ **Gasificación**

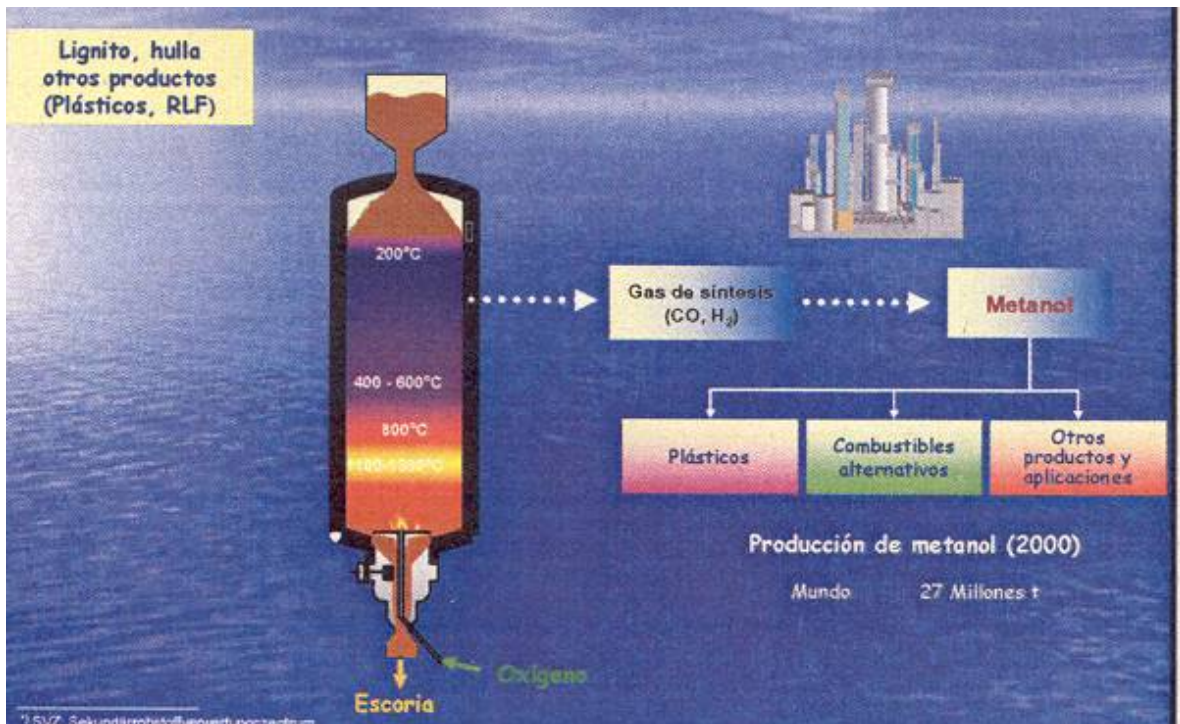
Se entiende por gasificación aquel proceso que lleve implícita una combustión en condiciones de defecto de oxígeno, con producción de monóxido y dióxido de carbono, hidrógeno y metano en proporciones diversas según la composición de la materia prima y las condiciones del proceso.

El proceso de gasificación, aunque nada reciente (en los años veinte se utilizaba el gas de gasógeno obtenido a partir de la gasificación de la madera), ha recibido en estos últimos años un gran impulso tecnológico debido a los excelentes éxitos cosechados por el proceso durante las fases de experimentación en laboratorio o a escala de planta piloto. Este proceso puede utilizarse para la producción de electricidad, tal es el caso de la planta piloto tipo Poligás en Castellón <sup>(23)</sup>.

La mayor parte de las gasificaciones convencionales requieren un material de tamaño de partícula homogéneo, a fin de que pueda garantizarse la constancia de la reacción, y que no presenten un espectro de densidad amplio para evitar en la medida de lo posible segregaciones que puedan ser motivo de acumulación de sólidos o de arrastres excesivos, que constituyen el mayor problema de este sistema <sup>(20)</sup>.

En la figura 10 se muestra un esquema de un gasificador indicando los productos que se obtienen en el proceso.

## RESIDUOS PLÁSTICOS URBANOS

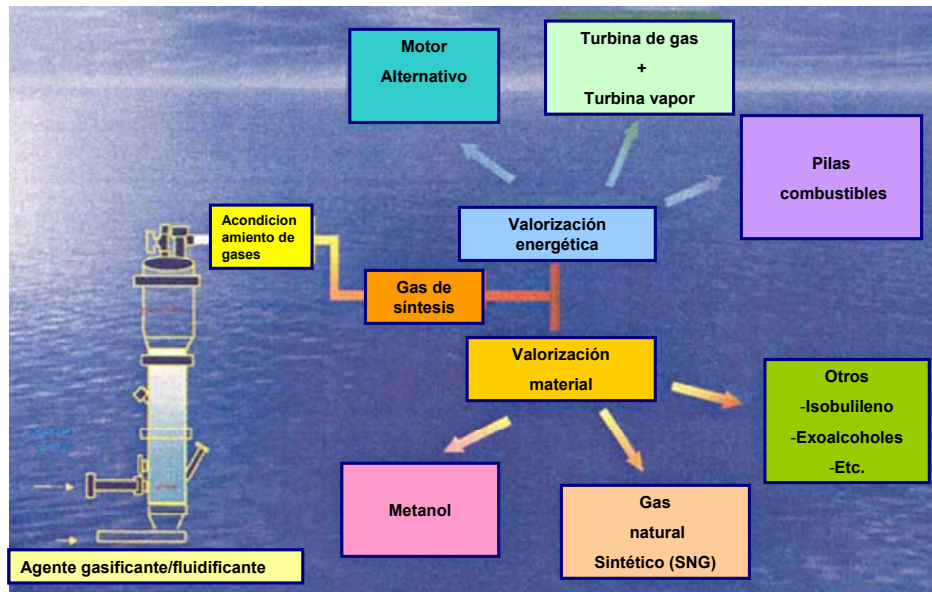


**Figura 10:** Esquema de un gasificador.  
(Fuente: CICLOPLAST)

Existe una gran relación entre los procesos de valorización energética y reciclaje químico. La combinación de ambos puede dar lugar a un mayor aprovechamiento del producto obtenido <sup>(19)</sup>.

En la figura 11 se muestra la transformación del residuo plástico en gas de síntesis mediante un proceso de gasificación. Este producto, a su vez puede someterse a otro proceso de valorización energética para obtener por ejemplo combustibles alternativos, o a un proceso de reciclaje químico para valorizar el material y obtener productos de alto valor añadido como por ejemplo el gas natural sintético.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.5	Mes: JUNIO Año: 2008
<b>RESIDUOS PLÁSTICOS URBANOS</b>		



**Figura 11:** Combinación del reciclaje químico y la valorización energética.  
(Fuente: CICLOPLAST)

### 3.5. APLICACIONES

La demanda potencial de los plásticos reciclados por parte de los mercados finales se basa en los factores siguientes <sup>(24)</sup> <sup>(25)</sup>:

- aceptación del mercado, es decir, aceptación de los transformadores y consumidores.
- aceptación técnica, que se basa en la necesidad de asegurar las prestaciones deseadas de los productos y la idoneidad para el proceso de transformación.

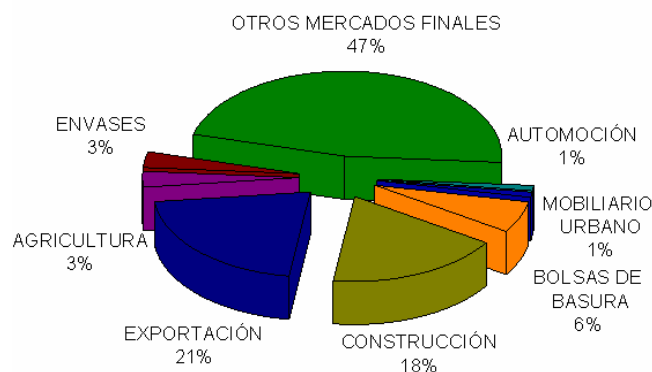
Algunos de los productos que pueden estar fabricados con plástico reciclado son <sup>(24)</sup>:

- **mobiliario urbano** (bancos, iluminación, parques infantiles, etc.), que corresponde al 1 % de los usos del material plástico reciclado en España, como se puede ver en la figura 12. El material destinado para su fabricación es la madera plástica, que lleva fabricándose varios años en Europa y actualmente también en España. Presenta ventajas sobre otros materiales, como su mayor resistencia a la acción de los agentes externos (agua, radiación solar, temperatura, etc.), que lo convierten en un material idóneo para tal fin. Cabe destacar el uso de virutas de madera con residuos plásticos de PEAD, PVC (mobiliario de los jardines infantiles), resinas reforzadas con fibra de vidrio (toboganes acuáticos).
- **envases**, que constituyen el 3 % del destino final de los materiales plásticos reciclados en España (figura 12). Actualmente, más de un 50 % de todos los productos comercializados en Europa se envuelven en material plástico y se espera un aumento notable en la producción de envases. La mayoría de las botellas fabricadas con PET se vuelven a reciclar para obtener otras que no pueden emplearse para consumo humano.



<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.5	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>RESIDUOS PLÁSTICOS URBANOS</b>		

- **construcción de obras públicas urbanas** (losas para aceras, losas para parques y jardines, pavimentos de colegios y edificios públicos, etc.), engloba el 18 % de las aplicaciones del plástico reciclado (figura 12). Este sector es otro de los mercados en expansión para la industria productora de plásticos. El PEAD y el PVC son los materiales más empleados en este campo. De los plásticos generados por este sector, sólo una pequeña proporción se recicla mecánicamente debido a la elevada dilución de los plásticos en los residuos de demolición. Por ello las expectativas de crecimiento del reciclaje en este sector no parecen ser optimistas, sin embargo resulta ser un mercado interesante para los plásticos reciclados.
- **otros destinos finales**, en los que se podría englobar la señalización y el balizamiento entre otros. Los materiales poliméricos más empleados son el PVC y el PEAD, y en porcentajes más bajos el PEMD (polietileno de media densidad). En algunos elementos de balizamiento se están empleando polímeros termoplásticos (cuerpo del cono PVC reciclado) y elastómeros reciclados (base del cono).



**Figura 12:** Destino final de las materias plásticas recicladas en 2002 en España.  
(Fuente: CICLOPLAST)

#### **4.- CONSIDERACIONES MEDIOAMBIENTALES**

La Ley 10/1998, de Residuos, de 21 de abril, establecía en su artículo 3 que tendrían consideración de residuos todos aquellos que figurasen en el Catálogo Europeo de Residuos (CER). Este Catálogo fue aprobado por la Decisión 94/3/CE de 20 de diciembre de 1993, y complementado con la Decisión 94/904/CE, ambas aprobadas en el Real Decreto 952/1997.

Las Decisiones Comunitarias 94/3/CE y 94/904/CE han sido derogadas por la Decisión 2000/532/CE mediante la que se aprueba La Lista Europea de Residuos. La orden MAM/304/2002 de 8 de febrero (con corrección de errores de 12 de marzo), publica en su Anejo 2 la mencionada Lista Europea de Residuos.

Los residuos plásticos urbanos vienen incluidos en la Lista Europea de Residuos en los siguientes Capítulos:

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.5	Mes: JUNIO Año: 2008
<b>RESIDUOS PLÁSTICOS URBANOS</b>		

- 15: residuos de envases; absorbentes, trapos de limpieza; materiales de filtración y ropas de protección no especificados en otra categoría.
  - 15 01 02 Envases de plástico
- 19: residuos de las instalaciones para el tratamiento de residuos, de las plantas externas de tratamiento de aguas residuales y de la preparación de agua para consumo humano y de agua para uso industrial.
  - 19 12 04 Plástico y caucho
- **Ventajas**
  - Aprovechamiento de materias cuyo valor comercial es bajo o nulo.
  - Disminución del volumen de residuos que se depositan en los vertederos.
  - Reducción del suministro de la materia prima original si se tiene en cuenta el ascenso progresivo del precio de la fuente de partida (petróleo), con el consiguiente beneficio en cuanto a impacto ambiental y a protección de los recursos naturales.
  - Producción de energía gracias al elevado poder calorífico de los residuos plásticos.
- **Inconvenientes**
  - Necesidad de clasificar selectivamente los residuos para un correcto reciclaje mecánico.
  - Ciclos limitados de reciclaje mecánico. Los plásticos estándar no toleran más de 5 ó 7 reprocesados ya que sufren modificaciones.
  - Calidad inferior en los productos fabricados en su totalidad con residuos plásticos procedentes del reciclado mecánico. Esto se podría paliar llevando a cabo una adecuada separación que asegure la ausencia de otros contaminantes.
  - Emisión de sustancias tóxicas a la atmósfera y generación de corrientes contaminantes en algunos procesos de valorización energética.
  - Elevado coste por la necesidad de una elevada inversión tecnológica.

## **5.- ASPECTOS ECONÓMICOS**

Las inversiones realizadas en el periodo 2000-2003 para la ejecución de las medidas correspondientes al I Plan Nacional de Residuos Urbanos (I PNRU) se muestran en las tablas 2 y 3. De estos valores puede deducirse que en los cuatro primeros años de vigencia del I PNRU, se ejecutó el 74,60 % del total de las inversiones previstas para el periodo 2000-2006, entre las que destacan las realizadas en el Programa Nacional de Compostaje, Recuperación y

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.5	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>RESIDUOS PLÁSTICOS URBANOS</b>		

Reciclaje, Valorización Energética y Eliminación. Las CC.AA. que realizaron mayores inversiones fueron Madrid, Cataluña y Andalucía.

Por otro lado, en la Versión Preliminar del PNIR 2008-2015 en su Anexo 1: II PNRU 2008-2015 se encuentra el presupuesto fijado para este periodo de tiempo (tabla 4). En él se puede observar que la mayor parte de las inversiones previstas van destinadas a los programas de prevención y reciclaje (36 y 22 %, respectivamente), centrándose principalmente en el desarrollo de una red más amplia de puntos limpios, el apoyo a los programas de I+D+i y el reciclaje de residuos de envases y residuos biodegradables <sup>(26)</sup>.

A modo de ejemplo se muestra en la tabla 5 la evaluación del capital inmovilizado necesario para realizar un proceso de reciclaje mecánico, ya que, actualmente, es la medida más habitual de reciclaje de residuos plásticos.

Con objeto de llevar a cabo esta evaluación es necesario tener en cuenta las distintas etapas que componen el proceso <sup>(27)</sup>.

- La primera operación es el lavado de los plásticos, esto supone un incremento del valor de venta del producto reciclado final, independientemente del tratamiento posterior. El agua utilizada en este lavado se lleva a un sistema de decantación y filtración, para purificarla y emplearla en el enfriamiento de los plásticos a la salida de la extrusora (segunda operación). El resto del agua se recicla en el mismo sistema de lavado.
- La segunda operación es la trituración y posterior extrusión de los plásticos limpios con objeto de homogeneizar el material procedente del producto de partida.
- A la salida de la extrusora y a través de una cinta transportadora el material reciclado se enfría sin sufrir deformaciones, y de forma automática se corta a las longitudes deseadas, que suelen oscilar entre 50 cm y 6 m.
- Finalmente, el material reciclado se transforma en granza en la mayor parte de los casos.

Si no se pretende dar más valor al producto, después de la primera operación, los plásticos limpios pueden ser comprimidos en balas, como en el caso del papel, para su posterior venta, y para ello es necesaria una prensa cuyo coste de adquisición depende de la producción exigida y del tipo de máquina (manual, mecánica, hidráulica, neumática, etc.).

## RESIDUOS PLÁSTICOS URBANOS

RESUMEN DE INVERSIONES PNRU (2000-2003) <sup>(1)</sup>

PROGRAMA	ACTUACIONES	INVERSIONES (x 10 <sup>3</sup> €) (2000-2003)			
		Previstas	Realizadas	%	
I. Prevención y Minimización	Actuaciones de Prevención y Reducción	0,0	0,0	0,0	
	Campañas de Información y Sensibilización	112.641,0	9.964,2	8,8	
		<b>112.641,0</b>	<b>9.964,2</b>	<b>8,8</b>	
II. Recuperación y Reciclaje	Puntos Limpios	139.456,6	57.796,1	41,4	
	Medios de Transporte e Instalaciones Auxiliares	13.925,9	457.661,5	3.286,4	
		<b>153.382,5</b>	<b>515.457,6</b>	<b>336,1</b>	
III. Programa Nacional de Envases y Envases Usados	Contenedores de papel, cartón y vidrio	25.905,1	28.138,2	108,6	
	Contenedores de envases ligeros	50.710,2	29.618,5	58,4	
	Instalaciones auxiliares	4.708,2	59.067,2	1.254,6	
	Plantas de clasificación	303.466,7	97.099,5	32,0	
		<b>384.790,2</b>	<b>213.923,4</b>	<b>55,6</b>	
IV. Programa Nacional de Compostaje	Contenedores Fracción Fermentables	22.974,3	9.748,0	42,4	
	Medios de transporte e instalaciones auxiliares	6.956,8	46.533,4	668,9	
	Plantas de clasificación y compostaje	311.433,6	155.701,1	50,0	
	Plantas de compostaje y/o biometanización	308.874,5	250.568,5	81,1	
		<b>650.239,2</b>	<b>462.551,0</b>	<b>71,1</b>	
V. Valorización energética	Plantas con Recuperación Energética	432.467,7	57.415,7	13,3	
	Plantas sin Recuperación Energética	30.200,4	46,0	0,2	
		<b>462.668,1</b>	<b>57.461,7</b>	<b>12,4</b>	
VI. Eliminación	VI.1. Clausura, sellado y recuperación de vertederos incontrolados	289.387,6	184.280,7	63,7	
	VI.2. Construcción de nuevas instalaciones de clasificación y vertederos	E. de Transferencia	116.214,7	69.337,5	59,7
		Adecuación vertederos	70.555,4	128.527,6	182,2
		Vertederos	122.279,8	122.225,2	99,9
		<b>598.537,5</b>	<b>504.371,3</b>	<b>84,3</b>	
VII. Sensibilización Información	VII.1. Programas de sensibilización pública y concienciación ciudadana	7.993,5	* 98.554,6	1.232,9	
	VII.2. Programas de formación de personal especializado	39.965,5	* 213,0	0,5	
		<b>47.958,0</b>	<b>* 98.767,6</b>	<b>205,9</b>	
VIII. Control estadístico	Creación de sistemas de información y base datos	21.996,3	* 5.484,3	24,9	
		<b>21.996,3</b>	<b>* 5.484,3</b>	<b>24,9</b>	
I + D	I + D	73.949,7	* 1.741,9	2,4	
		<b>73.949,7</b>	<b>* 1.741,9</b>	<b>2,4</b>	
<b>TOTAL</b>		<b>2.506.162,5</b>	<b>*1.869.723,0</b>	<b>74,6</b>	

<sup>1</sup> No se dispone de los datos correspondientes al trienio 2004-2006.

\* Se incluyen las inversiones realizadas por Ecovidrio y Ecoembes.

Nota explicativa.-

La mayor parte de estas inversiones se han financiado, total o parcialmente, a través de los Fondos de Cohesión, y en su contabilidad el reparto por programas no se ha correspondido nominalmente con la desagregación que figuraba en el I PNRU. Por esta razón, inversiones que en el Plan estaban contempladas en el Programa I (Prevención y minimización) fueron asignadas a otros programas distintos, en particular el II (Recuperación y Reciclaje) y el VII (Sensibilización e Información). Quiere ello decir que las inversiones reales realizadas en el marco del Programa I fueron, en realidad, en el periodo 2000-2003, aproximadamente, del mismo orden de magnitud que las previstas.

**Tabla 2**

Cuadro Resumen de Inversiones PNRU (2000-2003).  
(Fuente: PNIR 2008-2015. Versión Preliminar)

## RESIDUOS PLÁSTICOS URBANOS

Inversiones realizadas en el periodo 2000-03 (x1000 €).

CCAA	P.I	P.II	P.III	P.IV	P.V	P.VI	P.VII	P.VIII	I+D	TOTAL
Andalucía	248,1	31.348,1	44.484,7	69.016,6	12.024,4	34.778,6	8.176,5	13,0		200.091,0
Aragón		2.750,1	816,9			11.977,9	32,3			15.577,2
Asturias		819,8	2.994,2	2.810,7		3.065,2	339,7		26,8	10.056,4
Baleares	44,8	762,5	5.519,1	52.343,6		21.808,9	4.328,3	458,8		85.266,0
Canarias		7.455,3	16.836,6	10.688,4		14.804,0	113,9	29,5		49.827,7
Cantabria		6549,4	3.084,4	12.049,5	29.378,0	1.049,9	313,3	5,7		52.430,2
Castilla y León		9051,4	27.324,2	35.988,0		39.462,4	61,2	80,5		111.967,7
Castilla-La Mancha		22.145,6	8.723,9	16.873,8		10.014,9				57.758,2
Cataluña	1.894,5	67432,9	17.910,3	58.629,7	8.180,3	73.625,2	84.163,9	2.323,0	230,1	294.389,9
Ceuta		4,2	33,1			1.702,5	140,9			1.890,7
Extremadura	280,8	11.421,8	10.325,1	4.031,4		6.557,3	209,6	12,0	128,3	32.966,4
Galicia	674,3	22.174,5	6.381,7	50.146,5	6.595,0	46.906,5	4.095,2			136.973,7
La Rioja	299,9	82,9	464,1	1.264,5		1.771,9	428,6			4.311,8
Madrid	6.521,7	311.825,2	35.638,0	118.745,2	1.260,0	205.202,3	6.209,9	525,0		685.927,3
Melilla		3,9	2,6			15,0				21,5
Murcia		14.142,7	327,5	864,8		6.975,0				22.109,8
Navarra		425,3	254,9	2.290,5		765,4				3.736,1
País Vasco		2.392,9	4.087,8	928,4	24,0	9.507,1	1.002,9	6,0	21,6	17.968,7
C. Valenciana		4.868,2	28.614,3	26.081,8		14.581,3				73.945,4
Total	9.964,2	515.457,6	213.923,4	462.551,0	57.461,7	504.371,3	89.616,2	3.453,5	406,8	1.857.205,7

Fuentes: MMA, MAP, MEH, CCAA, EELL, Consorcios de RSU, Entidades privadas.

P.I. PREVENCIÓN  
P.II. RECUPERACIÓN Y RECICLAJE  
P.III. RESIDUOS DE ENVASES Y ENVASES USADOS  
P.IV. COMPOSTAJE  
P.V. VALORIZACIÓN ENERGÉTICA  
P.VI. ELIMINACIÓN  
P.VII. CONTROL ESTADÍSTICO  
P.VIII. CONCIENCIACIÓN CIUDADANA Y FORMACIÓN  
I+D-i. INVESTIGACIÓN + DESARROLLO + INNOVACION

Tabla 3

Cuadro de Inversiones realizadas en el periodo 2000-2003.  
(Fuente: PNIR 2008-2015. Versión Preliminar)

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.5	Mes: JUNIO Año: 2008
<b>RESIDUOS PLÁSTICOS URBANOS</b>		

**Tabla 4**

Presupuesto en M€ para el periodo 2008-2015.  
(Fuente: PNIR 2008-2015. Versión Preliminar. Anexo 1: II PNRU 2008-2015)

<b>1.- Programa de Prevención</b>		
- Red de nuevos Puntos Limpios (1.800) (*)		900
- I+D+i para promover la innovación tecnológica dirigida a la prevención (*)		600
- Elaboración de Planes de Prevención		40
	<b>TOTAL</b>	<b>1.540</b>
<b>2.- Programa de Reutilización</b>		
- Programa de implantación de mejoras técnicas para promover la reutilización (*)		540
	<b>TOTAL</b>	<b>540</b>
<b>3.- Programa de reciclaje:</b>		
- Envases		360
- Tratamiento de residuos biodegradables:		
• Compostaje		324
• Biodigestión		200
- Otros		60
	<b>TOTAL</b>	<b>944</b>
<b>4.- Programa de Valorización Energética</b>		
- Infraestructuras gestión residuos		25
- Adaptación de las incineradoras de RU existentes		70
- Estudios		8
	<b>TOTAL</b>	<b>103</b>
<b>5.- Programa de Eliminación</b>		
- Clausura, sellado y recuperación de vertederos		60
- Construcción de nuevos vertederos		120
- Adaptación de vertederos		60
- Estaciones de transferencia		100
	<b>TOTAL</b>	<b>340</b>
<b>6.- Programa de Información y Control Estadístico</b>		
- Sistemas de información e inventarios		40
	<b>TOTAL</b>	<b>40</b>
<b>7.- Programa de Concienciación y Formación</b>		
- Campañas de sensibilización social (*)		120
- Programa de formación de personal especializado (*)		100
	<b>TOTAL</b>	<b>220</b>
<b>8.- Programa de I+D+i</b>		
- Apoyo a los programas de I+D+i (*)		540
	<b>TOTAL</b>	<b>540</b>
	<b>TOTAL PNRU</b>	<b>4.267</b>

(\*) Inversiones de carácter horizontal: 2.800 M €

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.5	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>RESIDUOS PLÁSTICOS URBANOS</b>		

EQUIPO	CAPACIDAD (kg/h)	COSTE (€)
Lavadora	500	4.500
Trituradora	100	9.000
Extrusora	100	4.000
Extrusora manual	100	2.000
Tolva		450-5.000
Prensa		1.000-12.000
Sistema de enfriamiento, cinta y cortadora		11.200
Sistema de depuración de agua de lavado		12.000

**Tabla 5**

Evaluación de los costes del capital inmovilizado del reciclaje mecánico.

(Fuente: Grupo Emisor)

## 6.- NORMATIVA TÉCNICA

- UNE 53972:1996 EX: Plásticos. Polipropileno (PP) reciclado. Características y métodos de ensayo. (Revisada, en Información Pública).
- UNE 53978:1997 EX: [Plásticos. Materiales de polietileno \(PE\) reciclado. Características y métodos de ensayo.](#) (Revisada, en Información Pública).
- UNE 53979:2001: [Plásticos. Poli\(cloruro de vinilo\) \(PVC\) reciclado. Características y métodos de ensayo.](#) (Revisada, en Información Pública).
- UNE-EN 13437:2004: [Envases y embalajes y reciclado de material. Criterios para los métodos de reciclado. Descripción de los procesos de reciclado y diagramas de flujo.](#)
- UNE-EN 13440:2003: [Envases y embalajes. Tasa de reciclado. Definición y método de cálculo.](#)
- UNE-EN 13965-1:2007: Caracterización de residuos. Terminología. Parte I: Términos y definiciones relativos a los materiales.
- UNE-EN 13965-2:2007: Caracterización de residuos. Terminología. Parte II: Términos y definiciones relativos a la gestión.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: <b>4.5</b>	Mes: <b>JUNIO</b> Año: <b>2008</b>
<b>RESIDUOS PLÁSTICOS URBANOS</b>		

- UNE-EN 15342:2007: Plásticos. Plásticos reciclados. Caracterización de reciclados de poliestireno (PS).
- UNE-EN 15343:2007: Plásticos. Plásticos reciclados. Trazabilidad y evaluación de conformidad del reciclado de plásticos y contenido en reciclado.
- UNE-EN 15344:2007: Plásticos. Plásticos reciclados. Caracterización de reciclados de polietileno (PE).
- UNE-EN 15345:2007: Plásticos. Plásticos reciclados. Caracterización de reciclados de polipropileno (PP).
- UNE-EN 15346: Plásticos. Plásticos reciclados. Caracterización de reciclados de poli(cloruro de vinilo) (PVC). (Versión española de EN 15346: 2007, Prueba de Composición).
- UNE-EN 15347:2007: Plásticos. Plásticos reciclados. Caracterización de residuos plásticos. (Versión española de EN 15347: 2007, Prueba de Composición).
- UNE-EN 15348:2007: Plásticos. Plásticos reciclados. Caracterización de reciclados de poli(tereftalato de etileno) (PET). (Versión española de EN 15348: 2007, Prueba de Composición).
- UNE-EN ISO 472:2002: Plásticos. Vocabulario.
- UNE-EN ISO 1872-1:2001: Plásticos. Materiales de polietileno (PE) para moldeo y extrusión. Parte 1: Sistemas de designación y bases para las especificaciones.
- UNE-EN ISO 1872-2:2007: Plásticos. Materiales de polietileno (PE) para moldeo y extrusión. Parte 1: Preparación de probetas y determinación de propiedades.
- UNE-EN ISO 1133:2001: Plásticos. Determinación del índice de fluidez de materiales termoplásticos en masa (IFM) y en volumen (IFV).
- UNE-EN ISO 1183-1:2004: Plásticos. Métodos para determinar la densidad de plásticos no celulares. Parte 1: Método de inmersión, método del picnómetro líquido y método de valoración.

## **7.- REFERENCIAS**

- [1] Instituto Peruano de Investigación y Tecnología para la Industria Plástica (INPEPLAS).  
[http://www.huanucoagrario.gob.pe/documentos/publicaciones/items/I\\_N\\_P\\_E\\_P\\_L\\_A\\_S.doc](http://www.huanucoagrario.gob.pe/documentos/publicaciones/items/I_N_P_E_P_L_A_S.doc).
- [2] Universidad Nacional de Educación a Distancia  
<http://www.uned.es/biblioteca/rsu/pagina7.htm>
- [3] “Estudio del sector del plástico”. Ed. Centro Español de Plásticos. 2007.



<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.5	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>RESIDUOS PLÁSTICOS URBANOS</b>		

- [4] PARREÑA, A. Ingeniería Química, p.183, 2004.
- [5] II Congreso Nacional de Demolición y Reciclaje, 27-29 mayo, 2004. Zaragoza.
- [6] MARTÍNEZ, T. Plásticos Modernos, 591 (90), p. 216, 2005.
- [7] GEOSOPPIO  
[http:// www.plasticos.geoscopio.com](http://www.plasticos.geoscopio.com)
- [8] ARANDES, J.M.; BILBAO, J.; LÓPEZ VALERIO, D. Revista Iberoamericana de Polímeros, 5 (1), p. 28, 2004.
- [9] VILLORIA, M. E.; CASTILLO, F.; PICO, M. P.; SOLERA, R. y BLANCO, M. Ingeniería Civil, 146, p.55, 2007.
- [10] Fundación para la Investigación y el Desarrollo Ambiental (FIDA).  
<http://www.fida.es/>
- [11] ECOPORTAL  
<http://www.ecoport.net>.
- [12] Grupo Ambienta.  
<http://greenfield.fortunecity.com/buzzard/67/plastico.htm>
- [13] AGUADO, J.; SERRANO, D.; ESCOLA, J. M.; SAN MIGUEL, G. Plásticos Modernos, 570 (86), p.539, 2003.
- [14] LAZZARI, M.; LÓPEZ-QUINTELA, M. A. Anales de la Real Sociedad Española de Química, 101 (2), p. 57, 2005.
- [15] APME (Association of Plastics Manufacturers in Europe). Plásticos Modernos, 545 (82), p. 510, 2001.
- [16] SERRANO, D.P.; AGUADO, J.; ESCOLA, J. M.; GARAGORRI, E. Plásticos Modernos, 542 (82), p.539, 2001.
- [17] "Recyclage chimique des matières plastiques". Ed. Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME). Rapport final. 2002.
- [18] KAMISNKY, W.; HARTMANN, F. Angew. Chem. Int. Ed., 39, p. 331, 2000.
- [19] RAY, R.; THORPE, R.B. International Journal of Chemical Reactor Engineering, 5, Article A85, 2007.
- [20] BERMÚDEZ ALVITE, J.D. Gestión de los Residuos Urbanos. Situación actual y perspectivas futuras. SOGAMA. 2005.
- [21] KIRAN, N.; EKINCI, E.; SNAPE, C.E. Resources, Conservation and Recycling, 29, p. 273, 2000.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.5	Mes: JUNIO Año: 2008
<b>RESIDUOS PLÁSTICOS URBANOS</b>		

[22] MUÑOZ, A. Cuadernos del CIFCA, 19. 1980.

[23] GARO ENGEENERING  
<http://www.garoeng.com/principal.swf>

[24] VILLORIA, M. E.; CASTILLO, F.; PICO, M. P.; SOLERA, R. y BLANCO, M. Ingeniería Civil, 147, p.79, 2007.

[25] Plásticos universales.  
<http://www.plastunivers.com/Tecnica/Hemeroteca/ArticuloCCompleto.asp?ID=6281>

[26] MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE. II Plan Nacional de Residuos Urbanos 2008-2015 (II PNRU). Plan Nacional Integrado de Residuos (PNIR) 2008-2015. Versión preliminar. 27 de noviembre de 2007.

[27] GRUPO EMISON  
<http://www.emison.com>

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.5	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>RESIDUOS PLÁSTICOS URBANOS</b>		

## **8. BIBLIOGRAFÍA DE INTERÉS**

- “El reciclado de plásticos en España”. Ed. Asociación Nacional de Recicladores de Plástico (ANARPLA). 1996.
- “Estudio técnico comercial para la difusión y fomento del uso y aplicaciones de la granza reciclada de plásticos”. Ed. Asociación Nacional de Recicladores de Plástico (ANARPLA). 1999.
- “Generación, reciclado y mercados de los residuos plásticos en España”. Ed. Asociación Nacional de Recicladores de Plástico (ANARPLA). 2001.
- “Polymer Recycling”. Scheirs, J. Ed. Wiley. 2001.
- “Residuos Plásticos: Técnicas de tratamiento y valorización”. García Muñoz, R. Universidad Rey Juan Carlos.
- GARRY HOWELL, S. Journal of Hazardous Materials, 29, p. 143, 1992.
- Boletín N° 2008/1/64 de ANARPLA.
- Boletín N° 2007/12/63 de ANARPLA.
- Boletín N° 2007/10/61 de ANARPLA.
- Boletín N° 2007/9/60 de ANARPLA.
- Boletín N° 2006/12/52 de ANARPLA.
- Boletín N° 2006/10/50 de ANARPLA.
- Boletín N° 2006/9/49 de ANARPLA.
- Boletín N° 2006/1/42 de ANARPLA.
- Ley 11/1997 de Envases y Residuos de Envases.
- Ley 10/1998 de Residuos.
- Directiva del Consejo 75/442/CEE, de 15 de julio de 1975, relativa a los residuos (con las modificaciones de la Directiva del Consejo 91/156/CEE, de 18 de marzo de 1991) (DOCE núm. L 194, de 27 de julio de 1975, y núm. L 78, de 26 de marzo de 1991).
- Directiva 91/156/CEE del Consejo de 18 de marzo de 1991 por la que se modifica la Directiva 75/442/CEE relativa a los residuos. Diario Oficial N° L 078 de 26/03/1991, págs. 0032-0037.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 4.5	Mes: JUNIO Año: 2008
<b>RESIDUOS PLÁSTICOS URBANOS</b>		

- Directiva 94/62/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 20 de diciembre de 1994, relativa a los envases y residuos de envases. Diario Oficial N° L 365 de 31/12/1994, págs. 0010-0023.
- Decisión 96/350/CE, de la Comisión, de 24 de mayo de 1996, por la que se adaptan los anexos II A y II B de la Directiva 75/442/CEE, del Consejo, relativa a los residuos (DOCE, núm. L 135, de 6 de junio de 1996).
- Directiva 2004/12/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 11 de febrero de 2004 por la que se modifica la Directiva 94/62/CE relativa a los envases y residuos de envases.
- Directiva 2005/20/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 9 de marzo de 2005 por la que se modifica la Directiva 94/62/CE relativa a los envases y residuos de envases.
- Directiva 2006/12/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 5 de abril de 2006 relativa a los residuos.
- CER. resolución de 17 de noviembre de 1998, de la dirección general de calidad y evaluación ambiental, por la que se dispone la publicación del catálogo europeo de residuos (CER), aprobado mediante la decisión 94/3/CE, de la comisión, de 20 de diciembre de 1993.
- ANARPLA  
<http://www.anarpla.es/>
- Asociación Española de Empresarios de Plásticos (ANAIP).  
<http://www.anaip.es/>
- CICLOPLAST  
<http://www.cicloplast.com/>
- Fundación Plásticos y Medio Ambiente.  
<http://greenfield.fortunecity.com/buzzard/67/plastico.htm>.
- SOGAMA  
<http://www.sogama.es/>

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 5.1	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>RECICLADO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS</b>		
Nombre en inglés: Reclaimed Asphalt Pavements (RAP)		



RECICLADO IN SITU DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

## 1.- ORIGEN

Se entiende como reciclado de firmes, la reutilización de los materiales procedentes de la demolición de las capas de firmes que ya han estado en servicio, en la construcción de otras nuevas.

El reciclado de pavimentos asfálticos se realiza sobre materiales deteriorados que han perdido en gran medida sus propiedades iniciales, aunque en casos muy especiales puede actuarse también sobre materiales en condiciones de servicio para mejorar sus características. El reciclado es, en unos casos, una alternativa al fresado y reposición de firmes, o a la reconstrucción, y en otros, constituye un aprovechamiento de los materiales fresados, que de otra manera irían a vertedero.

La Orden Circular 8/2001 de la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento, sobre reciclado de firmes, recoge en su anejo los tres primeros artículos del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Conservación de Carreteras (PG-4) con los que se comienza su redacción:

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 5.1	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>RECICLADO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS</b>		

- Artículo 20: Reciclado in situ con emulsión de capas bituminosas.
- Artículo 21: Reciclado in situ con cemento de capas de firme.
- Artículo 22: Reciclado en central en caliente de capas bituminosas.

Estos artículos serán de aplicación en los Pliegos de Prescripciones Técnicas Particulares para obras de conservación de carreteras, mientras se supera la tramitación en el ámbito europeo y son aprobados por el Ministerio de Fomento.

En el apartado 542.2.2, Áridos, de la nueva redacción dada en el artículo 542 del PG-3, Mezclas bituminosas en caliente, en la Orden FOM/891/04 se especifica textualmente que “En cumplimiento del Acuerdo de Consejo de Ministros de 1 de junio de 2001 por el que se aprueba el Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición 2001-2006, podrán emplearse como áridos, el material procedente del reciclado de mezclas bituminosas en caliente en proporciones inferiores al diez por ciento (10%) de la masa total de mezcla”.

## 2.- VOLUMEN Y DISTRIBUCIÓN

La European Asphalt Pavement Association (EAPA), dentro de la cual se encuentra la Asociación Española de Fabricantes de Mezclas Asfálticas (ASEFMA), recogió en el año 2006 las estadísticas correspondientes al reciclado que se muestran en la siguiente tabla:

País	(t) Material asfáltico reciclable disponible	% Realmente usado en reciclado en caliente	% Usado en reciclado en frío	% De la producción de las nuevas mezclas en caliente que contengan material reciclado
Austria	600.000	10	10	5.0
Bélgica	1.300.000	50	-	36
República Checa	604.400	30	50	10
Dinamarca	240.000	>80	-	53
Francia	6.500.000	13	< 2	< 10
Alemania	14.000.000	82	18	60.0
Hungría		15	0	0.6
Irlanda	48.000	38	0	2.1
Italia	14.000.000	18	2	-
Países Bajos	3.400.000	80	20	65
Noruega	590.000	7	26	8
Polonia	1.000.000	4	55	0.2
Eslovaquia	1.250	-	-	-
Eslovenia	22.000	50	10	15
España	690.000	30	15	5.0
Suecia	650.000	50	50	40
Suiza	945.000	50	50	-
Reino Unido	5.000.000	-	-	-

Fuente: EAPA (European Asphalt Pavement Association). Asphalt in Figures, 2006.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 5.1	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>RECICLADO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS</b>		

Hasta el año 1996 fue la Red de Carreteras del Estado la que más utilizó el reciclado de pavimentos asfálticos de firmes, pero a partir de este año cogieron el relevo las Comunidades Autónomas y especialmente Castilla y León, y Andalucía.

Según datos facilitados por ANTER (Asociación Nacional Técnica de Estabilizados de Suelos y Reciclado de Firmes), durante el año 2005 en nuestro país se han reciclado in situ con emulsión unos 118.000 m<sup>3</sup> de materiales, e in situ con cemento unos 330.000 m<sup>3</sup>.

### **3.- VALORIZACIÓN** <sup>(1) a (4)</sup>

El proceso de reciclado de pavimentos asfálticos consiste en la disgregación del material, su mezcla con ligantes y/o agua, y su posterior extensión y compactación. El tratamiento de los materiales reciclados puede hacerse en el mismo firme del que proceden, o transportarse a una central de mezcla para, tras su tratamiento, emplearse en la misma u otra localización. Pueden establecerse varias clasificaciones del reciclado de materiales de firmes de carreteras con pavimento asfáltico: según el lugar en que se lleva a cabo el reciclado (in situ o en planta), según la temperatura a la que se realice (en caliente o en frío), según el material que se recicle (materiales bituminosos, materiales tratados con cemento, capas granulares), según el ligante empleado (sin ligante; con ligante bituminoso: betún o emulsión; con conglomerante hidráulico: cemento o cal; mixto: generalmente, emulsión y cal o cemento), y según se recicle con o sin adición de materiales nuevos.

#### **3.1.- RECICLADO EN CENTRAL**

##### **3.1.1.- Reciclado en central en caliente**

Las técnicas especiales de reciclado en central en caliente se refieren únicamente a mezclas bituminosas.

Para el reciclado en caliente, las mezclas se retiran de la carretera y se transportan a una central de fabricación donde, en caliente, se mezcla con árido virgen y betún, obteniéndose una mezcla bituminosa compuesta en parte por material reciclado. Aunque pueden obtenerse mezclas compuestas en un 100% por material antiguo, lo más usual es que el porcentaje se encuentre por debajo del 50%.

Se han desarrollado equipos que permiten el reciclado tanto en centrales continuas como discontinuas, distinguiéndose en la actualidad dos técnicas distintas:

- a) La **técnica del sobrecalentamiento del árido virgen de aportación**, utilizada en las centrales discontinuas, en la que éste se calienta a temperaturas elevadas (200-275°C, según la tasa de reciclado) para que, al entrar en contacto con el material reciclado no calentado, la temperatura del conjunto sea la deseada. En el mezclador se añade el ligante que se vaya a utilizar. Dentro de esta técnica existen varias posibilidades, según dónde se introduzca el material reciclado (en el mezclador o en las tolvas en caliente). El procedimiento convencional tiene una limitación en la proporción del material reciclado sobre el total de la mezcla fabricada, del 25-30%, para que la temperatura inicial de los

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 5.1	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>RECICLADO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS</b>		

áridos no sea excesiva (<220 °C), ya que, si no, se podría producir una degradación del ligante en el primer contacto. El procedimiento del sobrecalentamiento de los áridos fue el más utilizado en los primeros tiempos, hasta que surgieron y se generalizaron las centrales de tambor-secador-mezclador.

b) La **técnica del calentamiento indirecto**, empleada en las centrales continuas de tambor-secador-mezclador, en la que en la parte frontal del tambor se introducen los áridos, que se secan y calientan; en medio del tambor se introduce la mezcla que se va a reciclar, y en la parte posterior del tambor se añade el betún. Los áridos actúan como una pantalla para evitar la acción directa de la llama sobre el material reciclado. La mezcla antigua se calienta por transferencia del calor de los áridos. Los materiales se van moviendo a lo largo del tambor por el giro de éste, produciéndose un flujo continuo de material durante todo el proceso. La necesidad de mantener una pantalla de áridos delante de la mezcla reciclada limita de nuevo la proporción de material reciclado en la mezcla final. En la práctica suele irse a proporciones del 10-30%. La temperatura empleada en el proceso es la usual en estas centrales (160 °C).

No hay limitaciones en el espesor de la capa del firme que se puede tratar con esta técnica. Las posibles limitaciones relativas al material que se va a reciclar se refieren a mezclas con sustancias peligrosas o contaminantes, mezclas con betunes muy envejecidas y materiales que contengan una cantidad importante de lechadas bituminosas.

La economía de la operación depende evidentemente del porcentaje de material reciclado en la mezcla final y de las condiciones del transporte, tanto de la mezcla reciclada como de los áridos nuevos. En general, pueden darse ahorros entre el 5% y el 30% del coste de la mezcla.

Los países con legislación más estricta sobre el reciclado en caliente admiten únicamente mezclas con un 10% de material reciclado; aunque es más frecuente encontrar porcentajes admitidos del 25-40%, según el empleo que se vaya a hacer de la mezcla. En algunos países, se admiten incluso mayores porcentajes, siempre que se garantice la homogeneidad del material. No suelen utilizarse prescripciones técnicas para el reciclado en central, recurriéndose a las mismas que para la mezcla.

En nuestro país, el **artículo 22 del nuevo PG-4** hace referencia a la técnica de reciclado en central en caliente de capas bituminosas. A los efectos de la aplicación de este artículo, una mezcla bituminosa reciclada deberá contener una proporción en masa de material bituminoso a reciclar entre el 10% y el 50% de la masa total de la mezcla.

### 3.1.2.- Reciclado en central en frío

El reciclado en frío en central no presenta características especiales. Se lleva a cabo con áridos procedentes de capas granulares o con mezclas fresadas de las capas del firme.

Cuando se reutiliza para capas bituminosas, el material se mezcla con emulsión en centrales continuas de mezcla en frío, o en centrales de gravacemento modificadas para incorporar la emulsión. El proceso de fabricación es análogo al de una gravaemulsión. Las únicas limitaciones en el proceso son las que puedan deducirse de la granulometría o de los excesos de ligante en el



<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 5.1	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>RECICLADO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS</b>		

material reciclado, que pueden exigir una corrección por aportación de material granular. El ahorro conseguido depende de nuevo de las condiciones de la operación.

En la reutilización para capas tratadas con cemento, el proceso de fabricación es análogo al del suelocemento.

### 3.2.- RECICLADO IN SITU

El reciclado in situ se realiza disgregando el material del firme antiguo que se recicla, mezclándolo in situ con el ligante o conglomerante utilizado y, posteriormente, extendiéndolo y compactándolo para constituir una capa del firme.

El reciclado in situ presenta varias **ventajas** en comparación con las técnicas de refuerzo simple, fresado y reposición, o reciclado en central:

- a) Económicas: es la técnica de reciclado que lleva a mayores ahorros económicos, al no ser necesario el transporte a la central ni el de vuelta a la obra. También se producen ahorros por el empleo de una mezcladora móvil frente a una central fija de mezcla.
- b) Energéticas: hay menos consumo de energía en el proceso, especialmente en el reciclado in situ en frío.
- c) De conservación de recursos (frente al refuerzo y al fresado y reposición): menor utilización de áridos (una capa de 10 cm en un kilómetro de calzada de 7 m de anchura consume unas 1.700 t de áridos), de betún y de espacios de vertido en su caso.
- d) Técnicas (en comparación con el recrecimiento), que se pueden resumir en:
  - Se consiguen mejoras estructurales, manteniendo o modificando levemente la rasante (de interés en aplicaciones urbanas, túneles y obras de paso, o en aplicaciones no urbanas en las que se quiera evitar el recrecimiento de arcenes o barreras).
  - Permite la rehabilitación estructural de carriles individualizados, de gran importancia en calzadas de sentido único y más de un carril, en las que los deterioros más importantes se dan en los carriles sometidos al tráfico pesado.
  - No necesita ensanchar la plataforma ni recrecer los arcenes para la operación.
  - Permite la colocación, en su caso, de las capas nuevas de refuerzo sobre material no deteriorado, consiguiéndose así una mayor vida de servicio.

Sin embargo la técnica presenta también algunos **inconvenientes**:

- Las características de la capa regenerada dependen en gran manera de las de las capas tratadas y, especialmente, de su homogeneidad, sobre todo en los reciclados con emulsión.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 5.1	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>RECICLADO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS</b>		

- Es difícil controlar el material fabricado y, sobre todo actuar rápidamente con medidas correctoras.
- Se necesita una longitud mínima de tratamiento para que la operación sea rentable.
- Es una operación más lenta que la del estricto refuerzo con capas bituminosas.

Existen varios tipos de reciclado in situ: en caliente, mixtos y en frío.

### 3.2.1.- Reciclado in situ en caliente

Se trata de una técnica aplicable a materiales bituminosos. El reciclado se realiza in situ con unos equipos especiales, provistos de calefactores, que elevan la temperatura de la superficie del firme y facilitan la disgregación del material. El elemento básico del equipo es el escarificador o fresador-calentador. Generalmente, el calentador consiste en unos paneles de rayos infrarrojos, que calientan la superficie a temperaturas entre 120 °C y 160 °C. Suele haber una serie de paneles que precalientan la superficie y eliminan la humedad, y una o dos series (si se reciclan más de 2-3 cm, ya que suele hacerse en dos etapas) que aplican la temperatura final. El equipo de escarificado está provisto de dientes de acero con puntas de carborundo, aunque a veces se utilizan fresadoras convencionales. El material suelto se mezcla con un betún blando o un agente rejuvenecedor. La técnica puede llevarse a cabo con o sin aportación de árido nuevo, realizando la operación de mezcla el mismo equipo. La extensión suele hacerse con una extendidora convencional que acompaña al equipo. La compactación debe realizarse muy rápidamente, y es un punto crítico de la operación.

Existen tres modos básicos de aplicar esta técnica:

**El termorreperfilado**, que consiste únicamente en calentar, fraccionar, remezclar (con adición o no de agente rejuvenecedor) y recompactar los 2-3 cm superiores del firme. Se aplica para corregir ligeros deterioros superficiales, o como tratamiento previo a un refuerzo posterior, de manera que se consiga una buena adherencia entre las capas antiguas y las nuevas.

**La termorregeneración**, que consiste en el calentamiento y fraccionamiento de los 3-5 cm superiores del firme y la aplicación de una capa fina de refuerzo (2-3 cm), con la compactación simultánea del conjunto. Se aplica para corregir problemas de regularidad longitudinal o transversal, pérdida de material superficial, y para superficies deslizantes o permeables, con las ventajas derivadas de disponer una nueva rodadura. A veces, va precedida de la eliminación por fresado de los 2-3 cm que se van a aportar de material nuevo, para mantener la rasante.

**El termorreciclado**, que consiste en el calentamiento y fraccionamiento del material, la adición de ligante o rejuvenecedor y áridos nuevos si es necesario, la remezcla del conjunto y la compactación del material resultante. Generalmente trata de resolver problemas de envejecimiento del ligante o defectos de formulación de la mezcla, y suele aplicarse en espesores de 4 a 8 cm.

El rendimiento de la operación es del orden de 200-350 m de carril por hora.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 5.1	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>RECICLADO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS</b>		

La **ventaja de este método** frente al reciclado en frío es que degrada menos los áridos, y que aprovecha más la capacidad aglomerante del betún de la mezcla antigua. Los principales **inconvenientes** son que no soluciona problemas estructurales y que el calentamiento oxida y fragiliza el betún. La emisión de humos, los peligros de quemaduras a los operarios, o los sobrecalentamientos, por paradas de la máquina, han limitado también en parte la aplicación.

### 3.2.2.- Reciclado in situ mixto

Consiste en el fresado en frío y mezcla posterior en una central continua móvil de tambor secador, con doble tambor que sigue al equipo de fresado. La mezcla se realiza a temperaturas de 150 °C –180 °C, y en el proceso se pueden añadir rejuvenecedores y áridos si es necesario.

### 3.2.3.- Reciclado in situ en frío

El reciclado en frío in situ se realiza con equipos específicos multifunción que fresan el material y lo mezclan con agua y el conglomerante o ligante seleccionado, realizándose todo el proceso a temperatura ambiente. Con la técnica del reciclado in situ se pueden reciclar capas de mezcla bituminosa, de materiales granulares o tratados con cemento, o conjuntos de estas capas. Es muy importante tener en cuenta que sólo conviene reciclar materiales deteriorados y no zonas sanas que, generalmente, tendrán unas características mecánicas superiores a las del material reciclado.

Las **ventajas** principales frente al reciclado en caliente son: la falta de emisión de humos, el empleo de menos energía, y la posibilidad de reciclar un mayor espesor de firme.

Los **inconvenientes** son la falta de aprovechamiento de la capacidad aglomerante del betún antiguo, el tiempo necesario para la apertura al tráfico, y la regularidad final de la capa, ya que al afectar en general a mayores espesores que otros tipos de reciclados, haberse degradado más la granulometría y realizarse en frío, suele llevar a compactaciones difíciles.

Los reciclados en frío in situ más usuales son los que utilizan como ligante base una emulsión o como conglomerante el cemento.

**El reciclado in situ con emulsión** <sup>(6) (7) (8)</sup> se basa en el fresado o disgregación del material que se va a tratar, seguido de una mezcla de este material con agua, emulsión (y áridos nuevos si es necesario) y, en algunos casos, cal o cemento. Los espesores de reciclado no pueden superar en general los 15 cm.

**La técnica de reciclado con cemento** <sup>(9) (10)</sup> es muy interesante para carreteras que necesitan una reconstrucción total. Se reciclan espesores de hasta 35 cm, mezclando el material disgregado con cemento y agua. Es un tratamiento muy eficaz, con el que se consiguen de manera económica firmes de gran robustez.

Otra técnica de reciclado en frío in situ es la de **reciclados mixtos emulsión-cemento/cal**.

En esta técnica existen dos aproximaciones:

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 5.1	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>RECICLADO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS</b>		

Por un lado, se llega a ella desde los reciclados con emulsión, para evitar los problemas asociados a la plasticidad de los materiales que se reciclan, o en algunos casos los debidos a falta de cohesión, o para acelerar el curado de la capa. Suelen utilizarse porcentajes del 1-1,5% de cal o de cemento.

Por otro, se está experimentando con los reciclados mixtos desde la perspectiva del reciclado con cemento, para flexibilizar el material y evitar los problemas de retracción. Suele irse entonces a dotaciones del 4-5% de cemento y 2-3% de emulsión.

Una de las últimas novedades dentro de la técnica del **reciclado** con productos bituminosos es el **empleo de espuma de betún**, con el objetivo de poder estabilizar materiales con gran contenido de finos y abaratar el proceso.

Frente al reciclado en frío, la principal ventaja es la del menor coste de la operación. El inconveniente es la peor envuelta del producto.

### 3.3.- OBRAS REALIZADAS <sup>(3), (11) a (20)</sup>

Las técnicas de reciclado de firmes se han venido utilizando paralelamente a otras técnicas de carretera, conociéndose aplicaciones en algunos países ya a principios de siglo. No obstante, hasta los años setenta su empleo fue muy escaso. A partir de la crisis de precios del petróleo del año 1973, se impulsó con gran fuerza, principalmente en Estados Unidos. En este país se pasó de 50.000 t de mezclas bituminosas recicladas en el año 1975, a 25 millones en el año 1980 y actualmente se rondan los 45 millones de toneladas. La generalización de la técnica llevó aparejada la continua aparición de nuevos equipos y productos.

En España, después de unas tímidas aplicaciones a mediados de los años 80 con reciclado en central e in situ en caliente, en el año 1991 se realizaron dos obras importantes de la mano de empresas españolas con participación francesa, mediante la técnica del reciclado in situ. Fueron dos reciclados en frío, uno con emulsión y el otro con cemento. Posteriormente, el interés de la técnica facilitó su empleo en otras obras. La idea del reciclado está teniendo una gran aceptación, existiendo actualmente equipos de reciclado in situ propiedad de empresas españolas.

En los últimos años se han realizado en nuestro país obras de distintos tipos de reciclado de firmes con pavimento bituminoso, entre las que se pueden señalar:

- **Reciclado en caliente en central:** N-230 en la provincia de Lleida (2004). Autopistas A-7, tramo en la provincia de Murcia entre Puerto Lumbreras y el límite de la provincia de Almería, reciclado al 50% (2005).
- **Reciclado in situ en caliente:** N-VI, tramo de 60 km en la provincia de Zamora entre Mombuey y el límite de la provincia de Orense, reciclado el 100% de la mezcla asfáltica con betún modificado.
- **Reciclado in situ con emulsión:** N-630, tramo en la provincia de Cáceres, entre Cañaveral y Cáceres, en que se han empleado rejuvenecedores.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 5.1	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>RECICLADO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS</b>		

- **Reciclado in situ con cemento:** A-2511, tramo en la provincia de Teruel entre Fonfría y Allueva

#### **4.- CONSIDERACIONES MEDIOAMBIENTALES**

En nuestro país, la Ley 10/1998, de Residuos, de 21 de abril, establecía en su artículo 3 que tendrían consideración de residuos todos aquellos que figurasen en el Catálogo Europeo de Residuos (CER). Este Catálogo fue aprobado por la Decisión 94/3/CE de 20 de diciembre de 1993, y complementado con la Decisión 94/904/CE, ambas aprobadas en el Real Decreto 952/1997.

Las Decisiones Comunitarias 94/3/CE y 94/904/CE han sido derogadas por la Decisión 2000/532/CE mediante la que se aprueba La Lista Europea de Residuos. La orden MAM/304/2002 de 8 de febrero (con corrección de errores de 12 de marzo), publica en su Anejo 2 la mencionada Lista Europea de Residuos.

Las mezclas bituminosas están incluidas en el capítulo 17 de la Lista Europea de Residuos (LER), "Residuos de construcción y demolición", con los siguientes códigos:

- 17 03 01 Mezclas bituminosas que contienen alquitrán de hulla.
- 17 03 02 Mezclas bituminosas distintas de las especificadas en el código 17 03 01.

Los residuos de las primeras están considerados como peligrosos.

El reciclado de los materiales constitutivos de los firmes lleva consigo la conservación de los recursos naturales y el ahorro de espacio en vertederos públicos. Al tratar de reutilizar los materiales del firme hay que analizar la posible presencia en su composición de elementos potencialmente peligrosos para el medio ambiente.

Aunque hay pocos estudios sobre la afección medioambiental de estos residuos, hay uno, realizado en EEUU sobre los lixiviados de este tipo de residuos recuperados según el método TCLP (Toxicology Characteristic Leaching Procedure) y SPLP (Synthetic Precipitation Leaching Procedure). Los resultados han permitido concluir que estos residuos no causan riesgos medioambientales<sup>(22)</sup>. En ninguno de los estudios franceses se ha encontrado presencia de metales pesados ni de benzopirenos. Tampoco son esperables concentraciones de metales traza. Sin embargo, se podrían señalar otros motivos para la precaución en temas de riesgo medioambiental, como son: la posible contaminación causada por algunos de los constituyentes (ligantes, aditivos..), contaminantes de origen externo provenientes de la corrosión de protecciones metálicas<sup>(23)</sup>, además de la presencia de alquitrán. En el caso de la valorización mediante tratamiento en planta hay que mencionar la posible contaminación por emisión de gases. En el laboratorio francés LCPC se está investigando la emisión de gases a la atmósfera que producen las centrales de reciclado.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 5.1	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>RECICLADO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS</b>		

## **5.- ASPECTOS ECONÓMICOS**

Las técnicas de reciclado de pavimentos asfálticos contribuyen al aprovechamiento tanto del betún como de los áridos existentes en las capas asfálticas del firme antiguo, pudiendo utilizarse en su propia rehabilitación o en la construcción de firmes nuevos en las proximidades. Con estas técnicas se consigue un ahorro de los materiales naturales, lo que supone una ventaja tanto económica como medioambiental.

En algunos municipios el precio del vertido es de tarifa única, como es el caso de Madrid (25.20 euros / t) o Las Palmas (9.19 euros / t). Sin embargo, lo general en otros municipios es establecer la tarifa dependiendo de la naturaleza del material. Por ejemplo, en el vertedero de Aizmendi en Guipuzcoa la tarifa por verter materiales asfálticos, alquitranes o betunes es de 10.00 euros / t.

## **6.- NORMATIVA TÉCNICA**

La ORDEN FOM/3459/2003 (BOE del 12/12/2003), aprobó la **norma 6.3-IC “Rehabilitación de firmes”** de la Instrucción de Carreteras, que establece los criterios que permiten seleccionar y proyectar la solución idónea de rehabilitación de un firme de carretera.

En el apartado 7.2 de la norma, Actuaciones de rehabilitación estructural, entre las soluciones que se citan se hace referencia en primer lugar a la *“eliminación parcial y reposición del firme existente, incluyendo el reciclado de los materiales de acuerdo con lo expuesto en el apartado 7.4”*. En este apartado se comentan los Criterios de aplicación de las técnicas de reciclado de firmes, indicando que se tienen que tener en cuenta las limitaciones y prescripciones que se mencionan a continuación:

- *“En carreteras con categoría de tráfico pesado T00 no se podrán utilizar en ningún caso materiales reciclados.”*
- *“En carreteras con categoría de tráfico pesado T0 no se podrán utilizar en ningún caso las técnicas de reciclado in situ en frío (con emulsión bituminosa o con cemento). Únicamente se podrán emplear mezclas bituminosas en caliente recicladas en central en el recrecimiento de arcenes, siempre que sobre ellas se disponga posteriormente como mínimo una capa de rodadura. También podrá ser aplicable este último tipo de material reciclado en capas de reposición en calzada cuando sobre ellas se coloquen capas de recrecimiento con mezclas bituminosas en caliente en un espesor total mínimo de 10 cm”*
- *“En carreteras con categoría de tráfico pesado T1 se podrán utilizar las mezclas bituminosas en caliente recicladas en central en los mismos supuestos indicados para carreteras con categoría de tráfico pesado T0, considerando, en este caso, que sobre las capas de reposición con mezclas bituminosas recicladas en central deben colocarse capas de recrecimiento con mezclas bituminosas en caliente en un espesor total mínimo de 6 cm. Además podrán emplearse mezclas bituminosas recicladas in situ con emulsión bituminosa en arcenes cuando sobre este material se disponga como mínimo una capa de rodadura. También podrá ser aplicable este último tipo de material reciclado en capas de reposición en calzada cuando sobre ellas se coloquen capas de recrecimiento con mezclas bituminosas en caliente en un espesor total mínimo de 8 cm”.*

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 5.1	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>RECICLADO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS</b>		

- “Para carreteras con categorías de tráfico pesado T2 a T4, incluidas las vías de servicio no agrícolas de autovías y autopistas, podrán utilizarse todas las técnicas de reciclado indicadas, así como el reciclado in situ con cemento, con la condición de disponer sobre cualquiera de ellas, como mínimo, una capa de mezcla bituminosa en caliente del tipo densa (D) o semidensa (S)”.

En el anejo a la Orden Circular 8/2001 de la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento, sobre reciclado de firmes, se recogen las especificaciones relativas a los tipos de reciclado considerados en la norma, en los siguientes artículos del nuevo **Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Conservación de Carreteras (PG-4)**:

- Artículo 20.- Reciclado in situ con emulsión en capas bituminosas.
- Artículo 21.- Reciclado in situ con cemento de capas de firme.
- Artículo 22.- Reciclado en central en caliente de capas bituminosas.

Asimismo, en la nueva redacción del artículo 542 del **PG-3** propuesta según ORDEN FOM/891/04 se admite la posibilidad de emplear como áridos para mezclas bituminosas en caliente el material procedente del reciclado de estas mezclas en proporciones inferiores al 10% de la masa total de mezcla.

## **7.- REFERENCIAS**

- [1] RUIZ RUBIO, A. “Reciclado de pavimentos (Primera parte)”, Rutas, nº 65, 11-20. 1998.
- [2] RUIZ RUBIO, A. “Reciclado de pavimentos (Segunda parte)”, Rutas, nº 66. 1998.
- [3] RUIZ RUBIO, A. “Reciclado de firmes: balance de las actuaciones y perspectivas. Aspectos técnicos y económicos”, IV Congreso Nacional de Firmes, Reciclado de Firmes., Ponencia 1. Segovia, junio, 1998.
- [4] RUIZ RUBIO, A. “Panorámica general de las técnicas de reciclado de firmes”, Jornada sobre “Técnicas de reciclado de materiales para capas de firme. Experiencias en la A-92”. Granada, noviembre, 2000.
- [5] BUTTON, J.W.; LITTLE, D.N.; ESTAKHRI, C.K. “Hot In-Place Recycling of Asphalt Concrete”, Synthesis of Highway Practice 193, National Cooperative Highway Research Program, TRB. Washington, DC, 1990.
- [6] FERNÁNDEZ DEL CAMPO, J.A. “Tratado de estabilización y reciclado de capas de firme con emulsión asfáltica”, Asociación Española de la Carretera, Primera edición. Abril, 1998
- [7] CEDEX; CENTRO DE INVESTIGACIÓN ELPIDIO SÁNCHEZ MARCOS. “Jornada sobre Reciclado de Capas de firme con emulsión”. Madrid, 1996.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 5.1	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>RECICLADO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS</b>		

- [8] EPPS, J.A. "Cold-Recycled Bituminous Concrete Using Bituminous Materials", Synthesis of Highway Practice 160, National Cooperative Highway Research Program, TRB. Washington, D.C. 1990.
- [9] Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA). "Jornadas sobre Reciclado con Cementos de Firmes". Cáceres, junio, 1995.
- [10] JOFRÉ, C.; KRAEMER, C.; DÍAZ MINGUELA, J. "Manual de firmes reciclados in situ con cemento", Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones. 1999.
- [11] HIERSCHKE, E.U. "Reciclado de Materiales bituminosos en Europa", Programa SPRINT de Transferencia de Tecnología e Innovaciones en la Construcción de Carreteras, Carreteras, nº 69, 29-43. 1994.
- [12] INTEVÍA. "Reciclado de firmes y pavimentos". Madrid, septiembre, 1996.
- [13] INTEVÍA. "Curso sobre Explanadas Estabilizadas y reciclado de Firmes". Madrid, noviembre, 1999.
- [14] IV CONGRESO NACIONAL DE FIRMES. "Reciclado de firmes". Segovia, junio, 1998.
- [15] V CONGRESO NACIONAL DE FIRMES. "Las Capas de Base para Firmes de Carreteras". León, mayo, 2000.
- [16] VI CONGRESO NACIONAL DE FIRMES. "Normalización e Innovación". León, mayo, 2004.
- [17] VII CONGRESO NACIONAL DE FIRMES. Ávila, mayo, 2006.
- [18] I CONGRESO ANDALUZ DE CARRETERAS. "Construcción de carreteras en climas semiáridos". Granada, febrero, 1998.
- [19] II CONGRESO ANDALUZ DE CARRETERAS. "Carreteras y ciudadanos. El Derecho a la Movilidad". Cádiz, febrero, 2000.
- [20] III CONGRESO ANDALUZ DE CARRETERAS. "Carreteras para una sociedad en desarrollo". Sevilla, octubre, 2003.
- [21] TURNER-FAIRBANKS HIGHWAY RESEARCH CENTER AND FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION, "Uset Guidelines for Waste and By-product Materials in Pavement Construction", 2002.
- [22] TOWNSEND, T.G. "Leaching characteristics of asphalt road waste" Department of Environmental Engineering Sciences, University of Florida, 1998.
- [23] JULLIEN ET AL, " Bilan environmental d'un chantier de recyclage"



<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 5.1	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>RECICLADO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS</b>		

## 8. ENTIDADES DE CONTACTO

- CEDEX (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas)  
Centro de Estudios del Transporte  
Autovía de Colmenar Viejo km 18,2  
28790 – El Goloso (Madrid)  
Tel.: 91.3357800  
Fax.: 91.3357822
- IECA (Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones)  
C/ José Abascal nº 53  
28003 Madrid  
Tel.: 91.4429311  
Fax.: 91.4427294

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 5.2	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>RECICLADO DE PAVIMENTOS DE HORMIGÓN</b>		
Nombre en inglés: Reclaimed Concrete Pavements (RCP)		



DEMOLICIÓN DE PAVIMENTOS DE HORMIGÓN PARA SU RECICLADO

### **1.- ORIGEN**

Se entiende como reciclado de firmes, la reutilización de los materiales procedentes de su demolición en la construcción de nuevas capas.

El reciclado se realiza sobre materiales deteriorados que han perdido en gran medida sus propiedades iniciales. En el caso de firmes con pavimento de hormigón, en función de su nivel de deterioros se pueden plantear distintas alternativas de conservación, desde reparaciones locales del pavimento existente, en todo su espesor o en parte, la estabilización de losas, el fresado, el sellado de grietas y juntas, el drenaje del firme y la reparación de arcones, hasta el refuerzo del firme con otros pavimentos, asfálticos o de hormigón, o su reconstrucción.

Si el análisis de las distintas alternativas de conservación lleva a seleccionar como más adecuada la reconstrucción del pavimento existente, se debe considerar la posibilidad de reciclarle, basándose en: el coste y la disponibilidad de áridos en el entorno de la obra, la idoneidad de los áridos procedentes del reciclado para el uso que se les quiera dar, los costes de llevar el material a vertedero y las consideraciones medioambientales<sup>(1)</sup>.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 5.2	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>RECICLADO DE PAVIMENTOS DE HORMIGÓN</b>		

## **2.- VOLUMEN Y DISTRIBUCIÓN**

Este tipo de reciclado se plantea en obras concretas de reconstrucción de firmes de pavimento de hormigón.

En la actualidad, existen en la Red de Carreteras del Estado 914 km de calzadas con pavimento de hormigón con un volumen estimado de este material de 1,7 x 106 m3.

En el apartado 3.5 de esta ficha se enumeran experiencias habidas en nuestro país en el reciclado de pavimentos de hormigón.

## **3.- VALORIZACIÓN**

El proceso de reciclado de pavimentos de hormigón lleva consigo su demolición y posterior procesamiento en plantas de machaqueo, para la obtención de materiales utilizables en la construcción de nuevas capas de firmes.

Las consideraciones recogidas en los siguientes apartados son también válidas para el reciclado de capas de base de hormigón magro, hormigón compactado y, en gran medida, de gravacemento.

### **3.1.- DEMOLICIÓN <sup>(2)(3)(4)</sup>**

En la demolición de los firmes con pavimento de hormigón deben extraerse separadamente los materiales procedentes de las distintas capas y tomar precauciones para eliminar aquellos materiales que, como los hormigones dañados por reacciones silico-alcálicas, no sean aprovechables.

Con la demolición del pavimento se trata fundamentalmente de reducir el material a un tamaño que haga fácil su manejo y transporte hasta una planta de machaqueo, y separar lo máximo posible los elementos metálicos que contenga.

Existen en la actualidad diferentes equipos que se pueden utilizar en la demolición de pavimentos de hormigón. Su selección depende de las circunstancias de cada obra: tipo de hormigón, su resistencia e integridad, la utilización que se vaya a dar al material demolido, etc. Los equipos más habituales son los martillos hidráulicos, los fracturadores de impacto y las mandíbulas hidráulicas; en los últimos años se han desarrollado nuevos equipos, como los fracturadores de chorro de agua a alta presión y los de resonancia.

Los **martillos hidráulicos** montados en retroexcavadoras, a pesar de sus bajos rendimientos - en torno a los 50 m<sup>2</sup>/h-, se han utilizado habitualmente en la demolición de pavimentos de hormigón, fundamentalmente cuando las losas tienen un espesor importante como sucede en los aeropuertos.

Los **fragmentadores de impacto** rompen el pavimento al dejar caer sobre el mismo guillotinas o mazas metálicas. El rendimiento de estos equipos está influido por una serie de factores, como el espesor de las losas, la resistencia del hormigón, la cantidad y distribución del acero, y la capacidad de soporte de la base de apoyo del pavimento.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 5.2	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>RECICLADO DE PAVIMENTOS DE HORMIGÓN</b>		

En cada obra habrá que ajustar el número de pasadas del fragmentador, su velocidad de avance y la altura de caída de las masas. La energía de impacto debe también controlarse para minimizar el daño a las capas subyacentes y las obras de drenaje. El espaciamiento habitual es de 60 cm en losas de hormigón en masa, reduciéndose a unos 15 cm en las losas armadas, para poder retirar las armaduras haciendo posible su carga con pala. En losas de hormigón en masa de 20 cm de espesor se obtienen rendimientos del orden de 150 m<sup>2</sup>/h.

Las **mandíbulas hidráulicas**, montadas sobre equipos tractores, son capaces de ejercer una fuerza en su cierre sobre el material aprisionado, que procede de la demolición primaria, reduciendo sensiblemente su tamaño y facilitando, en su caso, la separación de armaduras antes del procesamiento en plantas de machaqueo.

Los **fracturadores de chorro de agua a alta presión**, con rendimientos de aproximadamente 10 m<sup>2</sup>/h, están indicados cuando se trata de eliminar un cierto espesor de las losas afectadas por deterioros superficiales, en pavimentos sobre tableros de puentes y en hormigón armado, rompiendo el hormigón que rodea a las armaduras sin dañarlas. Con estos equipos se consigue un coeficiente de reducción muy alto, y no se afecta la integridad de las capas subyacentes a la zona tratada.

Los **fracturadores por resonancia** permiten la trituración de losas de hormigón armado de hasta 30 cm de espesor en trozos no superiores a 25 mm, con rendimientos de 400 a 500 m<sup>2</sup>/h, así como la completa separación de la armadura y el hormigón.

Una vez fracturado el pavimento de hormigón, es necesario removerlo, generalmente por medio de rippers, separar los elementos metálicos, en su caso, y cargar el material para transportarlo a las plantas de machaqueo. Generalmente, la separación de las armaduras de los pavimentos de hormigón armado se realizan "in situ", mientras que la de los pasadores y barras de atado se suele hacer en las plantas. La carga del material conviene hacerla con palas de neumáticos, que afectan menos a las bases de apoyo.

### 3.2.- PROCESAMIENTO EN PLANTAS DE MACHAQUEO <sup>(2)(3)(4)</sup>

El machaqueo del material demolido puede hacerse en plantas fijas o móviles "in situ".

Las **plantas fijas** son similares a las utilizadas para áridos naturales. Tras una primera fase de separación de los bloques con exceso de armadura metálica o demasiado grandes, el material se somete a un machaqueo primario mediante machacadoras de mandíbulas; en la cinta de salida de éstas se coloca un separador magnético que recupera los elementos metálicos, barras y pasadores de acero. El proceso continua con el machaqueo secundario, en el que se utilizan machacadoras de impacto, obteniéndose, tras su cribado y clasificación, un material de granulometría adecuada a su utilización posterior.

Las **plantas móviles** están constituidas en la mayoría de los casos por una machacadora de mandíbulas o de impacto sobre orugas, que se mueve en función del ritmo de realización del trabajo. La alimentación se realiza mediante una pala de carga que accede por un terraplén o por rampas móviles. En estas plantas puede producirse una variación más amplia en el huso granulométrico debido a los desgastes y los ajustes periódicos a que debe ser sometida la machacadora.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 5.2	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>RECICLADO DE PAVIMENTOS DE HORMIGÓN</b>		

Las plantas móviles constituyen la solución más económica para grandes proyectos debido a la reducción de gastos de transporte que se obtiene.

### 3.3.- PROPIEDADES DEL MATERIAL PROCESADO <sup>(3)(5)</sup>

#### Propiedades físicas

La granulometría del material procesado se adapta a las especificaciones que se exigen para las distintas aplicaciones. En general, el contenido de finos (< 0,08 mm) es muy reducido.

El árido reciclado, al proceder del machaqueo, tiene formas muy angulares. Además, debido al contenido de mortero adherido a los áridos naturales con los que se fabricó el hormigón, tiene su textura superficial más áspera, su densidad más baja, y su porosidad y capacidad de absorción de agua más altas, que las de los áridos de partida del mismo tamaño. Al disminuir el tamaño del árido reciclado, disminuye también la densidad y aumenta la absorción.

En la bibliografía internacional se indica que los áridos reciclados de tamaño superior a 4,75 mm presentan una buena resistencia a la abrasión (coeficiente de desgaste Los Ángeles entre 20 y 45) y a la acción de los sulfatos, así como una elevada capacidad de soporte (índices CBR entre 95 y 150).

#### Propiedades químicas

La composición química de los áridos reciclados refleja en gran medida la de los áridos que constituyen el hormigón de partida. Los componentes químicos del cemento son la causa de la alta alcalinidad de estos materiales en contacto con el agua (pH>11).

El material reciclado puede estar contaminado con cloruros procedentes de las sales utilizadas como fundentes en la vialidad invernal o con sulfatos, si el pavimento ha estado en contacto con suelos ricos en ellos.

### 3.4.- APLICACIONES

#### 3.4.1.- Obras de tierra y terraplenes<sup>(11)</sup>

Los áridos reciclados procedentes de la demolición de pavimentos de hormigón pueden utilizarse en la ejecución de **terraplenes y rellenos**, pero esta valorización no es coherente con el principio de jerarquía, ya que existen otras valorizaciones que aprovechan mucho mejor las posibilidades de este tipo de residuos. Son residuos que, debido a sus características, tanto en estado natural, tratados, o mezclados con otros presentan las mejores posibilidades de valorización.

Según la norma francesa NF P 11-300, estos residuos están adscritos a la familia F7, subproductos industriales, y para su empleo en terraplén, hay que tener en cuenta la homogeneidad de los mismos, su granulometría, así como la ausencia de armaduras y contaminantes. Para su empleo en explanada, la norma francesa requiere la eliminación de los tamaños superiores a 50 mm y de los finos, si el azul de metileno es superior a 0,2. Cuando se emplean en terraplén, relleno o explanada suelen utilizarse los materiales resultantes del pretratamiento y los áridos reciclados no clasificados, con un tratamiento previo muy reducido

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 5.2	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>RECICLADO DE PAVIMENTOS DE HORMIGÓN</b>		

como es un machaqueo primario para satisfacer las exigencias de tipo granulométrico, y en su caso, la eliminación de armaduras.

Algunas administraciones norteamericanas de carreteras permiten el empleo de trozos de pavimento demolido, siempre que no se supere el tamaño máximo (150-200 mm) Para evitar problemas de corrosión, estos materiales no deben estar en contacto en presencia de agua con tuberías de aluminio o acero galvanizado.

### 3.4.2.- Firmes de carreteras <sup>(1) a (6)</sup>

La aplicación más común de los áridos reciclados procedentes de pavimentos de hormigón es en **capas de base o subbases granulares de nuevos firmes, tratadas o sin tratar**, siendo su proceso de almacenamiento y puesta en obra similar al de los áridos convencionales, si bien se debe tener especial cuidado para evitar la segregación de los áridos reciclados.

Cuando se utilizan en capas granulares sin tratar, aunque inicialmente la capacidad de soporte puede ser menor que en las capas granulares convencionales, debido a la mayor dificultad para su compactación, a lo largo del tiempo se suele cementar, igualando o superando la capacidad de soporte de otros materiales granulares. Generalmente, se mezcla el material reciclado con arena de aportación que mejora su trabajabilidad y disminuye su permeabilidad. En secciones de firmes dotadas de drenaje subterráneo, es recomendable lavar los áridos previamente a su puesta en obra, para evitar que la precipitación de los lixiviados pueda obstruir los elementos de drenaje.

El tratamiento de los áridos reciclados con cemento o ligantes bituminosos aumenta la resistencia del material y reduce su permeabilidad y la posibilidad de lixiviados.

Los áridos reciclados pueden también utilizarse en la **fabricación de hormigones**. Sus aplicaciones más habituales en capas de firmes son como hormigón magro, hormigón vibrado (con rodadura de 4 cm de hormigón con áridos naturales), capas de base de hormigón y hormigón en pavimentos de arcenes. En todos estos casos, solamente se utilizarán los áridos procedentes de la demolición de pavimentos de hormigón cuyos deterioros no sean imputables a la acción de la helada, reacciones árido /álcali, ataques de sulfatos o la acción de las sales fundentes; si lo fueran, los áridos obtenidos deberán emplearse en capas granulares no tratadas.

El proceso de diseño, fabricación y puesta en obra de los hormigones en los que se utilizan los áridos reciclados es similar al de los hormigones con áridos naturales, pero hay que tener en cuenta algunas consideraciones:

- La **alta absorción** de los áridos reciclados hace que sea necesaria una mayor cantidad de agua de amasado que cuando se emplean áridos naturales.

Los áridos reciclados tienen el riesgo potencial de absorber agua de la mezcla si no se mantienen convenientemente saturados antes de su amasado.

- Se debe prestar especial atención al **contenido de áridos finos** reciclados (< 10 mm) en el nuevo hormigón. La trabajabilidad del hormigón fabricado con áridos reciclados depende en gran medida del contenido de áridos finos, no utilizándose altos contenidos debido a su angulosidad y alta absorción. El porcentaje óptimo se debe fijar en cada proyecto,

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: <b>5.2</b>	Mes: <b>DICIEMBRE</b> Año: <b>2007</b>
<b>RECICLADO DE PAVIMENTOS DE HORMIGÓN</b>		

recomendándose entre el 10 y 20%, completando hasta el contenido total de árido fino con arenas naturales.

- Hay que cuidar especialmente **el curado** de los hormigones fabricados con áridos reciclados de pavimentos de hormigón. **La retracción y la fluencia** en el hormigón fabricado con un contenido de árido grueso reciclado inferior al 20% del total son sensiblemente similares a las del fabricado totalmente con áridos naturales. Si el contenido de árido grueso reciclado aumenta hasta el 100%, la retracción puede aumentar hasta un 50% y la fluencia entre un 30 y un 60%, aumentado aun más si se utiliza árido fino reciclado.
- **La resistencia** del nuevo hormigón se mantiene sensiblemente para sustituciones de hasta el 30% del árido por árido reciclado. La resistencia a compresión del hormigón disminuye ligeramente (10-20%) cuando la totalidad del árido grueso es reciclado <sup>(7)</sup> <sup>(8)</sup> ; esta resistencia se reduce aún más cuando parte del árido reciclado utilizado es fino, debido a la mayor resistencia que tienen las arenas naturales en relación con los áridos finos reciclados que contiene un porcentaje importante de mortero del hormigón original, especialmente el tamaño inferior a 2 mm.
- El **consumo de cemento** en el hormigón fabricado con áridos reciclados es algo mayor, para igualdad de resistencia, que si se emplean áridos naturales.
- El **módulo de elasticidad** del hormigón reciclado es siempre inferior (15-40%) al del hormigón de referencia, alcanzado valores menores cuando se utiliza también árido fino reciclado <sup>(9)</sup>.

### 3.5.- OBRAS REALIZADAS <sup>(1)</sup><sup>(2)</sup><sup>(4)</sup><sup>(10)</sup>

Este tipo de reciclado es frecuente en los países con tradición en la construcción de pavimentos de hormigón, como Estados Unidos, Alemania, Austria y Bélgica, entre otros.

En nuestro país hay una cantidad importante de pavimentos de hormigón en carreteras, aeropuertos y puertos. Hasta la fecha no se han reciclado pavimentos de hormigón en carreteras. En la Autovía de Andalucía y en la Autovía A-92 se reciclaron en algunos tramos capas de base de hormigón seco compactado. En el aeropuerto de las Palmas se demolió el pavimento de hormigón existente mediante martillos hidráulicos, y se procesó el material en una planta dotada de machacadora primaria de mandíbulas, separador magnético y machacadora secundaria de impacto; el material obtenido, zahorra artificial, se empleó en la subbase de la nueva plataforma.

### 4.- CONSIDERACIONES MEDIOAMBIENTALES

En nuestro país, la Ley 10/1998, de Residuos, de 21 de abril, establecía en su artículo 3 que tendrían consideración de residuos todos aquellos que figurasen en el Catálogo Europeo de Residuos (CER). Este Catálogo fue aprobado por la Decisión 94/3/CE de 20 de diciembre de 1993, y complementado con la Decisión 94/904/CE, ambas aprobadas en el Real Decreto 952/1997.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 5.2	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>RECICLADO DE PAVIMENTOS DE HORMIGÓN</b>		

Las Decisiones Comunitarias 94/3/CE y 94/904/CE han sido derogadas por la Decisión 2000/532/CE mediante la que se aprueba La Lista Europea de Residuos. La orden MAM/304/2002 de 8 de febrero (con corrección de errores de 12 de marzo), publica en su Anejo 2 la mencionada Lista Europea de Residuos.

Los residuos utilizados en el reciclaje de pavimentos de hormigón son el propio hormigón y elementos metálicos como pasadores o barras de atado. Ambos residuos están incluidos en el capítulo 17 de la Lista Europea de Residuos (LER), "Residuos de construcción y demolición", con los siguientes códigos:

- 17 01 01 Hormigón.
- 17 04 05 Hierro y acero.

No están considerados como residuos peligrosos.

Desde el punto de vista medioambiental, el reciclado de pavimentos de hormigón presenta una serie de ventajas, como son reducir el consumo de productos naturales y energía, y eliminar el impacto negativo de los vertederos.

En general, los áridos reciclados procedentes de los pavimentos de hormigón no producen un efecto negativo en el medioambiente. En el caso que estén contaminados con cloruros, procedentes de las sales utilizadas como fundentes en la vialidad invernal, o por sulfatos, por haber estado en contacto con suelos que los contienen, se puede producir la corrosión de los elementos que contengan acero o fenómenos expansivos.

La alta alcalinidad de estos materiales en contacto con el agua (pH>11) puede originar la corrosión de las tuberías de aluminio o galvanizadas en contacto con ellos. Aunque no parecen existir problemas medioambientales con los lixiviados procedentes de estos materiales, algunas jurisdicciones americanas estipulan distancias mínimas entre el material apilado y los cursos de agua debido a su naturaleza alcalina.

## **5.- ASPECTOS ECONÓMICOS**

El reciclado de pavimentos de hormigón conlleva unas ventajas económicas tanto en el ahorro de materiales naturales como el espacio que ocuparía el material en vertedero. La tendencia general es su reutilización en la propia carretera.

En algunos municipios el precio del vertido es de tarifa única, como es el caso de Madrid (25.20 euros / t). Sin embargo, lo general en otros municipios es establecer la tarifa dependiendo de la naturaleza del material. Por ejemplo, en el vertedero de Aizmendi en Guipuzcoa la tarifa por verter restos de hormigón, cales o yesos es de 10.00 euros / t.



<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 5.2	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>RECICLADO DE PAVIMENTOS DE HORMIGÓN</b>		

## **6.- NORMATIVA TÉCNICA**

En España no existe normativa técnica específica para el reciclado de pavimentos de hormigón.

En la ORDEN FOM/891/2004 (BOE de 6 de abril de 2004) se han actualizado determinados artículos del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3) en los que se recoge la posibilidad de utilizar los áridos reciclados procedentes de pavimentos de hormigón:

- Art. 510.- Zahorras
- Art. 513.- Materiales tratados con cemento (suelocemento y gravacemento)

## **7.- REFERENCIAS**

- [1] YRJANSON, W.A. "Recycling of Portland Cement Concrete Pavements", Synthesis of Highway Practice 154, National Cooperative Highway Research Program, TRB. Washington, DC, December, 1989.
- [2] GORLÉ, D. "Reciclado de hormigón y otros materiales utilizados en la construcción de carreteras en Europa", Programa SPRINT de Transferencia de Tecnología e Innovaciones en la Construcción de Carreteras, Carreteras nº 69, 44-58. 1994
- [3] AMERICAN CONCRETE PAVEMENT ASSOCIATION (ACPA). "Recycling Concrete Pavement". Illinois, 1993.
- [4] GARCÍA SANTIAGO, J.L. "Reciclado de materiales procedentes de la carretera", Jornada sobre utilización de residuos en la construcción de carreteras. Madrid, 1 de marzo, 2001.
- [5] TRANSPORTATION RESEARCH BOARD (TRB). "Appropriate Use of Waste and Recycled Materials in the Transportation Industry – an Information Database", National Cooperative Highway Research Program, Project 4-21, TRB. Washington, DC, 2001.
- [6] GORLÉ, D.; SAEYS, L. "Les granulats de béton concassé comme matériau pour fondation routière non liée", Centre de Recherches Routières, CR 34/91. Bruxelles, 1991.
- [7] VRIES, P. "Concrete re-cycled crushed concrete as aggregate", 21 st Annual Convention of the Institute of Concrete Technology. Coventry, April, 1993
- [8] WAINWRIGHT, P.J. ; THEVORROW, A.; YU, Y; WANG, Y. "Modifying the performance of concrete aggregates", Proceedings of the Third International RILEM Symposium. London, 1994.
- [9] RAVINDRARAJAH, R.S. ; TAM, C.T. "Properties of concrete made with crushed concrete as coarse aggregate", Magazine of Concrete Research, Vol 37, nº130, p. 29-28. March, 1985.
- [10] ORGANIZACIÓN PARA LA COOPERACIÓN Y EL DESARROLLO ECONÓMICO (OCDE). "Recycling Strategies for Road Works". Paris, junio, 1997.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 5.2	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>RECICLADO DE PAVIMENTOS DE HORMIGÓN</b>		

[11] TURNER-FAIRBANKS HIGHWAY RESEARCH CENTER AND FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION, "User Guidelines for Waste and By-product Materials in Pavement Construction, 2002.

## **8.- ENTIDADES DE CONTACTO**

- CEDEX (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas)  
Centro de Estudios del Transporte  
Autovía de Colmenar Viejo km 18,2  
28790 – El Goloso (Madrid)  
Tel. 91 3357800  
Fax 91 3357822
- IECA (Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones)  
c/ José Abascal nº 53  
28003 Madrid  
Tel. 91 4429311  
Fax 91 4427294

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 5.3	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>RESIDUOS PLÁSTICOS PROCEDENTES DEL BALIZAMIENTO DE CARRETERAS</b>		
Nombre en inglés: Plastic waste from road delineators		



RESIDUOS PLÁSTICOS PROCEDENTES DEL BALIZAMIENTO DE CARRETERAS

## 1.- ORIGEN

Los residuos plásticos procedentes del balizamiento de carreteras tienen su origen debido a tres causas principales:

- Colisiones de vehículos contra los elementos de balizamiento.
- Obras.
- Deterioro de los productos.

## 2.- VOLUMEN Y DISTRIBUCIÓN

### 2.1. CONSUMO APARENTE DE PLÁSTICOS EN ESPAÑA

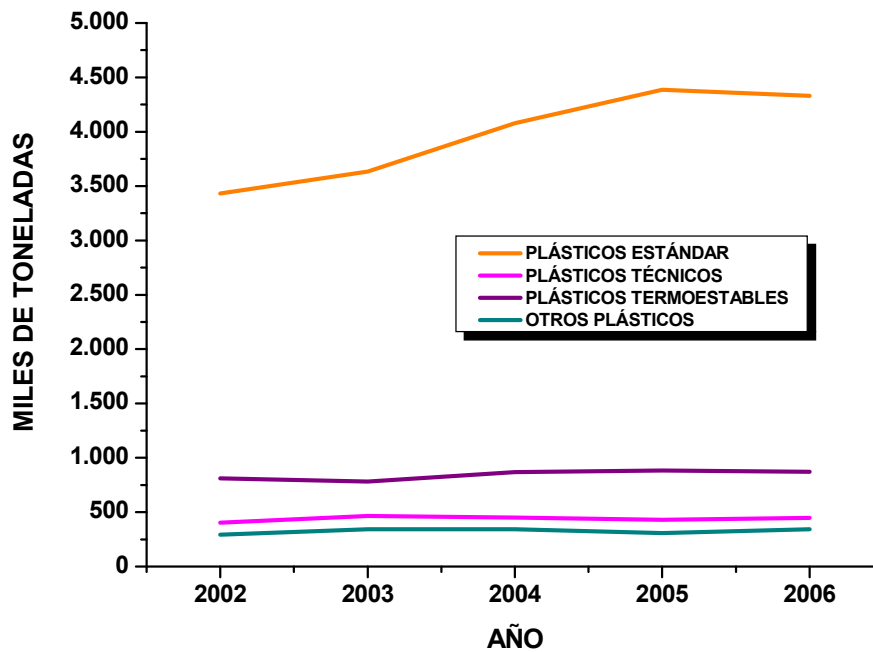
El consumo aparente de los plásticos en España, al igual que su producción, ha experimentado un crecimiento importante a lo largo de estos últimos años, como se puede observar en las figuras 1 y 2 a través de datos bibliográficos obtenidos por el Centro Español de Plásticos (CEP) en el periodo de 2002 a 2006 <sup>(1)</sup>.

A la vista de estos datos se puede decir que el consumo aparente de los plásticos ha ido aumentando en las distintas familias, destacando la de los plásticos estándar o termoplásticos que constituyen el 72 % del consumo total de plásticos. Además, se aprecia una tendencia de

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 5.3	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>RESIDUOS PLÁSTICOS PROCEDENTES DEL BALIZAMIENTO DE CARRETERAS</b>		

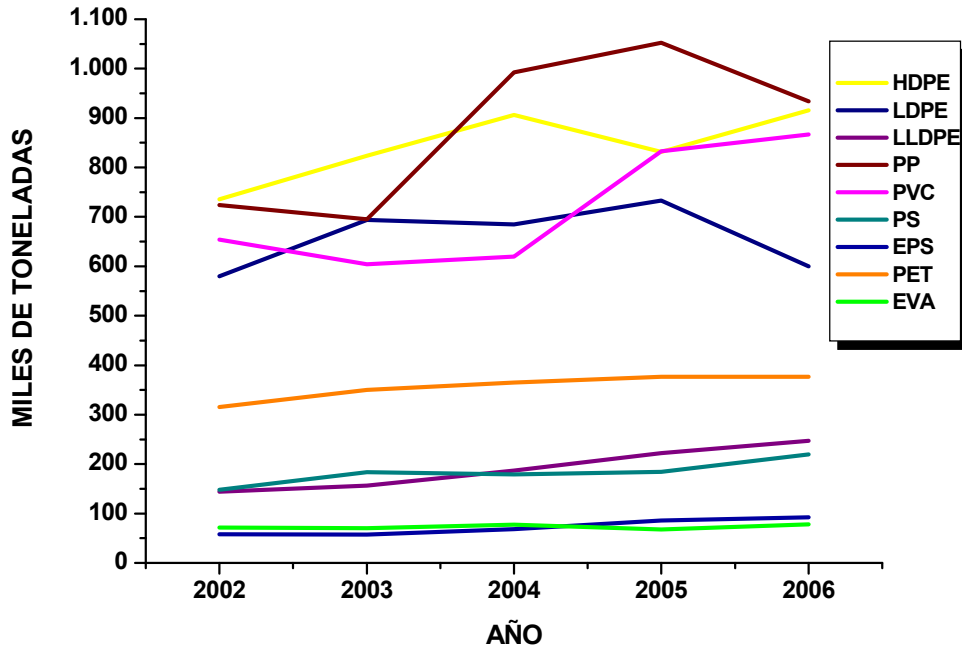
crecimiento constante del consumo de plásticos en los últimos años (5 % anual), impulsada fundamentalmente por los mercados del envase y de la construcción.

En las figuras 1 y 2 se puede observar el crecimiento del consumo de los plásticos desde el año 2002 al 2006, apreciándose una ligera disminución en el año 2006 respecto al anterior.



**Figura 1:** Consumo aparente de plásticos por familias en España.  
(Fuente: Centro Español de Plásticos)

## RESIDUOS PLÁSTICOS PROCEDENTES DEL BALIZAMIENTO DE CARRETERAS



**Figura 2:** Consumo aparente de plásticos estándar en España.  
(Fuente: Centro Español de Plásticos)

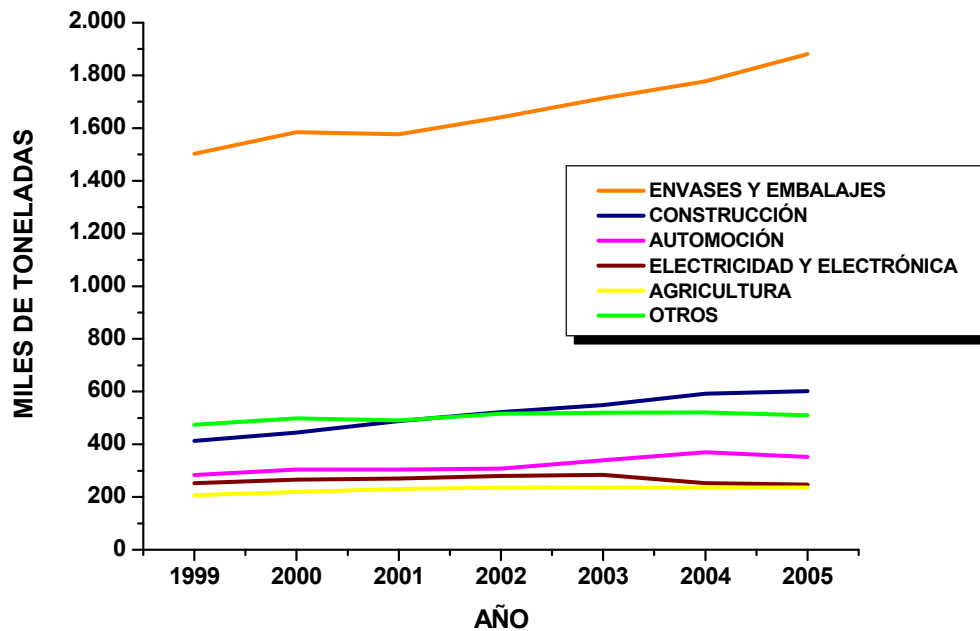
Los mercados a los que pueden destinarse los distintos tipos de plásticos producidos en España son muy variados, entre ellos cabe destacar el del envase y embalaje y el de la construcción.

A partir de los datos representados en la figura 3 se puede deducir que el mercado de las aplicaciones de los plásticos reciclados seguirá creciendo y a la vez las exigencias legislativas serán cada vez más estrictas en lo que se refiere a los aspectos medioambientales y de salud<sup>(1)</sup>.

El sector del envase y embalaje invade la gran mayoría de las actividades manufactureras y muestra un gran dinamismo, pues solamente en España este mercado mueve 15.000 millones de euros.

Por otro lado, el mercado de la construcción puede considerarse como el motor de la economía española ya que es un campo con un gran potencial de crecimiento para la industria del plástico, con un porcentaje de casi el 15 % del consumo aparente, es decir, alrededor de 891.000 Tm <sup>(1)</sup>. Puede decirse que la construcción es el segundo mercado para los plásticos, el cual, comprende multitud de aplicaciones, tanto sustituyendo materiales tradicionales como creando nuevas posibilidades. Entre las aplicaciones más relevantes cabe destacar: tuberías, sistemas de canalización, perfilera, aislamientos, recubrimientos y otros.

## RESIDUOS PLÁSTICOS PROCEDENTES DEL BALIZAMIENTO DE CARRETERAS



**Figura 3:** Principales aplicaciones de los plásticos reciclados en España.  
(Fuente: Centro Español de Plásticos)

## 2.2. GENERACIÓN DE RESIDUOS PLÁSTICOS EN ESPAÑA

Los materiales plásticos originales a través de su ciclo de vida se convierten en residuos plásticos. En el caso de los envases y embalajes en un periodo de tiempo muy corto pasan a ser residuos urbanos o industriales, mientras que los materiales empleados en la construcción pueden llegar a alcanzar un periodo de vida útil superior a 25 años. En cualquier caso, se podría decir que casi todo el material plástico virgen termina por transformarse en residuo <sup>(2) (3)</sup>.

Es lógico pensar que el constante incremento en el consumo de los materiales plásticos genera un aumento paralelo de residuos plásticos, por tanto, la gestión de estos últimos representa un valor añadido ambiental (Fuente ANARPLA, del año 1997 al 2003 el aumento de residuos plásticos en España ha sido del 36,4 %).

En España, el sector del reciclaje de plásticos está compuesto por empresas distribuidas de forma irregular por el territorio nacional.

La evolución experimentada en los últimos años muestra que el reciclaje de los plásticos ha estado marcado por dos hitos clave: el Sistema del Punto Verde iniciado en 1998 y la Directiva Europea 94/62/CE con objetivos de reciclado que debían cumplirse en 2001. Ambos factores han motivado que el crecimiento anual del reciclaje haya sido espectacular, permitiendo alcanzar, e incluso superar, dichos objetivos. ECOEMBES (Ecoembalajes España S.A.), en su informe anual de 2006, destaca que el crecimiento del reciclaje de envases de plástico superó en un 20 % la cifra alcanzada en el año anterior <sup>(4) (5)</sup>.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: <b>5.3</b>	Mes: <b>DICIEMBRE</b> Año: <b>2007</b>
<b>RESIDUOS PLÁSTICOS PROCEDENTES DEL BALIZAMIENTO DE CARRETERAS</b>		

### **3.- GESTIÓN DEL RESIDUO**

#### **3.1. PROPIEDADES DEL RESIDUO**

El residuo estudiado está orientado a la fabricación de elementos de balizamiento, por esta razón se van a considerar únicamente los materiales poliméricos de la familia de los termoplásticos.

Los termoplásticos son fácilmente reciclables ya que se funden al calentarse y, por tanto, se pueden moldear repetidas veces sin que sus propiedades originales sufran grandes alteraciones. Sin embargo, durante los distintos ciclos de reprocesado van sufriendo modificaciones, por lo que no es aconsejable reciclarlos más de 5 ó 7 veces.

Los termoplásticos más conocidos son: polietileno de baja densidad (PEBD o LDPE), polietileno de alta densidad (PEAD o HDPE), polipropileno (PP), polietilentereftalato (PET), policloruro de vinilo (PVC), poliestireno (PS), poliestireno expandido (EPS) y policarbonato (PC)<sup>(6)(7)</sup>.

Los plásticos tienen un elevado poder calorífico y por este motivo se podría llegar a considerar que la única vía de sus residuos sea la valorización energética. Sin embargo ésta debe reservarse para aquellas fracciones de residuos plásticos que no pudieran ser tratadas por medio del reciclaje mecánico o químico.

#### **3.2. VALORIZACIÓN MATERIAL**

##### **3.2.1. Reciclaje mecánico**

El reciclaje mecánico consiste en trocear el material e introducirlo en una extrusora para fabricar granza reciclada y después transformarla (extrusión, inyección, etc). Este tipo de reciclaje se considerará exclusivamente para aquellos productos procedentes del consumo.

Las condiciones que se han de cumplir en un reciclaje mecánico son <sup>(2)</sup>:

- plásticos no muy degradados en los procesos de transformación y/o utilización.
- una completa separación de los plásticos por tipos y para ello es conveniente una recogida selectiva de los mismos.
- ausencia de materiales o partículas extrañas que puedan dañar a los equipos de transformación o interfieran en las características físicas del producto.
- recogida en cantidades suficientes para la viabilidad industrial y económica del proceso.

Las etapas de un reciclaje mecánico son <sup>(8) a (11)</sup>:

- limpieza: acondicionamiento para obtener una materia prima adecuada, sin suciedad o sustancias que puedan dañar tanto a las máquinas como al producto final.
- clasificación: selección y separación de los plásticos. Se han desarrollado varias técnicas de separación basadas en métodos físicos de diferente naturaleza: técnicas de flotación-hundimiento basadas en la diferencia de densidad, utilización de disolventes, técnicas

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 5.3	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>RESIDUOS PLÁSTICOS PROCEDENTES DEL BALIZAMIENTO DE CARRETERAS</b>		

espectroscópicas, técnicas electrostáticas, técnicas basadas en la incorporación de marcadores químicos y otras.

- trituración o molienda: obtención de un tamaño de grano adecuado mediante cuchillas de acero inoxidable.
- lavado: eliminación de cualquier tipo de suciedad o impureza mediante lavado, aclarado y centrifugación (secado). Seguidamente los residuos se vuelven a moler y a secar.
- obtención de granza: se realiza mediante un proceso de extrusión. El material se homogeneiza por fundición y, a continuación, se moldea la masa fundida en forma de filamentos. Tras la extrusión el plástico pasa a través de un filtro para eliminar los restos de contaminantes distintos a los plásticos y se corta en pequeños trozos con una hélice obteniendo la granza reciclada.

Posteriormente, el material se enfría con agua solidificándose en forma de “pellets”. La granza reciclada húmeda pasa por una centrífuga. Una vez que la granza está seca se pasa mediante una corriente de aire a una tolva, a través de la cual se van llenando los sacos.

No todos los materiales están en condiciones de ser sometidos a un reciclaje mecánico, bien porque están muy degradados y no darían productos con buenas características, o porque se encuentran mezclados con todo tipo de sustancias por lo que su separación y limpieza no resultaría rentable <sup>(12)</sup>.

El reciclaje mecánico, es la alternativa más desarrollada para recuperar los residuos plásticos, aunque a veces este tipo de reciclaje, no es el más adecuado debido a que el rendimiento no es suficiente para poder lograr una eficiencia económica a través de una eficiencia ecológica <sup>(11) (13)</sup>.

En estos casos, existen otras opciones para alargar la vida de estos materiales a través de diferentes tipos de reacciones químicas. Estas opciones de recuperación se denominan reciclaje químico o valorización energética.

### 3.2.2. Reciclaje químico

El reciclaje químico puede considerarse como un proceso complementario al mecánico ya que ofrece posibilidades que resuelven las limitaciones de este último. Entre ellas se encuentra la necesidad de disponer de grandes cantidades de residuos plásticos limpios, separados y homogéneos para poder garantizar la calidad del producto final <sup>(14)</sup>.

El reciclaje químico es un proceso mediante el cual se produce la descomposición del polímero para obtener los componentes de partida (monómeros). A partir de estos monómeros, y tras un nuevo proceso de polimerización, se obtienen nuevos materiales poliméricos <sup>(7)</sup>.

Su aplicación es viable tanto a mezclas de distintos polímeros, lo que evita la separación por tipos reduciendo los costes de recolección y clasificación, como a polímeros termoestables <sup>(10)</sup>.

El reciclaje químico puede realizarse mediante diferentes procesos que pueden clasificarse en <sup>(11) (15)</sup>.



<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 5.3	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>RESIDUOS PLÁSTICOS PROCEDENTES DEL BALIZAMIENTO DE CARRETERAS</b>		

### ➤ Despolimerización térmica

Este tipo de reciclaje químico agrupa las tecnologías que permiten la transformación de los polímeros en monómeros u oligómeros mediante aporte de calor, sin que un reactivo químico intervenga en las reacciones de ruptura de las cadenas. Incluye diversos procesos como la pirólisis de algunos plásticos, microondas o tratamientos a muy alta temperatura.

- Pirólisis

La pirólisis se lleva a cabo bajo condiciones de reacción severas ( $T^a > 450\text{ °C}$  y elevados tiempos de residencia) ya que es necesario aportar grandes cantidades de calor para romper el enlace carbono-carbono. La ruptura de las cadenas tiene lugar a través de una reacción primaria con una velocidad suficiente. Además, se forman radicales a partir de reacciones secundarias menos selectivas que dificultan el control de esta reacción primaria <sup>(16) (17)</sup>.

Este proceso permite obtener los monómeros (etileno o propileno) pero en presencia de numerosos subproductos y con bajos rendimientos, por lo que se están dedicando grandes esfuerzos para poder emplear catalizadores en estas reacciones. Si no se aplican estas condiciones los polímeros se transforman en materias químicas de tipo petroquímico como el gas de síntesis o parafinas <sup>(16)</sup>.

- Hidrogenación o hidrocrqueo

Este tipo de proceso implica el tratamiento térmico del residuo plástico en presencia de hidrógeno, normalmente a temperaturas moderadas (400-500 °C), y elevadas presiones (10-100 kPa). En ellos se emplean catalizadores bifuncionales (con funciones de craqueo e hidrogenación) compuestos por metales de transición soportados sobre matrices ácidas <sup>(11)</sup>.

El hidrocrqueo da lugar a la formación de productos altamente saturados que pueden usarse directamente como combustible o como materia prima en refinería. Es un proceso versátil que permite el tratamiento de mezclas de plásticos y la obtención de hidrocarburos líquidos con rendimientos cercanos al 85 %. Sin embargo, el uso de hidrógeno a altas presiones y temperaturas resulta costoso y requiere medidas de seguridad especiales <sup>(11)</sup>.

- Craqueo térmico

Este tipo de proceso implica la ruptura de las cadenas poliméricas constitutivas de los residuos plásticos por acción del calor en ausencia de oxígeno. Normalmente, el producto de reacción es una mezcla heterogénea de hidrocarburos con una distribución muy amplia de tamaños moleculares. La proporción de hidrocarburos líquidos, gaseosos y sólidos es función de la temperatura a la que se desarrolla el proceso, que suele efectuarse entre 500 y 800 °C <sup>(11)</sup>.

### ➤ Disolución

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 5.3	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>RESIDUOS PLÁSTICOS PROCEDENTES DEL BALIZAMIENTO DE CARRETERAS</b>		

Los procedimientos de disolución de los plásticos permiten recuperar los polímeros purificados eliminando los materiales contaminantes contenidos en los desechos. Éstos no implican la modificación química de las moléculas de polímeros, pero no corresponden ni a un reciclaje mecánico ni a una valorización energética de los residuos <sup>(15)</sup>.

#### ➤ **Solvólisis**

El término solvolisis define un procedimiento por el que el disolvente actúa también como reactivo. En función de la naturaleza del disolvente se distinguen distintas clases de solvolisis como la quimiólisis (glicólisis, hidrólisis y metanolisis), en donde se utilizan también fluidos supercríticos <sup>(11) (15)</sup>.

- **Hidrólisis**

Normalmente se realiza en medio básico (saponificación), lo que facilita el proceso, pero necesita una etapa de post-tratamiento para transformar el producto en monómeros utilizables. Este procedimiento permite tratar los desechos coloreados y mezclados.

- **Metanolisis**

Es un avanzado proceso de reciclaje que consiste en la aplicación de metanol en el PET. Este poliéster se descompone en sus moléculas básicas, incluidos el dimetiltereftalato y el etilenglicol, que pueden repolimerizarse para producir resina virgen.

- **Glicólisis**

Se realiza con etilenglicol y en condiciones menos severas que la metanolisis y la hidrólisis, lo que reduce los costes económicos, aunque es menos eficaz que ellas para el tratamiento de desechos coloreados y mezclados.

Los productos de la reacción pueden utilizarse para recuperar PET o como precursores de espumas de poliuretano o poliésteres insaturados.

#### ➤ **Otras despolimerizaciones químicas**

En el reciclaje químico existen otros procesos entre los que destacan aquellos que se realizan con un reactivo químico determinado (un ácido, un derivado del fenol, etc.) o los que se llevan a cabo mediante craqueo catalítico.

El craqueo catalítico de residuos plásticos presenta una serie de ventajas respecto a los procesos de craqueo térmico, como por ejemplo la posibilidad de trabajar a menores temperaturas de reacción (300-400 °C) gracias a la presencia de catalizadores. Además, una adecuada selección de los mismos permite controlar la distribución de los productos obtenidos.

Una alternativa interesante consiste en el reformado catalítico de los gases obtenidos en el craqueo térmico de los residuos plásticos dando lugar a diversos productos como gasolina, gasóleo y queroseno entre otros <sup>(11)</sup>.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 5.3	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>RESIDUOS PLÁSTICOS PROCEDENTES DEL BALIZAMIENTO DE CARRETERAS</b>		

A partir de la separación de los procesos en las diferentes clases, se puede definir una matriz “clase de proceso/tipo de plástico tratado” tal como se muestra en la tabla 1, en la que se presenta un reflejo de la situación del reciclaje químico de los plásticos en Europa durante el año 2002 <sup>(15)</sup>:

- Se distinguen nueve grandes grupos de polímeros que pueden someterse al reciclado químico; los polímeros de adición (PE; PP; PVC; PS; Polimetilmetacrilato, PMMA) se tratan principalmente con la despolimerización térmica; mientras que los polímeros de condensación (PET; Poliamidas, PA; PC; Poliuretano, PUR) aceptan la mayoría de los tratamientos químicos.
- La disolución puede aplicarse a la mayoría de los plásticos. Desde el punto de vista de la calidad de los materiales reciclados es, sin embargo, menos satisfactoria que la despolimerización térmica.

Estos procesos de reciclaje químico se encuentran en tres estados distintos de desarrollo, como se puede observar en la figura 4.

El proceso de reciclaje químico más desarrollado industrialmente es el de la solvolisis, a continuación le sigue la despolimerización térmica y en último lugar se encuentra el de la disolución (ver figura 4). En los dos últimos casos, la explotación a escala industrial es muy similar a la de la escala de planta piloto, mientras que en el caso de la solvolisis la diferencia es mayor.

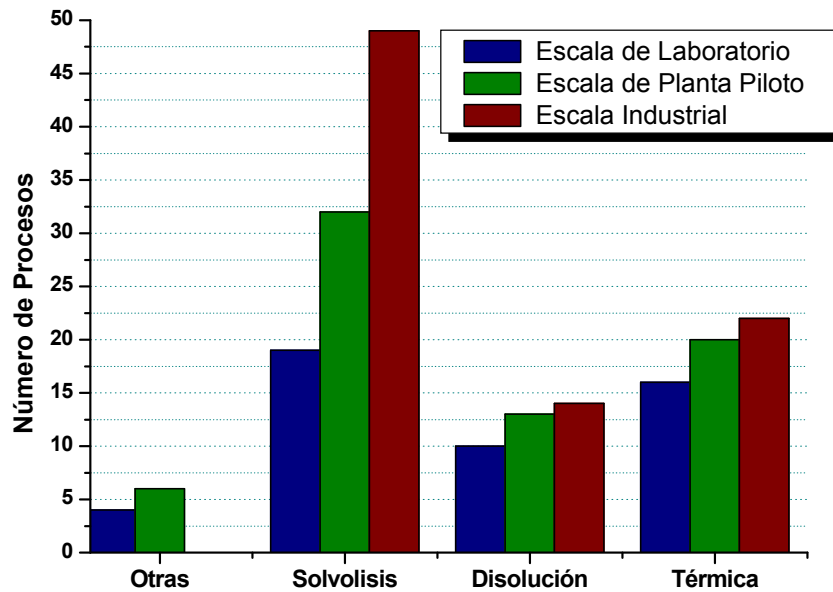
Los grandes grupos químicos internacionales colaboran activamente con los laboratorios en la investigación de los procesos de reciclaje químico para iniciar la fase de desarrollo en planta piloto.

	PE/PP	PVC	PS	PET	PA	PMMA	PC	PUR	Total
<b>Despolimerización térmica</b>	4	1	11	2	2	7			27
<b>Disolución</b>	2	3	4		6		1		16
<b>Solvolisis</b>				26	10		2	7	45
Glicolisis				15	1		1	6	23
Hidrólisis				5	9			1	15
Metanolisis				6			1		7
<b>Otras despolimerizaciones químicas</b>					1		3	1	5
<b>Total</b>	6	4	15	28	19	7	6	8	93

**Tabla 1**

Distribución de reciclaje químico en función del residuo plástico en Europa en 2002.  
(Fuente: ADEME)

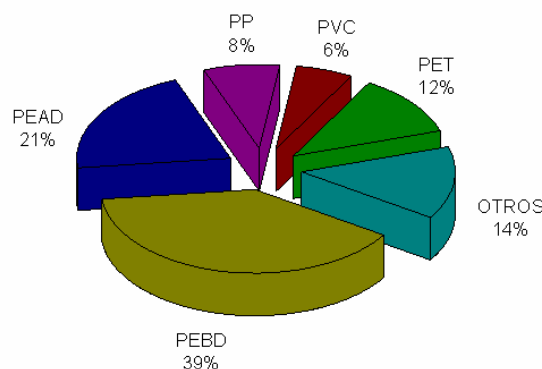
**RESIDUOS PLÁSTICOS PROCEDENTES DEL BALIZAMIENTO DE CARRETERAS**



**Figura 4:** Representación de desarrollo de los diferentes procedimientos.  
(Fuente: Datos de ADEME)

**3.3. RECICLAJE DE PLÁSTICOS EN ESPAÑA**

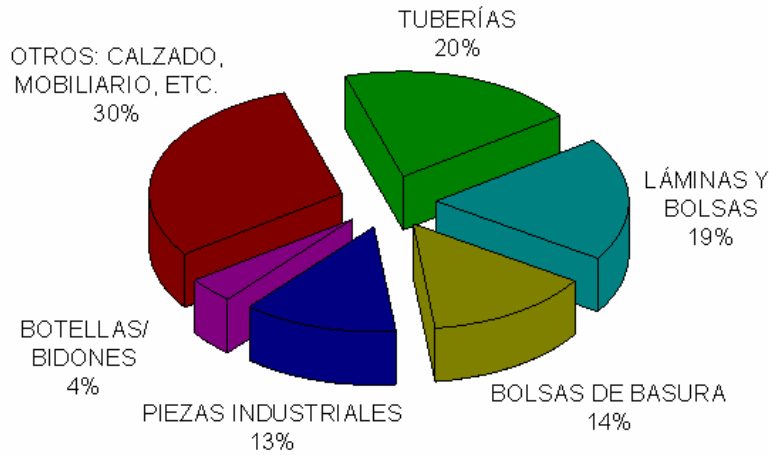
En los últimos años se ha producido un progreso importante en el índice de reciclaje, por lo que España se sitúa en primera línea dentro del conjunto de los países europeos. Según datos de la Asociación Nacional de Recicladores de Plásticos (ANARPLA), en el año 2005, los materiales más reciclados en España fueron los polietilenos, con el 21 % para el PEAD y el 39 % para el PEBD, con respecto al total de granza reciclada (figura 5). En la figura 6 se muestran los principales destinos del plástico reciclado en España.



**Figura5:** Principales plásticos reciclados en 2005 en España.

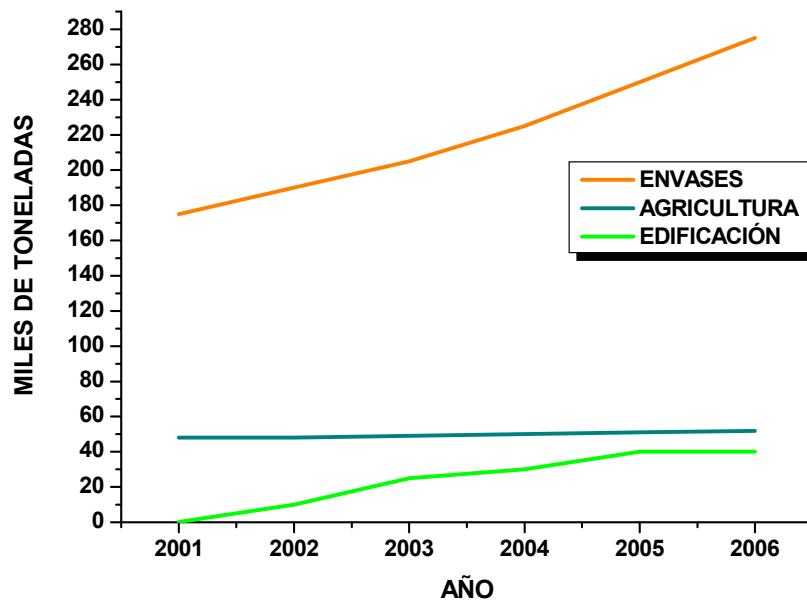
(Fuente: ANARPLA)

**RESIDUOS PLÁSTICOS PROCEDENTES DEL BALIZAMIENTO DE CARRETERAS**



**Figura 6:** Principales aplicaciones de los plásticos reciclados en España.  
(Fuente: Centro Español de Plásticos)

La evolución del reciclaje de residuos poliméricos por sectores según datos de CICLOPLAST, se muestra en la figura 7, en donde el sector de los envases es el que más recicla, siendo además el consumidor más relevante de material plástico.

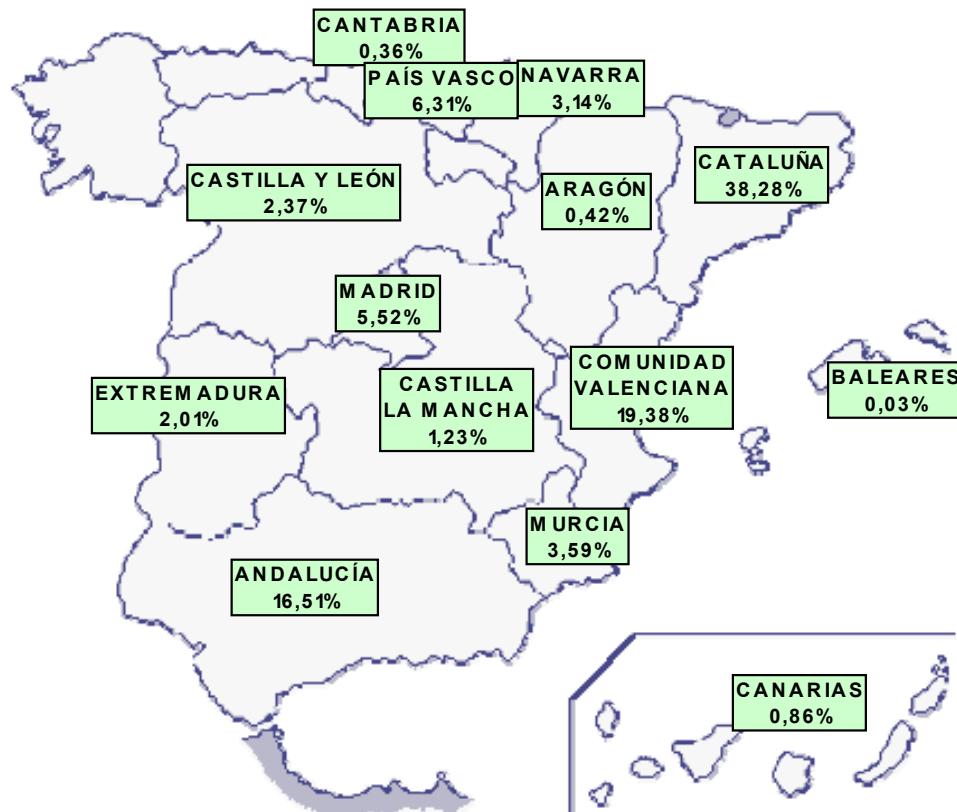


**Figura 7:** Evolución del reciclaje de residuos plásticos por sectores en España.  
(Fuente: Centro Español de Plásticos)

La distribución porcentual de la producción de reciclaje de plásticos en España por comunidades autónomas (CC.AA.) en el año 2006 se puede observar en el mapa representado en la figura 8. Cataluña con el 38 %, Andalucía con el 16 % y Valencia con el 19 % suponen el 73 %. Si a estas

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 5.3	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>RESIDUOS PLÁSTICOS PROCEDENTES DEL BALIZAMIENTO DE CARRETERAS</b>		

comunidades se les añade Madrid, el País Vasco, Murcia y Castilla la Mancha, se alcanza el 90 % de las 481.162 toneladas recicladas ese año en España.



**Figura 8:** Distribución del reciclaje de plásticos en España por CC.AA. en 2006.  
(Fuente: CICLOPLAST)

### 3.4. VALORIZACIÓN ENERGÉTICA

La valorización energética es un proceso de recuperación del calor sensible contenido en los gases, el rendimiento obtenido depende de la tecnología y del proceso de valorización y/o combustión empleado <sup>(18)</sup>.

Este procedimiento de recuperación está reservado para aquellas fracciones de residuos plásticos que no pueden ser tratadas por medio del reciclaje mecánico o químico. Este método es aconsejable en el caso de tener materiales plásticos deteriorados, sucios, o mezclados con otros materiales difíciles de separar <sup>(8)</sup>.

Los procesos de valorización energética pueden clasificarse en:

#### ➤ **Combustión (incineración)**

La combustión directa o incineración en masa es el sistema más elemental y antiguo de recuperación energética de los RSU. Se define como un proceso exotérmico de oxidación

**RESIDUOS PLÁSTICOS PROCEDENTES DEL BALIZAMIENTO DE CARRETERAS**

completa de la materia a alta temperatura para convertirla en gas (principalmente dióxido de carbono y vapor de agua) y cenizas, además de calor, por lo que éste se convierte en el único componente energético útil del proceso. El comburente utilizado es el oxígeno <sup>(19)</sup>.

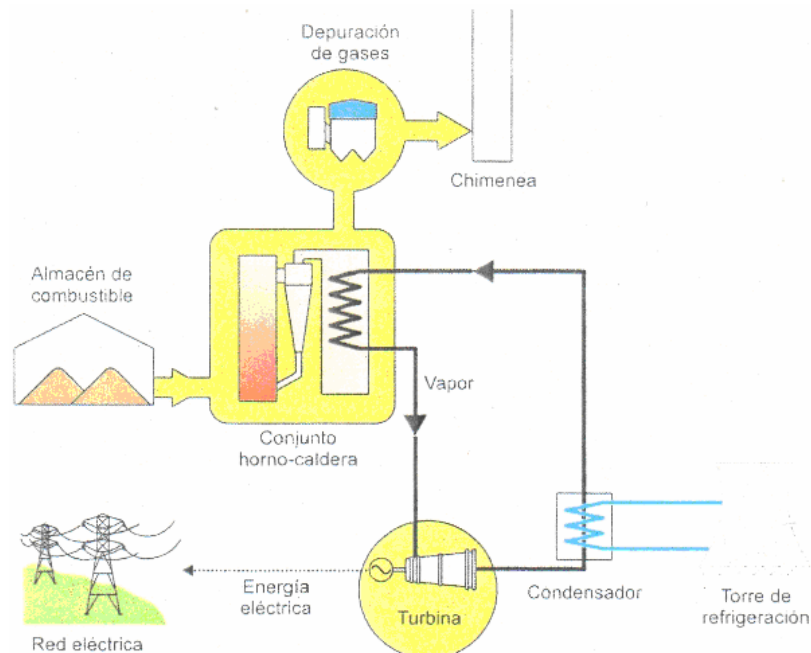
Normalmente es difícil lograr una combustión completa, por lo que en los procesos de combustión reales se suelen originar cantidades diversas de partículas sin quemar que contienen carbono, así como escorias y alquitranes que disminuyen su eficiencia energética y causan problemas medioambientales si no se eliminan adecuadamente.

Actualmente es posible la destrucción térmica de los contaminantes orgánicos contenidos en los residuos mediante la incineración en hornos de lecho fluidizado, sobre todo, de los compuestos formados por dioxinas y furanos mediante una técnica controlada de incineración sin regiones frías ligada a la regulación de la potencia de la combustión a temperaturas superiores a 850 °C <sup>(18)</sup>.

En la figura 9 se presenta un esquema de un sistema de incineración con recuperación de energía.

### ➤ Pirólisis

El proceso de pirólisis consiste en la descomposición térmica de la materia orgánica por la acción del calor en ausencia de oxígeno, denominándose también combustión con defecto de aire. La naturaleza y composición de los productos finales dependen de las propiedades de la naturaleza del residuo tratado, de las condiciones de operación y de los tiempos de residencia del material en el reactor <sup>(16)(17)</sup>.



**Figura 9:** Sistema de incineración con recuperación de energía.  
(Fuente: SOGAMA)

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 5.3	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>RESIDUOS PLÁSTICOS PROCEDENTES DEL BALIZAMIENTO DE CARRETERAS</b>		

Los principios de la pirólisis se pueden dividir en dos grandes grupos, aquellos cuya aportación de calor al proceso se lleva a cabo utilizando como combustible la fracción gaseosa de la pirólisis, y aquellos en los que la energía la proporciona la combustión de una parte de la carga <sup>(18)</sup>.

Inicialmente, la pirólisis fue concebida como un método de obtención de productos combustibles, y cada vez se está enfocando más hacia un sistema de recuperación de materias primas susceptibles de ser utilizadas en la síntesis orgánica, es decir, hacia un reciclaje químico <sup>(20)</sup>.

Los sistemas como la pirólisis, cuyo principio de funcionamiento es teórico, generan menos gases que la incineración convencional, pero precisan de un grado de homogeneidad muy alto del residuo, tanto físico como químico, a la entrada del proceso <sup>(18)</sup>.

La pirólisis se desaconseja ya que el balance económico del proceso es negativo debido a las necesidades energéticas que las reacciones químicas endotérmicas requieren. Además los productos obtenidos se encuentran lejos de las especificaciones comerciales por su baja calidad.

### ➤ Gasificación

Se entiende por gasificación aquel proceso que lleve implícita una combustión en condiciones de defecto de oxígeno, con producción de monóxido y dióxido de carbono, hidrógeno y metano en proporciones diversas según la composición de la materia prima y las condiciones del proceso.

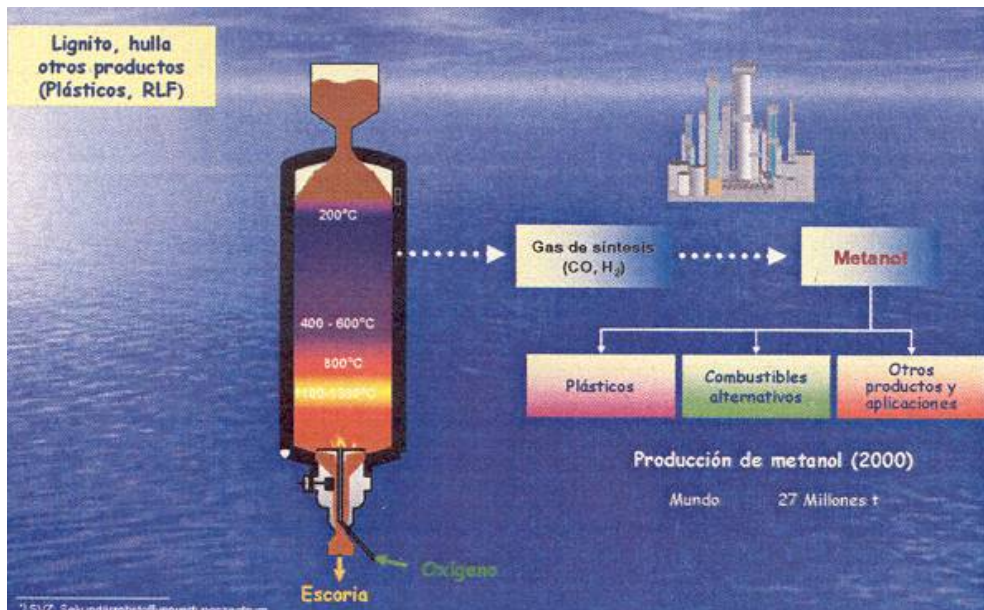
El proceso de gasificación, aunque nada reciente (en los años veinte se utilizaba el gas de gasógeno obtenido a partir de la gasificación de la madera), ha recibido en estos últimos años un gran impulso tecnológico debido a los excelentes éxitos cosechados por el proceso durante las fases de experimentación en laboratorio o a escala de planta piloto. Este proceso puede utilizarse para la producción de electricidad, tal es el caso de la planta piloto tipo poligás en Castellón <sup>(21)</sup>.

La mayor parte de las gasificaciones convencionales requieren un material de tamaño de partícula homogéneo, a fin de que pueda garantizarse la constancia de la reacción, y que no presenten un espectro de densidad amplio para evitar en la medida de lo posible segregaciones que puedan ser motivo de acumulación de sólidos o de arrastres excesivos, que constituyen el mayor problema de este sistema <sup>(18)</sup>.

En la figura 10 se muestra un esquema de un gasificador indicando los productos que se obtienen en el proceso.



## RESIDUOS PLÁSTICOS PROCEDENTES DEL BALIZAMIENTO DE CARRETERAS

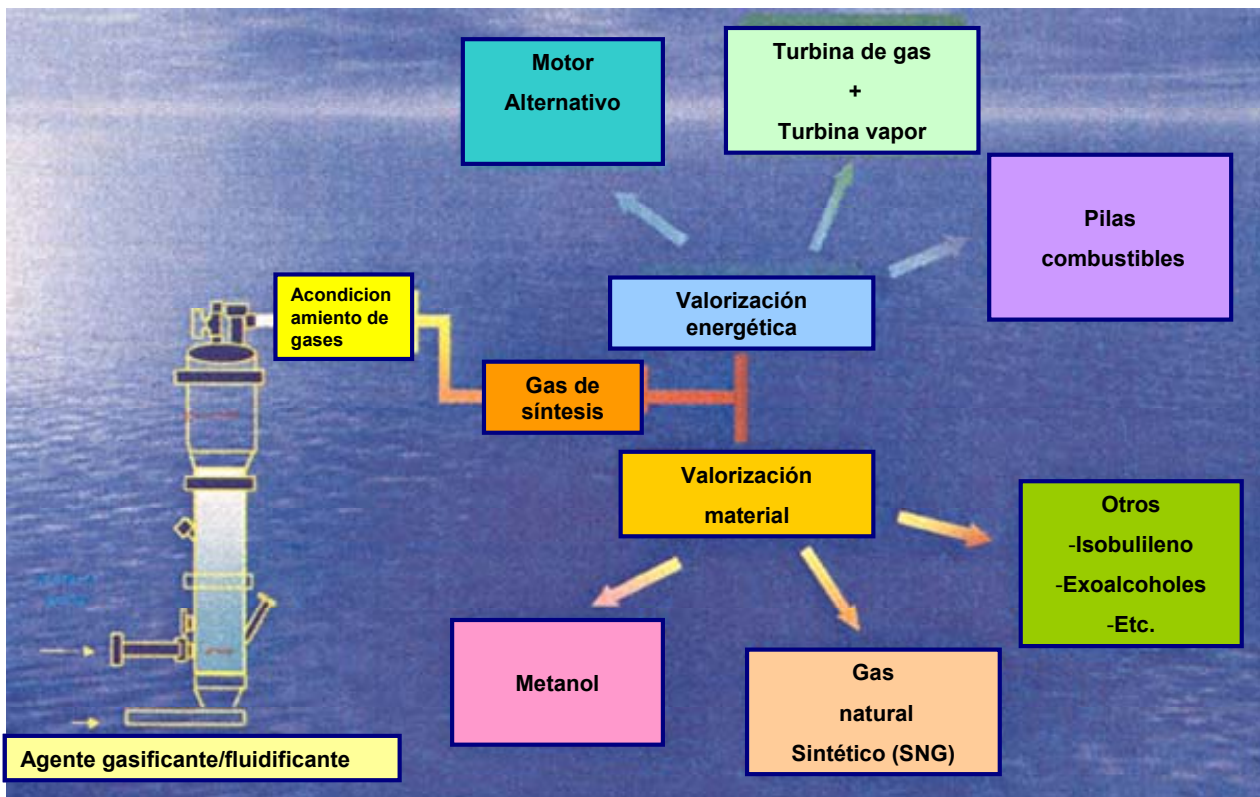


**Figura 10:** Esquema de un gasificador.  
(Fuente: CICLOPLAST)

Existe una gran relación entre los procesos de valorización energética y reciclaje químico. La combinación de ambos puede dar lugar a un mayor aprovechamiento del producto obtenido (17).

En la figura 11 se muestra la transformación del residuo plástico en gas de síntesis mediante un proceso de gasificación. Este producto, a su vez, puede someterse a otro proceso de valorización energética para obtener por ejemplo combustibles alternativos, o a un proceso de reciclaje químico para valorizar el material y obtener productos de alto valor añadido como por ejemplo el gas natural sintético.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 5.3	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>RESIDUOS PLÁSTICOS PROCEDENTES DEL BALIZAMIENTO DE CARRETERAS</b>		



**Figura 11:** Combinación del reciclaje químico y la valorización energética.  
(Fuente: CICLOPLAST)

### 3.5. APLICACIONES

La demanda potencial de los plásticos reciclados por parte de los mercados finales se basa en los factores siguientes <sup>(22) (23)</sup>:

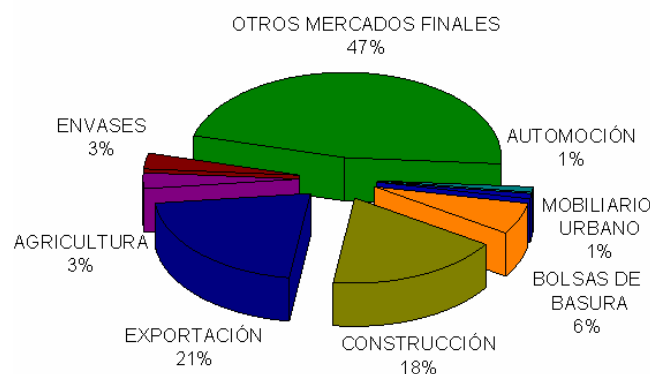
- aceptación del mercado, es decir, aceptación de los transformadores y consumidores.
- aceptación técnica, que se basa en la necesidad de asegurar las prestaciones deseadas de los productos y la idoneidad para el proceso de transformación.

Algunos de los productos que pueden estar fabricados con plástico reciclado son <sup>(22)</sup>:

- **mobiliario urbano** (bancos, iluminación, parques infantiles, etc.), que corresponde al 1 % de los usos del material plástico reciclado en España, como se puede ver en la figura 12. El material destinado para su fabricación es la madera plástica, que lleva fabricándose varios años en Europa y actualmente también en España. Presenta ventajas sobre otros materiales, como su mayor resistencia a la acción de los agentes externos (agua, radiación solar, temperatura, etc.), que lo convierten en un material idóneo para tal fin. Cabe destacar el uso de virutas de madera con residuos plásticos de PEAD, PVC (mobiliario de los jardines infantiles), resinas reforzadas con fibra de vidrio (toboganes acuáticos).

**RESIDUOS PLÁSTICOS PROCEDENTES DEL BALIZAMIENTO DE CARRETERAS**

- **envases**, que constituyen el 3 % del destino final de los materiales plásticos reciclados en España (figura 12). Actualmente, más de un 50 % de todos los productos comercializados en Europa se envuelven en material plástico y se espera un aumento notable en la producción de envases. La mayoría de las botellas fabricadas con PET se vuelven a reciclar para obtener otras que no pueden emplearse para consumo humano.
- **construcción de obras públicas urbanas** (losas para aceras, losas para parques y jardines, pavimentos de colegios y edificios públicos, etc.), engloba el 18 % de las aplicaciones del plástico reciclado (figura 12). Este sector es otro de los mercados en expansión para la industria productora de plásticos. El PEAD y el PVC son los materiales más empleados en este campo. De los plásticos generados por este sector, sólo una pequeña proporción se recicla mecánicamente debido a la elevada dilución de los plásticos en los residuos de demolición. Por ello las expectativas de crecimiento del reciclaje en este sector no parecen ser optimistas, sin embargo resulta ser un mercado interesante para los plásticos reciclados.
- **otros destinos finales**, en los que se podría englobar la señalización y el balizamiento entre otros. Los materiales poliméricos más empleados son el PVC y el PEAD, y en porcentajes más bajos el PEMD (polietileno de media densidad). En algunos elementos de balizamiento se están empleando polímeros termoplásticos (cuerpo del cono PVC reciclado) y elastómeros reciclados (base del cono).



**Figura 12:** Destino final de las materias plásticas recicladas en 2002 en España.  
(Fuente: CICLOPLAST)

#### **4. CONSIDERACIONES MEDIOAMBIENTALES**

La Ley 10/1998, de Residuos, de 21 de abril, establecía en su artículo 3 que tendrían consideración de residuos todos aquellos que figurasen en el Catálogo Europeo de Residuos (CER). Este Catálogo fue aprobado por la Decisión 94/3/CE de 20 de diciembre de 1993, y complementado con la Decisión 94/904/CE, ambas aprobadas en el Real Decreto 952/1997.

Las Decisiones Comunitarias 94/3/CE y 94/904/CE han sido derogadas por la Decisión 2000/532/CE mediante la que se aprueba La Lista Europea de Residuos. La orden MAM/304/2002

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 5.3	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>RESIDUOS PLÁSTICOS PROCEDENTES DEL BALIZAMIENTO DE CARRETERAS</b>		

de 8 de febrero (con corrección de errores de 12 de marzo), publica en su Anejo 2 la mencionada Lista Europea de Residuos.

Los residuos plásticos urbanos vienen incluidos en la Lista Europea de Residuos en los siguientes Capítulos:

- 15: residuos de envases; absorbentes, trapos de limpieza; materiales de filtración y ropas de protección no especificados en otra categoría.
  - 15 01 02 Envases de plástico
- 19: residuos de las instalaciones para el tratamiento de residuos, de las plantas externas de tratamiento de aguas residuales y de la preparación de agua para consumo humano y de agua para uso industrial.
  - 19 12 04 Plástico y caucho

➤ **Ventajas**

- Aprovechamiento de materias cuyo valor comercial es bajo o nulo.
- Disminución del volumen de residuos que se depositan en los vertederos.
- Reducción del suministro de la materia prima original si se tiene en cuenta el ascenso progresivo del precio de la fuente de partida (petróleo), con el consiguiente beneficio en cuanto a impacto ambiental y a protección de los recursos naturales.
- Producción de energía gracias al elevado poder calorífico de los residuos plásticos.

➤ **Inconvenientes**

- Necesidad de clasificar selectivamente los residuos para un correcto reciclaje mecánico.
- Ciclos limitados de reciclaje mecánico. Los plásticos estándar no toleran más de 5 ó 7 reprocesados ya que sufren modificaciones.
- Calidad inferior en los productos fabricados en su totalidad con residuos plásticos procedentes del reciclado mecánico. Esto se podría paliar llevando a cabo una adecuada separación que asegure la ausencia de otros contaminantes.
- Emisión de sustancias tóxicas a la atmósfera y generación de corrientes contaminantes en algunos procesos de valorización energética.
- Elevado coste por la necesidad de una elevada inversión tecnológica.

## **5. ASPECTOS ECONÓMICOS**

Las inversiones realizadas en el periodo 2000-2003 para la ejecución de las medidas correspondientes al I Plan Nacional de Residuos Urbanos (I PNRU) se muestran en las tablas 2 y 3. De estos valores puede deducirse que en los cuatro primeros años de vigencia del I PNRU, se ejecutó el 74,60 % del total de las inversiones previstas para el periodo 2000-2006; entre las que

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: <b>5.3</b>	Mes: <b>DICIEMBRE</b> Año: <b>2007</b>
<b>RESIDUOS PLÁSTICOS PROCEDENTES DEL BALIZAMIENTO DE CARRETERAS</b>		

destacan las realizadas en el Programa Nacional de Compostaje, Recuperación y Reciclaje, Valorización Energética y Eliminación. Las CC.AA. que realizaron mayores inversiones fueron Madrid, Cataluña y Andalucía.

Por otro lado, en la Versión Preliminar del PNIR 2008-2015 en su Anexo 1: II PNRU 2008-2015 se encuentra el presupuesto fijado para este periodo de tiempo (tabla 4). En él se puede observar que la mayor parte de las inversiones previstas van destinadas a los programas de prevención y reciclaje (36 y 22 %, respectivamente), centrándose principalmente en el desarrollo de una red más amplia de puntos limpios, el apoyo a los programas de I+D+i y el reciclaje de residuos de envases y residuos biodegradables <sup>(24)</sup>.

A modo de ejemplo se muestra en la tabla 5 la evaluación del capital inmovilizado necesario para realizar un proceso de reciclaje mecánico, ya que, actualmente, es la medida más habitual de reciclaje de residuos plásticos.

Con objeto de llevar a cabo esta evaluación es necesario tener en cuenta las distintas etapas que componen el proceso <sup>(25)</sup>.

- La primera operación es el lavado de los plásticos, esto supone un incremento del valor de venta del producto reciclado final, independientemente del tratamiento posterior. El agua utilizada en este lavado se lleva a un sistema de decantación y filtración, para purificarla y emplearla en el enfriamiento de los plásticos a la salida de la extrusora (segunda operación). El resto del agua se recicla en el mismo sistema de lavado.
- La segunda operación es la trituración y posterior extrusión de los plásticos limpios con objeto de homogeneizar el material procedente del producto de partida.
- A la salida de la extrusora y a través de una cinta transportadora el material reciclado se enfría sin sufrir deformaciones, y de forma automática se corta a las longitudes deseadas, que suelen oscilar entre 50 cm y 6 m.
- Finalmente, el material reciclado se transforma en granza en la mayor parte de los casos.

Si no se pretende dar más valor al producto, después de la primera operación, los plásticos limpios pueden ser comprimidos en balas, como en el caso del papel, para su posterior venta, y para ello es necesaria una prensa cuyo coste de adquisición depende de la producción exigida y del tipo de máquina (manual, mecánica, hidráulica, neumática, etc.).

## RESIDUOS PLÁSTICOS PROCEDENTES DEL BALIZAMIENTO DE CARRETERAS

RESUMEN DE INVERSIONES PNRU (2000-2003) <sup>(1)</sup>

PROGRAMA	ACTUACIONES	INVERSIONES (x 10 <sup>3</sup> €) (2000-2003)			
		Previstas	Realizadas	%	
I. Prevención y Minimización	Actuaciones de Prevención y Reducción	0,0	0,0	0,0	
	Campañas de Información y Sensibilización	112.641,0	9.964,2	8,8	
		<b>112.641,0</b>	<b>9.964,2</b>	<b>8,8</b>	
II. Recuperación y Reciclaje	Puntos Limpios	139.456,6	57.796,1	41,4	
	Medios de Transporte e Instalaciones Auxiliares	13.925,9	457.661,5	3.286,4	
		<b>153.382,5</b>	<b>515.457,6</b>	<b>336,1</b>	
III. Programa Nacional de Envases y Envases Usados	Contenedores de papel, cartón y vidrio	25.905,1	28.138,2	108,6	
	Contenedores de envases ligeros	50.710,2	29.618,5	58,4	
	Instalaciones auxiliares	4.708,2	59.067,2	1.254,6	
	Plantas de clasificación	303.466,7	97.099,5	32,0	
		<b>384.790,2</b>	<b>213.923,4</b>	<b>55,6</b>	
IV. Programa Nacional de Compostaje	Contenedores Fracción Fermentables	22.974,3	9.748,0	42,4	
	Medios de transporte e instalaciones auxiliares	6.956,8	46.533,4	668,9	
	Plantas de clasificación y compostaje	311.433,6	155.701,1	50,0	
	Plantas de compostaje y/o biometanización	308.874,5	250.568,5	81,1	
		<b>650.239,2</b>	<b>462.551,0</b>	<b>71,1</b>	
V. Valorización energética	Plantas con Recuperación Energética	432.467,7	57.415,7	13,3	
	Plantas sin Recuperación Energética	30.200,4	46,0	0,2	
		<b>462.668,1</b>	<b>57.461,7</b>	<b>12,4</b>	
VI. Eliminación	VI.1. Clausura, sellado y recuperación de vertederos incontrolados	289.387,6	184.280,7	63,7	
	VI.2. Construcción de nuevas instalaciones de clasificación y vertederos	E. de Transferencia	116.214,7	69.337,5	59,7
		Adecuación vertederos	70.555,4	128.527,6	182,2
		Vertederos	122.279,8	122.225,2	99,9
		<b>598.537,5</b>	<b>504.371,3</b>	<b>84,3</b>	
VII. Sensibilización Información	VII.1. Programas de sensibilización pública y concienciación ciudadana	7.993,5	* 98.554,6	1.232,9	
	VII.2. Programas de formación de personal especializado	39.965,5	* 213,0	0,5	
		<b>47.958,0</b>	<b>* 98.767,6</b>	<b>205,9</b>	
VIII. Control estadístico	Creación de sistemas de información y base datos	21.996,3	* 5.484,3	24,9	
		<b>21.996,3</b>	<b>* 5.484,3</b>	<b>24,9</b>	
I + D	I + D	73.949,7	* 1.741,9	2,4	
		<b>73.949,7</b>	<b>* 1.741,9</b>	<b>2,4</b>	
<b>TOTAL</b>		<b>2.506.162,5</b>	<b>*1.869.723,0</b>	<b>74,6</b>	

<sup>1</sup> No se dispone de los datos correspondientes al trienio 2004-2006.

\* Se incluyen las inversiones realizadas por Ecovidrio y Ecoembes.

Nota explicativa.-

La mayor parte de estas inversiones se han financiado, total o parcialmente, a través de los Fondos de Cohesión, y en su contabilidad el reparto por programas no se ha correspondido nominalmente con la desagregación que figuraba en el I PNRU. Por esta razón, inversiones que en el Plan estaban contempladas en el Programa I (Prevención y minimización) fueron asignadas a otros programas distintos, en particular el II (Recuperación y Reciclaje) y el VII (Sensibilización e Información). Quiere ello decir que las inversiones reales realizadas en el marco del Programa I fueron, en realidad, en el periodo 2000-2003, aproximadamente, del mismo orden de magnitud que las previstas.

**Tabla 2**

Cuadro Resumen de Inversiones I PNRU (2000-2003).

(Fuente: PNIR 2008-2015. Versión Preliminar)

## RESIDUOS PLÁSTICOS PROCEDENTES DEL BALIZAMIENTO DE CARRETERAS

Inversiones realizadas en el periodo 2000-03 (x1000 €).

CCAA	P.I	P.II	P.III	P.IV	P.V	P.VI	P.VII	P.VIII	I-D	TOTAL
Andalucía	248,1	31.349,1	44.494,7	69.016,6	12.024,4	34.778,6	8.176,5	13,0		200.091,0
Aragón		2.750,1	816,9			11.977,9	32,3			15.577,2
Asturias		819,8	2.894,2	2.810,7		3.065,2	339,7		28,8	10.056,4
Baleares	44,8	762,5	5.519,1	52.343,6		21.808,9	4.328,3	458,8		85.266,0
Canarias		7.455,3	16.836,6	10.888,4		14.604,0	113,9	29,5		49.827,7
Cantabria		6549,4	3.094,4	12.049,5	28.378,0	1.049,9	313,3	5,7		52.430,2
Castilla y León		9051,4	27.324,2	35.988,0		39.462,4	61,2	80,5		111.967,7
Castilla-La Mancha		22.145,6	8.723,9	16.873,8		10.014,9				57.758,2
Cataluña	1.894,5	67432,9	17.910,3	58.629,7	8.180,3	73.625,2	64.163,9	2.323,0	230,1	294.389,9
Ceuta		4,2	33,1			1.702,5	140,9			1.880,7
Extremadura	280,9	11.421,8	10.325,1	4.031,4		6.557,3	209,6	12,0	128,3	32.966,4
Galicia	674,3	22.174,5	6.391,7	50.146,5	6.595,0	46.806,5	4.085,2			136.973,7
La Rioja	299,9	82,8	464,1	1.264,5		1.771,9	428,6			4.311,8
Madrid	6.521,7	311.825,2	35.638,0	118.745,2	1.260,0	205.202,3	6.209,9	525,0		685.927,3
Melilla		3,9	2,6			15,0				21,5
Murcia		14.142,7	327,5	664,6		6.975,0				22.109,8
Navarra		425,3	254,9	2.290,5		765,4				3.736,1
País Vasco		2.392,9	4.097,8	926,4	24,0	9.507,1	1.002,9	6,0	21,6	17.968,7
C. Valenciana		4.668,2	28.614,3	26.081,6		14.581,3				73.945,4
Total	9.964,2	515.457,6	213.923,4	462.551,0	57.461,7	504.371,3	89.616,2	3.453,5	406,8	1.857.205,7

Fuentes: MMA, MAP, MEH, CCAA, EELL, Consorcios de RSU, Entidades privadas.

P.I. PREVENCIÓN  
P.II. RECUPERACIÓN Y RECICLAJE  
P.III. RESIDUOS DE ENVASES Y ENVASES USADOS  
P.IV. COMPOSTAJE  
P.V. VALORIZACIÓN ENERGÉTICA  
P.VI. ELIMINACIÓN  
P.VII. CONTROL ESTADÍSTICO  
P.VIII. CONCIENCIACIÓN CIUDADANA Y FORMACIÓN  
I-D-I. INVESTIGACIÓN + DESARROLLO + INNOVACIÓN

Tabla 3

Cuadro de Inversiones realizadas en el periodo 2000-2003.  
(Fuente: PNIR 2008-2015. Versión Preliminar)

**RESIDUOS PLÁSTICOS PROCEDENTES DEL BALIZAMIENTO DE CARRETERAS**

<b>1.- Programa de Prevención</b>		
- Red de nuevos Puntos Limpios (1.800) (*)		900
- I+D+i para promover la innovación tecnológica dirigida a la prevención (*)		600
- Elaboración de Planes de Prevención		40
	<b>TOTAL</b>	<b>1.540</b>
<b>2.- Programa de Reutilización</b>		
- Programa de implantación de mejoras técnicas para promover la reutilización (*)		540
	<b>TOTAL</b>	<b>540</b>
<b>3.- Programa de reciclaje:</b>		
- Envases		360
- Tratamiento de residuos biodegradables:		
• Compostaje		324
• Biodigestión		200
- Otros		60
	<b>TOTAL</b>	<b>944</b>
<b>4.- Programa de Valorización Energética</b>		
- Infraestructuras gestión residuos		25
- Adaptación de las incineradoras de RU existentes		70
- Estudios		8
	<b>TOTAL</b>	<b>103</b>
<b>5.- Programa de Eliminación</b>		
- Clausura, sellado y recuperación de vertederos		60
- Construcción de nuevos vertederos		120
- Adaptación de vertederos		60
- Estaciones de transferencia		100
	<b>TOTAL</b>	<b>340</b>
<b>6.- Programa de Información y Control Estadístico</b>		
- Sistemas de información e inventarios		40
	<b>TOTAL</b>	<b>40</b>
<b>7.- Programa de Concienciación y Formación</b>		
- Campañas de sensibilización social (*)		120
- Programa de formación de personal especializado (*)		100
	<b>TOTAL</b>	<b>220</b>
<b>8.- Programa de I+D+i</b>		
- Apoyo a los programas de I+D+i (*)		540
	<b>TOTAL</b>	<b>540</b>
	<b>TOTAL PNRU</b>	<b>4.267</b>

(\*) Inversiones de carácter horizontal: 2.800 M €

**Tabla 4**

Presupuesto en M€ para el periodo 2008-2015.

(Fuente: PNIR 2008-2015. Versión Preliminar. Anexo 1: II PNRU 2008-2015)



<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: <b>5.3</b>	Mes: <b>DICIEMBRE</b> Año: <b>2007</b>
<b>RESIDUOS PLÁSTICOS PROCEDENTES DEL BALIZAMIENTO DE CARRETERAS</b>		

<b>EQUIPO</b>	<b>CAPACIDAD (kg/h)</b>	<b>COSTE (€)</b>
Lavadora	500	4.500
Trituradora	100	9.000
Extrusora	100	4.000
Extrusora manual	100	2.000
Tolva		450-5.000
Prensa		1.000-12.000
Sistema de enfriamiento, cinta y cortadora		11.200
Sistema de depuración de agua de lavado		12.000

**Tabla 5**

Evaluación de los costes del capital inmovilizado del reciclaje mecánico.  
(Fuente: Grupo Emison)

## **6. NORMATIVA TÉCNICA**

- MINISTERIO DE FOMENTO. Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG3). Elementos de señalización, balizamiento y defensa de las carreteras. Art. 703. 28 de diciembre de 1999.
- UNE 135352:1998 EX: Señalización vertical y balizamiento. Control de calidad “*in-situ*” de elementos en servicio. Características y métodos de ensayo.
- UNE 135360:1994 EX: Señalización vertical. Balizamiento. Hitos de vértice en material polimérico. Características, medidas y métodos de ensayo. (En revisión).
- UNE 135362:1994 EX: Señalización vertical. Balizamiento. Hitos de arista de policloruro de vinilo (PVC rígido). Características, medidas y métodos de ensayo. (En revisión).
- UNE 135363:1998: Señalización vertical. Balizamiento. Balizas cilíndricas permanentes en material polimérico. Características, medidas y métodos de ensayo. (En revisión).
- UNE 53972:1996 EX: Plásticos. Polipropileno (PP) reciclado. Características y métodos de ensayo. (Revisada, en Información Pública).
- UNE 53978:1997 EX: Plásticos. Materiales de polietileno (PE) reciclado. Características y métodos de ensayo. (Revisada, en Información Pública).

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: <b>5.3</b>	Mes: <b>DICIEMBRE</b> Año: <b>2007</b>
<b>RESIDUOS PLÁSTICOS PROCEDENTES DEL BALIZAMIENTO DE CARRETERAS</b>		

- UNE 53979:2001: Plásticos. Poli(cloruro de vinilo) (PVC) reciclado. Características y métodos de ensayo. (Revisada, en Información Pública).
- UNE-EN 12899-2: Señales verticales fijas de circulación. Parte 2: Bolardos transiluminados. (Versión española de EN 12899-2: 2007, Prueba de Composición).
- UNE-EN 12899-3: Señales verticales fijas de circulación. Parte 3: Postes delineadores y retrorreflectores. (Versión española de EN 12899-3: 2007, Prueba de Composición).
- UNE-EN 13422: 2007: Señalización vertical de carreteras. Dispositivos de advertencia portátiles deformables y delineadores. Señalización de tráfico de carretera portátil. Conos y cilindros.
- UNE-EN 13437:2004: Envases y embalajes y reciclado de material. Criterios para los métodos de reciclado. Descripción de los procesos de reciclado y diagramas de flujo.
- UNE-EN 13440:2003: Envases y embalajes. Tasa de reciclado. Definición y método de cálculo.
- UNE-EN 13965-1:2007: Caracterización de residuos. Terminología. Parte I: Términos y definiciones relativos a los materiales.
- UNE-EN 13965-2:2007: Caracterización de residuos. Terminología. Parte II: Términos y definiciones relativos a la gestión.
- UNE-EN 15342:2007: Plásticos. Plásticos reciclados. Caracterización de reciclados de poliestireno (PS).
- UNE-EN 15343:2007: Plásticos. Plásticos reciclados. Trazabilidad y evaluación de conformidad del reciclado de plásticos y contenido en reciclado.
- UNE-EN 15344:2007: Plásticos. Plásticos reciclados. Caracterización de reciclados de polietileno (PE).
- UNE-EN 15345:2007: Plásticos. Plásticos reciclados. Caracterización de reciclados de polipropileno (PP).
- UNE-EN 15346: Plásticos. Plásticos reciclados. Caracterización de reciclados de poli(cloruro de vinilo) (PVC). (Versión española de EN 15346: 2007, Prueba de Composición).
- UNE-EN 15347:2007: Plásticos. Plásticos reciclados. Caracterización de residuos plásticos. (Versión española de EN 15347: 2007, Prueba de Composición).
- UNE-EN 15348:2007: Plásticos. Plásticos reciclados. Caracterización de reciclados de poli(tereftalato de etileno) (PET). (Versión española de EN 15348: 2007, Prueba de Composición).
- UNE-EN ISO 472:2002: Plásticos. Vocabulario.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 5.3	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>RESIDUOS PLÁSTICOS PROCEDENTES DEL BALIZAMIENTO DE CARRETERAS</b>		

- UNE-EN ISO 1872-1:2001: Plásticos. Materiales de polietileno (PE) para moldeo y extrusión. Parte 1: Sistemas de designación y bases para las especificaciones.
- UNE-EN ISO 1872-2:2007: Plásticos. Materiales de polietileno (PE) para moldeo y extrusión. Parte 1: Preparación de probetas y determinación de propiedades.
- UNE-EN ISO 1133:2001: Plásticos. Determinación del índice de fluidez de materiales termoplásticos en masa (IFM) y en volumen (IFV).
- UNE-EN ISO 1183-1:2004: Plásticos. Métodos para determinar la densidad de plásticos no celulares. Parte 1: Método de inmersión, método del picnómetro líquido y método de valoración.

## **7. REFERENCIAS**

- [1] “Estudio del sector del plástico”. Ed. Centro Español de Plásticos. 2007.
- [2] PARREÑA, A. Ingeniería Química, p.183, 2004.
- [3] II Congreso Nacional de Demolición y Reciclaje, 27-29 mayo, 2004. Zaragoza.
- [4] MARTÍNEZ, T. Plásticos Modernos, 591 (90), p. 216, 2005.
- [5] GEOSOPIO  
[http:// www.plasticos.geoscopio.com](http://www.plasticos.geoscopio.com)
- [6] ARANDES, J.M.; BILBAO, J.; LÓPEZ VALERIO, D. Revista Iberoamericana de Polímeros, 5 (1), p. 28, 2004.
- [7] VILLORIA, M. E.; CASTILLO, F.; PICO, M. P.; SOLERA, R. y BLANCO, M. Ingeniería Civil, 146, p.55, 2007.
- [8] Fundación para la Investigación y el Desarrollo Ambiental (FIDA).  
<http://www.fida.es/>
- [9] ECOPORTAL  
<http://www.ecoportel.net>.
- [10] Grupo Ambienta.  
<http://greenfield.fortunecity.com/buzzard/67/plastico.htm>
- [11] AGUADO, J.; SERRANO, D.; ESCOLA, J. M.; SAN MIGUEL, G. Plásticos Modernos, 570 (86), p.539, 2003.
- [12] LAZZARI, M.; LÓPEZ-QUINTELA, M. A. Anales de la Real Sociedad Española de Química, 101 (2), p. 57, 2005.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 5.3	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>RESIDUOS PLÁSTICOS PROCEDENTES DEL BALIZAMIENTO DE CARRETERAS</b>		

- [13] APME (Association of Plastics Manufacturers in Europe). Plásticos Modernos, 545 (82), p. 510, 2001.
- [14] SERRANO, D.P.; AGUADO, J.; ESCOLA, J. M.; GARAGORRI, E. Plásticos Modernos, 542 (82), p.539, 2001.
- [15] "Recyclage chimique des matières plastiques". Ed. Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME). Rapport final. 2002.
- [16] KAMISNKY, W.; HARTMANN, F. Angew. Chem. Int. Ed., 39, p. 331, 2000.
- [17] RAY, R.; THORPE, R.B. International Journal of Chemical Reactor Engineering, 5, Article A85, 2007.
- [18] BERMÚDEZ ALVITE, J.D. Gestión de los Residuos Urbanos. Situación actual y perspectivas futuras. SOGAMA. 2005.
- [19] KIRAN, N.; EKINCI, E.; SNAPE, C.E. Resources, Conservation and Recycling, 29, p. 273, 2000.
- [20] MUÑOZ, A. Cuadernos del CIFCA, 19. 1980.
- [21] GARO ENGEENERING  
<http://www.garoeng.com/principal.swf>
- [22] VILLORIA, M. E.; CASTILLO, F.; PICO, M. P.; SOLERA, R. y BLANCO, M. Ingeniería Civil, 147, p.79, 2007.
- [23] Plásticos universales.  
<http://www.plastunivers.com/Tecnica/Hemeroteca/ArticuloCompleto.asp?ID=6281>
- [24] MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE. II Plan Nacional de Residuos Urbanos 2008-2015 (II PNRU). Plan Nacional Integrado de Residuos (PNIR) 2008-2015. Versión preliminar. 27 de noviembre de 2007.
- [25] GRUPO EMISON  
<http://www.emison.com>

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 5.3	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>RESIDUOS PLÁSTICOS PROCEDENTES DEL BALIZAMIENTO DE CARRETERAS</b>		

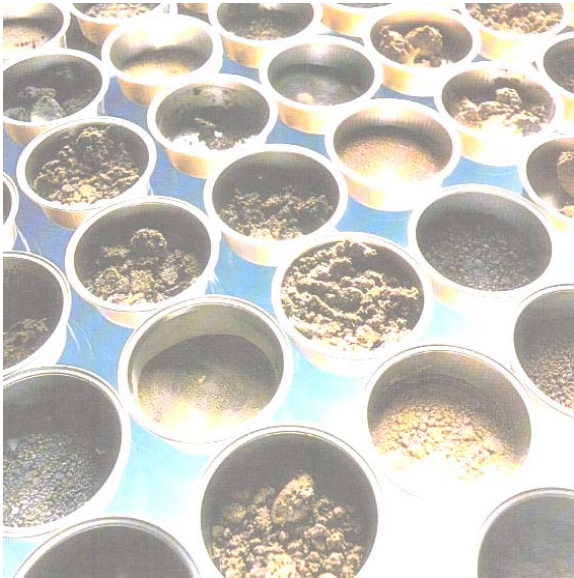
## 8. BIBLIOGRAFÍA DE INTERÉS

- “El reciclado de plásticos en España”. Ed. Asociación Nacional de Recicladores de Plástico (ANARPLA). 1996.
- “Estudio técnico comercial para la difusión y fomento del uso y aplicaciones de la granza reciclada de plásticos”. Ed. Asociación Nacional de Recicladores de Plástico (ANARPLA). 1999.
- “Generación, reciclado y mercados de los residuos plásticos en España”. Ed. Asociación Nacional de Recicladores de Plástico (ANARPLA). 2001.
- “Polymer Recycling”. Scheirs, J. Ed. Wiley. 2001.
- “Residuos Plásticos: Técnicas de tratamiento y valorización”. García Muñoz, R. Universidad Rey Juan Carlos.
- GARRY HOWELL, S. Journal of Hazardous Materials, 29, p. 143, 1992.
- Boletín N° 2008/1/64 de ANARPLA.
- Boletín N° 2007/12/63 de ANARPLA.
- Boletín N° 2007/10/61 de ANARPLA.
- Boletín N° 2007/9/60 de ANARPLA.
- Boletín N° 2006/12/52 de ANARPLA.
- Boletín N° 2006/10/50 de ANARPLA.
- Boletín N° 2006/9/49 de ANARPLA.
- Boletín N° 2006/1/42 de ANARPLA.
- Ley 11/1997 de Envases y Residuos de Envases.
- Ley 10/1998 de Residuos.
- Directiva del Consejo 75/442/CEE, de 15 de julio de 1975, relativa a los residuos (con las modificaciones de la Directiva del Consejo 91/156/CEE, de 18 de marzo de 1991) (DOCE núm. L 194, de 27 de julio de 1975, y núm. L 78, de 26 de marzo de 1991).
- Directiva 91/156/CEE del Consejo de 18 de marzo de 1991 por la que se modifica la Directiva 75/442/CEE relativa a los residuos. Diario Oficial N° L 078 de 26/03/1991, págs. 0032-0037.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 5.3	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>RESIDUOS PLÁSTICOS PROCEDENTES DEL BALIZAMIENTO DE CARRETERAS</b>		

- Directiva 94/62/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 20 de diciembre de 1994, relativa a los envases y residuos de envases. Diario Oficial N° L 365 de 31/12/1994, págs. 0010-0023.
- Decisión 96/350/CE, de la Comisión, de 24 de mayo de 1996, por la que se adaptan los anexos II A y II B de la Directiva 75/442/CEE, del Consejo, relativa a los residuos (DOCE, núm. L 135, de 6 de junio de 1996).
- Directiva 2004/12/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 11 de febrero de 2004 por la que se modifica la Directiva 94/62/CE relativa a los envases y residuos de envases.
- Directiva 2005/20/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 9 de marzo de 2005 por la que se modifica la Directiva 94/62/CE relativa a los envases y residuos de envases.
- Directiva 2006/12/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 5 de abril de 2006 relativa a los residuos.
- CER. resolución de 17 de noviembre de 1998, de la dirección general de calidad y evaluación ambiental, por la que se dispone la publicación del catálogo europeo de residuos (CER), aprobado mediante la decisión 94/3/CE, de la comisión, de 20 de diciembre de 1993
- ANARPLA  
<http://www.anarpla.es/>
- Asociación Española de Empresarios de Plásticos (ANAIP).  
<http://www.anaip.es/>
- CICLOPLAST  
<http://www.cicloplast.com/>
- Fundación Plásticos y Medio Ambiente.  
<http://greenfield.fortunecity.com/buzzard/67/plastico.htm>.
- SOGAMA  
<http://www.sogama.es/>

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 6.1	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>MATERIALES DE DRAGADO</b>		
Nombre en inglés: Dredged Material		



MUESTRAS DE MATERIAL DRAGADO EN FONDOS PORTUARIOS



RELLENO DE UN RECINTO CON MATERIALES DRAGADOS EN EL CANAL DE ACCESO AL PUERTO DE HUELVA

### 1.- ORIGEN

Los materiales de dragado, y en concreto los procedentes de los fondos portuarios, tienen su origen en la creación y mantenimiento de infraestructuras para el transporte marítimo. Los desarrollos tecnológicos y la necesidad de disminuir costes han influido en la construcción de barcos más grandes y eficientes, que han llevado aparejada la prolongación y profundización de los canales de navegación con objeto de disponer de accesos adecuados a las áreas portuarias. Estas áreas portuarias también incluyen zonas de maniobras, muelles y dársenas en las que se requieren determinados calados alcanzados mediante los dragados de primer establecimiento. Estos calados, en ocasiones solo pueden ser garantizados mediante posteriores dragados de mantenimiento en los que se extrae el material que la dinámica marina o fluvial ha ido acumulando. Estas operaciones de dragado, tanto las de primer establecimiento como las de mantenimiento, generan importantes volúmenes de material. Más del 90% de los sedimentos dragados para la navegación incluyen sedimento no contaminado, natural y no alterado que determina que en muchas ocasiones pueden ser considerados como un recurso más que como un residuo.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: <b>6.1</b>	Mes: <b>DICIEMBRE</b> Año: <b>2007</b>
<b>MATERIALES DE DRAGADO</b>		

Las operaciones de dragado incluyen tres etapas bien diferenciadas: extracción, transporte y vertido. Es precisamente en la última etapa, en la que un buen procedimiento de gestión del material dragado debe tener en consideración la posibilidad de aprovechar los materiales extraídos en algún uso productivo, siempre y cuando las características físicas y químicas del material dragado lo permitan. Los usos productivos del material dragado, entre ellos su aprovechamiento en obras marítimas, vendrán condicionados por la granulometría del material extraído, abarcando un amplio espectro que va desde rocas y gravas hasta arenas, limos y arcillas.

La redacción de esta ficha ha sido realizada con anterioridad a la entrada en vigor de la Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 19 de noviembre de 2008 sobre Residuos. El texto aprobado establece en su Artículo 2 las exclusiones del ámbito de aplicación de esta Directiva. En concreto en el apartado 3 se indica que sin perjuicio de las obligaciones impuestas en virtud de otra normativa comunitaria aplicable, se excluirán del ámbito de aplicación de la presente Directiva los sedimentos reubicados en el interior de las aguas superficiales a efectos 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 o de recuperación de tierras, si se demuestra que dichos sedimentos no son peligrosos. En consecuencia la próxima actualización de esta ficha tendrá en consideración los nuevos aspectos introducidos por la legislación comunitaria así como aquellos que se deriven de su transposición a la legislación española.

## **2.- VOLUMEN Y DISTRIBUCIÓN**

Los principales gestores de este tipo de residuo en España son los Puertos de Interés General, ya que son los que canalizan la mayor parte del tráfico marítimo y por tanto disponen de las mayores infraestructuras y requerimientos de calados. La disponibilidad de este residuo estará condicionada por las mejoras en las infraestructuras portuarias y por las necesidades de mantenimiento de calado de cada uno de los puertos españoles. Partiendo de la información que con carácter anual se recopila sobre los dragados realizados en los Puertos de Interés General 1 es posible conocer de forma detallada los volúmenes dragados en toda la costa española así como el destino que se ha dado a todos estos materiales en cada Autoridad Portuaria. La siguiente tabla refleja los volúmenes dragados (m<sup>3</sup>) para el periodo 1995-2004 en cada Autoridad Portuaria, diferenciando los de mantenimiento y los de primer establecimiento, e indicando el volumen según las diferentes alternativas de gestión del material.



<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: <b>6.1</b>	Mes: <b>DICIEMBRE</b> Año: <b>2007</b>
<b>MATERIALES DE DRAGADO</b>		

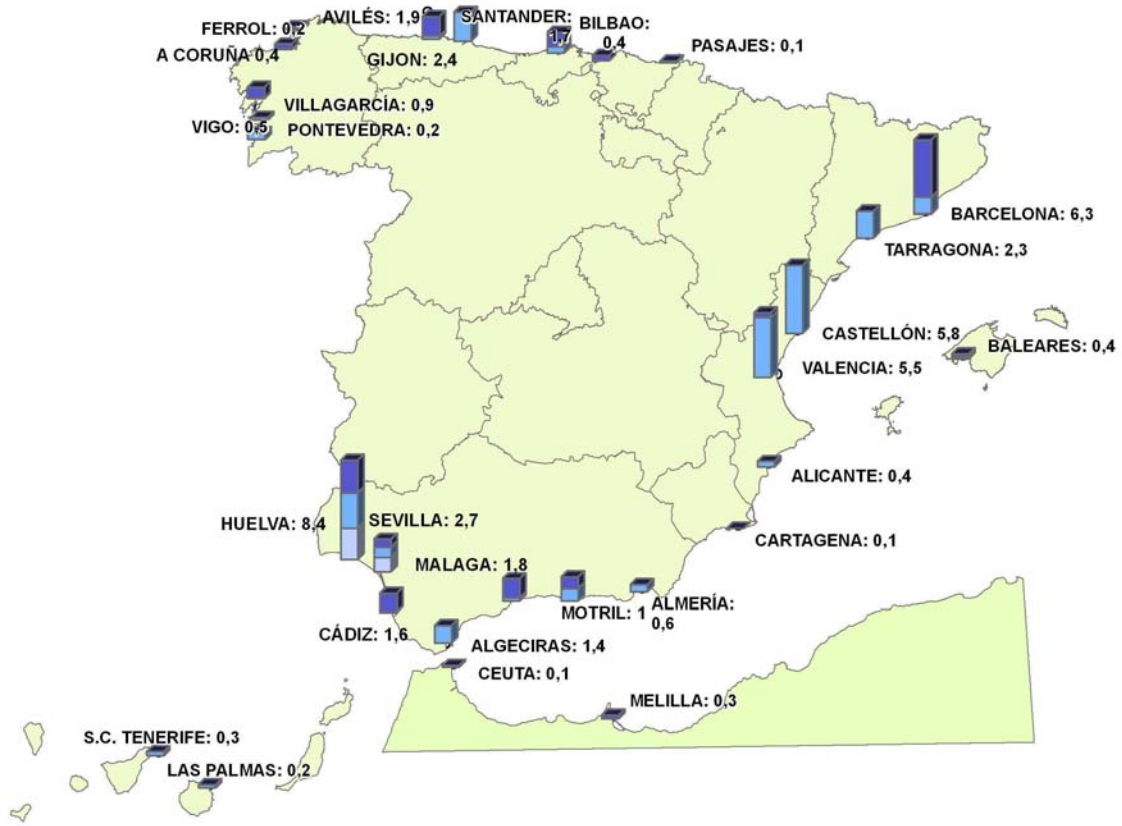
<b>DRAGADOS 1995-2004</b>						
NOMBRE PUERTO	Volumen dragado	Mantenimiento	Mejora o 1º establecimiento	Vertido al mar	Depósito sin uso productivo	Reutilizado
Bahía de Algeciras	3 748 220	236 900	3 511 320	0	650 834	3 097 386
Alicante	840 637	250 718	589 919	0	0	840 637
Almería- Motril	1 849 925	0	1 849 925	49 450	126 000	1 674 475
Avilés	3 870 010	2 208 322	1 661 688	3 620 010	0	250 000
Baleares	1 245 856	95 866	1 149 990	336 215	14 296	895 345
Barcelona	7 543 138	153 205	7 389 933	5 863 776	46 514	1 632 848
Bilbao	1 783 385	749 385	1 034 000	749 385	627 000	407 000
Bahía de Cádiz	3 192 078	908 672	2 283 406	3 000 428	0	191 650
Cartagena	67 441	11 034	56 407	0	14 012	53 429
Castellón	7 029 776	36 279	699 3497	0	503 491	6 523 285
Ceuta	132 978	1 921	131 057	95 860	10 706	26 412
Ferrol-S.Cibrao	722 937	5 600	717 337	458 264	49 864	214 809
Gijón	2 563 427	25 566	2 537 861	88 700	0	2 474 727
Las Palmas	5 606 691	0	5 606 691	0	0	5 603 660
Huelva	18 500 741	3 777 896	14 722 844	3 354 517	5 814 951	9 331 272
La Coruña	480 721	388 620	92 101	417 211	63 510	0
Málaga	4 197 300	274 300	3 923 000	3 923 000	0	274 300
Marín - Pontevedra	451 648	10 959	440 689	21 918	0	429 730
Melilla	420 169	254 027	166 142	318 660	6 926	94 583
Pasajes	495 335	473 360	21 975	495 335	0	0
Santander	3 517 959	1 513 715	2 004 244	2 163 341	25 284	1 329 334
Sevilla	7 249 040	6 703 040	546 000	1 862 857	4 344 952	1 041 239
Tarragona	4 387 446	11 529	4 375 917	0	683 344	3 698 106
S. C. Tenerife	356 666	6 694	349 972	21 992	2 235	332 439
Valencia	17 282 233	346 820	16 935 413	402 500	1 115 500	15 764 233
Vigo	965 796	97 398	868 398	4 672	158 000	803 124
Vilagarcía de Arousa	2 236 775	0	2 236 775	1 799 753	0	437 022

1) Inventario de Dragados en los Puertos Españoles. Actualización 2004 (Informe CEDEX)

**Tabla 1:** Volúmenes dragados (m<sup>3</sup>) para el periodo 1995-2004 en cada Autoridad Portuaria

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 6.1	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>MATERIALES DE DRAGADO</b>		

La siguiente figura muestra la cantidad total dragada (millones de m<sup>3</sup>) y los destinos del material dragado en los Puertos de Interés General para el periodo 2000-2004.



<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: <b>6.1</b>	Mes: <b>DICIEMBRE</b> Año: <b>2007</b>
<b>MATERIALES DE DRAGADO</b>		

### 3.- VALORIZACIÓN

#### 3.1- PROPIEDADES

Las propiedades de los materiales de dragado varían notablemente en función de su origen y el método de dragado. Además se presentan generalmente en forma estratificada como consecuencia de las sedimentaciones originadas por procesos hidráulicos pasados. Si los estratos son lo suficientemente gruesos, los diferentes materiales que los constituyen pueden ser dragados y gestionados separadamente.

#### **Propiedades Físicas**

Granulometría: Es la propiedad física fundamental para asignar un uso productivo al material de dragado. Los materiales de dragado pueden estar constituidos por rocas y suelos. Para la caracterización de los materiales de dragado se puede utilizar el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos o bien la Clasificación Modificada de Wentworth. Estas dos clasificaciones presentan diferencias en los límites entre categorías, destacando las diferencias a la hora de definir las arenas.

Los diferentes tipos de rocas existentes pueden variar desde las más débiles, como las margas blandas, hasta las de mayor dureza como el granito o el basalto, pasando por otras de dureza intermedia como las areniscas. Asimismo, las rocas obtenidas también pueden variar en tamaño, en función del equipo de dragado y del tipo de material. Las rocas que hayan sido obtenidas por voladura, disgregación mecánica o corte rara vez estarán compuestas de un único tipo de material. También podrán presentar grandes variaciones en la granulometría, siendo necesaria una clasificación del material e incluso una fragmentación de las piezas mayores en otras más pequeñas. Generalmente las rocas procedentes de dragado están exentas de contaminación.

Los sedimentos, según la Clasificación Modificada de Wentworth en función de los tamaños de partículas, D se clasifican en:

- a) Bolos:  $D > 64 \text{ mm}$
- b) Gravas:  $64 \text{ mm} > D > 2 \text{ mm}$
- c) Arenas  $2 \text{ mm} > D > 0,063 \text{ mm}$
- d) Limos  $0,063 > D > 0,002 \text{ mm}$
- e) Arcillas  $D < 0,002 \text{ mm}$

Este tipo de clasificación permite la utilización de la escala basada en unidades phi (Krumhien) donde:

$\phi = -\log_2 D$ , siendo D el diámetro en mm

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: <b>6.1</b>	Mes: <b>DICIEMBRE</b> Año: <b>2007</b>
<b>MATERIALES DE DRAGADO</b>		

A partir de estas unidades se puede caracterizar la distribución estadística de la granulometría del sedimento, de forma que la desviación estándar viene dada de forma aproximada por :  $\sigma_{\phi}$

$$= \frac{(\phi_{84} - \phi_{16})}{4} + \frac{(\phi_{95} - \phi_5)}{6}$$

Los materiales de dragado suelen ser una mezcla, en distintas proporciones de los tipos anteriores. Si se tratara de un sedimento completamente uniforme  $\phi_{05}$ ,  $\phi_{16}$ ,  $\phi_8$   $\phi_{95}$ , tienen el mismo valor y la desviación estándar es cero. Un sedimento estará bien clasificado si todas las partículas están cercanas al tamaño típico, representado por la media o por la mediana. Si las partículas se distribuyen en un amplio rango de tamaños, se dice que el sedimento está bien graduado.

Las gravas y arenas son consideradas los materiales más válidos procedentes de un proyecto de dragado, y al igual que las rocas suelen estar exentos de contaminación. No suelen presentar problemas geotécnicos ya que, en general tienen una capacidad portante suficientemente elevada y una deformabilidad, salvo para arenas blandas, casi instantánea al aplicar las cargas.

Las arcillas duras normalmente tienen su origen en operaciones de dragado de primer establecimiento y suelen obtenerse en forma de terrones o bien como una mezcla homogénea de agua y arcilla. Si el contenido de agua es elevado, puede ser necesario el drenaje previo de la arcilla dragada antes de ser transportada.

Los limos y arcillas blandas son los productos más comúnmente obtenidos en los dragados de mantenimientos en los canales de navegación y en muelles y dársenas portuarias. Por su alto contenido en agua deben ser drenadas en un proceso normalmente largo y que en ocasiones requiere un almacenamiento temporal. Son este tipo de materiales los que requieren una caracterización química más específica ya que esta fracción es la que suele acumular un mayor grado de contaminación.

Aunque la granulometría es la principal característica de cara a un uso productivo, existen otras propiedades físicas que conviene tener en consideración, y que se mencionan a continuación.

- Densidad volumétrica: es una media del peso considerando el volumen total. Suele ser baja para el material fino lo que está asociado a los procesos de sedimentación y a la naturaleza amorfa de la arcilla. Es un factor necesario para convertir el porcentaje de agua en peso al contenido de agua por volumen.
- Plasticidad: se utiliza la clasificación USCS, con el límite líquido (LL) y el límite plástico (LP) de Atterburg con objeto de evaluar la plasticidad de las muestras de sedimento de granulometría fina. El índice de plasticidad PI se define como la diferencia numérica entre LL y PL, y expresa la plasticidad del sedimento. Los análisis de plasticidad se deben realizar sobre la fracción fina separada.
- Peso específico de las partículas sólidas: El peso específico de las partículas sólidas es el cociente entre las masas del suelo seco y el volumen que ocupan sus partículas, es decir descontando los huecos existentes entre las mismas. Para la arena el valor medio del peso específico es de 2,65, mientras que para los suelos arcillosos varía entre 2,5 y 2,9. La

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: <b>6.1</b>	Mes: <b>DICIEMBRE</b> Año: <b>2007</b>
<b>MATERIALES DE DRAGADO</b>		

determinación del peso específico de las partículas se realiza en laboratorio mediante un aparato denominado picnómetro.

Teniendo en cuenta, que las arcillas pueden presentarse en todos los grados de compacidad posibles desde muy compactas hasta muy blandas, se incluyen en la siguiente tabla las propiedades de los diferentes tipos de suelos arcillosos. ( $N_{stp}$  valor obtenido del Ensayo de Penetración estándar,  $q_u$  resistencia a la compresión simple)

CONSISTENCIA	$N_{STP}$	IDENTIFICACIÓN MANUAL	$\gamma_{sat}$	$q_u$
Dura	>30	Se marca difícilmente	>22,4	>400
Muy rígida	15-30	Se marca con la uña	20,8-22,4	200-400
Rígida	8-15	Se marca con el dedo	19,2-20,8	100-200
Media	4-8	Moldeable bajo presiones fuertes	17,6-19,2	50-100
Blanda	2-4	Moldeable bajo presiones débiles	16,0-17,6	25-50
Muy blanda	<2	Se deshace entre los dedos	14,4-16,0	<25

**Tabla 2:** Propiedades de los diferentes tipos de suelos arcillosos

A continuación se presentan las propiedades geotécnicas de los suelos granulares.

MATERIAL	COMPACIDAD	$D_r$	$N_{stp}$	$\gamma_d$
Gravas bien graduadas	Densa	75	90	22,1
	Media	50	55	20,8
	Suelta	25	<28	19,7
Gravas mal graduadas	Densa	75	70	20,4
	Media	50	50	19,2
	Suelta	25	<20	18,3
Arenas bien graduadas	Densa	75	65	18,9
	Media	50	35	17,9
	Suelta	25	<15	17,0
Arenas mal graduadas	Densa	75	50	17,6
	Media	50	30	16,7
	Suelta	25	<10	15,9
Arenas limosas	Densa	75	45	16,5
	Media	50	25	15,5
	Suelta	25	<8	14,9
Limos inorgánicos y arenas muy finas	Densa	75	35	14,9
	Media	50	20	14,1
	Suelta	25	<4	13,5

**Tabla 3:** Propiedades geotécnicas de los suelos granulares

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: <b>6.1</b>	Mes: <b>DICIEMBRE</b> Año: <b>2007</b>
<b>MATERIALES DE DRAGADO</b>		

### Propiedades químicas

La composición química del material dragado es muy variable y depende del área geográfica y del sistema ecológico. Aunque el material dragado fundamentalmente está constituido por sedimentos naturales, también puede verse afectado por contaminación procedente de vertidos municipales o industriales o por el drenaje de fuentes terrestres. Los sedimentos marinos pueden agruparse en tres categorías (terrígenos, biogénicos y evaporitas) según su composición y origen, correspondiendo los más comunes en los dragados portuarios a los siguientes:

- Terrígenos: Normalmente están formados por silicatos, compuestos por cuarzo, feldespato, micas y arcillas y otros minerales asociados a rocas de origen ígneo. Proceden de la erosión terrestre y son transportados al medio marino por los ríos, el viento...Las arcillas incorporan en su estructura de silicatos iones metálicos constituyendo los diferentes tipos de arcilla (clorita, illita, caolinita y montmorillonita)

- Biogénicos: proceden de la erosión física y biológica de los esqueletos de los organismos y están fundamentalmente constituidos por carbonato cálcico y en menor proporción por silicatos.

Desde el punto de vista de su utilización en obra pública, resulta de interés determinar el contenido porcentual de carbonato cálcico, sulfato cálcico y materia orgánica ya que tienen incidencia en el comportamiento geotécnico. Es especialmente importante el contenido en materia orgánica ya que tiene influencia en el valor de la consolidación secundaria.

La siguiente tabla refleja rangos de concentración de metales pesados en sedimentos marinos del litoral español libres de influencia antropogénica. Las concentraciones vienen referidas para una muestra que no contiene finos ( $C_0$ ) y otra que contiene el 100% de finos ( $C_{100}$ ).

<b>CONCENTRACIONES NATURALES mg/kg (s.m.s.)</b>		
	<b><math>C_0</math></b>	<b><math>C_{100}</math></b>
Hg	0.06	0.06
Cd	0.06	0.18
Pb	3.4	23
Cu	2.8	14
Zn	10	60
As	10	10
Ni	7	19
Cr	4	30

**Tabla 4:** Rangos de concentración de metales pesados en sedimentos marinos del litoral español libres de influencia antropogénica

### 3.2.- PROCESAMIENTO

El procesamiento de los materiales de dragado dependerá del tipo de material y del uso o aplicación al que sean destinados.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: <b>6.1</b>	Mes: <b>DICIEMBRE</b> Año: <b>2007</b>
<b>MATERIALES DE DRAGADO</b>		

En el caso de que el material esté constituido por rocas puede hacerse necesario una clasificación del material y en ocasiones una fragmentación en rocas más pequeñas. Para gravas y arenas, y en ausencia de contaminación, su utilización puede ser directa como para la regeneración de playas, pero para aplicaciones en hormigones el material debe ser clasificado y lavado con agua dulce.

Las arcillas duras suelen proceder de las operaciones de dragado de primer establecimiento. Dependiendo del tipo de material y del equipo de dragado utilizado, puede obtenerse como resultado material en forma de terrones o bien como mezcla homogénea de agua y arcilla. Si el contenido de agua es elevado, puede ser necesario el drenaje previo antes de ser transportada.

Para los limos y arcillas blandas el drenaje es imprescindible debido a su alto contenido en agua, tanto para la utilización en rellenos como para fines agrícolas. Este proceso puede necesitar meses o años, y en ocasiones en función del sistema de drenaje utilizado, puede requerir un almacenamiento temporal.

### 3.4.- APLICACIONES

Hasta los años 90 el principal destino de los materiales de dragado de los fondos portuarios era el vertido al mar. Las exigencias de los Convenios Internacionales de Protección del Medio Marino, la mayor sensibilidad medioambiental y la utilidad de los productos de dragado para otros fines han determinado que el destino de los materiales de dragado haya variado sustancialmente y los usos productivos de los mismos constituyan actualmente la opción mayoritaria en la gestión de los productos de dragado.

En la siguiente gráfica se presenta la evolución del destino de los materiales de dragado en los puertos españoles en los últimos 30 años, en la que se aprecia como la reutilización del material dragado ha ganado en importancia en los últimos años frente al vertido al mar. El depósito en tierra sin un uso productivo también ha constituido una alternativa frente al vertido al mar motivado por el grado de contaminación de los materiales o por la distancia al mar que encarece la opción de vertido.



**Figura 1:** Evolución del destino de los materiales de dragado en los puertos españoles en los últimos 30 años

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: <b>6.1</b>	Mes: <b>DICIEMBRE</b> Año: <b>2007</b>
<b>MATERIALES DE DRAGADO</b>		

Los materiales de dragado pueden ser empleados en obras públicas pero también con fines agrícolas o industriales o para la realización de mejoras medioambientales. El proceso de toma de decisiones para la selección de un uso productivo debe incorporar los siguientes aspectos:

1.- Grado de contaminación del sedimento: si el sedimento a dragar se encuentra altamente contaminado no es aceptable para un uso productivo, excepto y en determinadas condiciones para la realización de rellenos. Las Recomendaciones para la Gestión del Material Dragado, elaboradas por el CEDEX en 1994, incluyen una clasificación de los materiales de dragado según el grado de contaminación y diferentes opciones de gestión del material en función de su contaminación.

2.- Caracterización del material: incluye características físicas como composición del suelo y granulometría en base al Sistema Unificado de Clasificación de Suelo (USCS) o la Clasificación Modificada de Wenworth. Pueden existir otros factores de interés como el contenido en materia orgánica, pH, salinidad y nutrientes.

3.- Una vez caracterizado el material se evalúan las posibilidades de aprovechamiento.

4.- Elección del emplazamiento: debe ser evaluado de forma conjunta con el modo de aprovechamiento.

5.- Viabilidad técnica: debe incluir aspectos como la distancia de bombeo, profundidad del agua. accesibilidad.

6.- .Evaluación del impacto ambiental de acuerdo con la normativa que le sea de aplicación.

7. Análisis Coste/Beneficio: deberá incluir una comparación de los costes de aprovechamiento, vertidos y beneficios derivados del aprovechamiento.

A continuación se detallan las aplicaciones más comunes en obras públicas.

### **3.4.1.- Creación y regeneración de playas**

Los materiales que constituyen las playas pueden ser transportados hacia mar abierto de forma rápida en condiciones de temporal. Si dicho material no se repone, la playa y eventualmente la línea de costa se erosionarán. El aumento del perfil de la playa mediante aportaciones externas, atenúa el impacto del oleaje sobre la costa con mejores resultados que las obras de defensa costeras. Para la regeneración de playas generalmente se necesitan grandes cantidades de materiales granulares (arenas o gravas) las cuales pueden ser suministradas por las obras de dragado. El material granular óptimo es el que posee una granulometría igual o más elevada que el natural constitutivo de la playa. La escasez de este tipo de material y las exigencias medioambientales a las extracciones de arenas en el mar para regeneración de playas, hacen que el valor de los productos de dragados para este fin, se haya elevado en los últimos años y justifique su transporte desde grandes distancias.



<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 6.1	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>MATERIALES DE DRAGADO</b>		

Además de la regeneración de playas, también puede plantearse su utilización en la mejora o en la creación de una nueva playa con fines recreativos. Para estos caso el material idóneo es la arena. Las arenas procedentes de operaciones de dragado, tanto de mantenimiento como de primer establecimiento, pueden aparecer inicialmente descoloridas y visualmente poco atractivas, debido a la presencia de pequeñas cantidades de finos. Este apariencia suele cambiar de forma rápida tras su colocación en la playa.

En algunas zonas, la interrupción del transporte litoral por la existencia de canales de navegación u otras infraestructuras portuarias, causa erosiones en la línea de costa situada aguas abajo en la dirección del transporte litoral. El dragado requerido para el mantenimiento de la actividad portuaria puede ser incorporado nuevamente a la dinámica litoral aguas abajo garantizando la continuidad del transporte de sedimentos. Esta operación es conocida como “trasvase de arenas o bypass”

En este tipo de aplicación del material dragado se considera imprescindible el estudio de calidad de los sedimentos tanto para estimar la aceptabilidad ambiental de las arenas cara a su utilización en las playas como para prever un hipotético paso de contaminantes al agua durante el dragado (contaminación de las aguas). Aunque no existe una normativa al respecto, si se dispone de una “Guía metodológica para la elaboración de estudios de impacto ambiental de las extracciones de arenas para la regeneración de playas” publicada por el CEDEX en 2004. En esta publicación se incluye una propuesta de los parámetros a considerar para la aceptabilidad del material así como los valores límites de dichos parámetros.

Los parámetros de calidad concretos a analizar en cada estudio pueden variar en función de los aportes contaminantes existentes en la zona, si bien, como parámetros obligatorios de determinación en todas las muestras, se recomiendan los siguientes:

<b>PARÁMETROS A ANALIZAR EN LAS MUESTRAS DE SEDIMENTOS</b>	
Calidad microbiológica	Coliformes fecales o E. coli
	Estreptococos fecales
	Hongos
Calidad química	Hidrocarburos totales
	Mercurio
	Cadmio
	Plomo
	Cobre
	Zinc

**Tabla 5:** Parámetros de calidad a analizar en las muestras de sedimentos

El criterio que se propone para juzgar la aceptabilidad ambiental de la utilización de la arena para su aporte a zonas de baño es que la concentración media ponderada para el material sea, para todos los parámetros, igual o inferior a la concentración límite que se propone para cada uno de ellos.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 6.1	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>MATERIALES DE DRAGADO</b>		

<b>CONCENTRACIONES LÍMITE EN SEDIMENTOS</b>		
<b>Calidad microbiológica</b>	Coliformes fecales o E. Coli	30 ufc/gr
	Estreptococos fecales	30 ufc/gr
	Hongos	10.000 ufc/gr
<b>Calidad química</b>	Hidrocarburos totales	125 mg/kg
	Mercurio	0,3 mg/kg
	Cadmio	0,5 mg/kg
	Plomo	60 mg/kg
	Cobre	50 mg/kg
	Zinc	250 mg/kg
	Carbono Orgánico Total	0,5%
<b>Otros</b>	Porcentaje de finos	12%

**Tabla 6:** Concentraciones límite en sedimentos

No obstante, pueden existir ocasiones en que, sobrepasándose en los materiales los valores límite anteriormente establecidos para metales pesados, exista una duda razonable sobre su biodisponibilidad, por ejemplo porque se considere que estos se encuentran formando parte de la matriz mineral de las partículas y que, por lo tanto, no deban de considerarse como contaminantes.

En estos casos se recomienda la realización de ensayos biológicos para poner de manifiesto la posible biodisponibilidad de los contaminantes. Los ensayos biológicos a realizar así como los criterios para interpretar sus resultados deben de ser los específicamente recomendados para materiales de dragado, algunos de los cuales próximamente se incorporarán a la nueva versión de las Recomendaciones para la Gestión de los Materiales de Dragado, considerándose conveniente la realización de ensayos de toxicidad tanto en fase líquida (para el impacto de la actuación sobre la columna de agua) como en la fase sólida (adecuados para evaluar los hipotéticos impactos de la arena una vez dispuesta en la playa).

Por otra parte, el límite para el porcentaje de finos debe de considerarse solo a título orientativo ya que los efectos del lavado de los materiales y su deposición sobre los fondos dependerán de las comunidades bentónicas existentes en cada zona.

### **3.4.2.- Creación de terrenos**

En esta aplicación se incluye la realización de rellenos y levantamientos y la protección de zonas sumergidas periódica o permanentemente.

La creación de terrenos en zonas costeras implica generalmente la construcción de obras perimetrales de contención que incorporen elementos de defensa frente a la erosión causada por el oleaje y las corrientes. El método más común para la realización de un recinto es la construcción de un dique perimetral cuyo lateral costero esté protegido por un escollero o un

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 6.1	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>MATERIALES DE DRAGADO</b>		

revestimiento de hormigón. Estos diques o sus núcleos pueden algunas veces ser contruidos utilizando productos de dragado. En estuarios y zonas costeras abrigadas sometidas a pequeñas carreras de mareas es innecesaria a veces la realización de obras previas de contención, siempre y cuando el material utilizado para el relleno tenga la granulometría suficiente para formar un talud estable frente a la erosión.

En el caso de obras portuarias puede ser necesario que el recinto de contención tenga paredes verticales en el frente marítimo. Los métodos disponibles incluyen pantallas de tablestacas, muros de bloques o construcciones con cajones. Para la creación de terrenos pueden utilizarse productos de dragado constituidos por materiales granulares o por finos, pero estos últimos requieren largos períodos de drenaje y consolidación, y las resistencias alcanzadas pueden ser bajas. Por esta razón, el uso de terrenos creados utilizando productos de dragado constituidos por materiales arcillosos o limosos, puede limitarse a fines recreativos en los que la sobrecarga de uso sea baja.

Si la tierra firme creada debe ser puesta en uso rápidamente, normalmente deberán utilizarse productos procedentes de dragados de primer establecimiento. Cuando sean aceptables tiempos más largos para su explotación podrán utilizarse productos procedentes de dragado de mantenimiento. El procedimiento de trabajo óptimo consiste en una operación conjunta de excavación y relleno, lo que exige una proximidad geográfica entre la zona de dragado y la de relleno, permitiendo un proceso de dragado continuo mediante la utilización de una draga de succión con cortador y tubería de descarga.

### 3.4.3.- Materiales de construcción.

Algunos productos de dragado pueden utilizarse como materiales de construcción. En muchos casos los productos de dragado están formados por una mezcla de arenas y fracciones arcillosas que deben ser separadas en el lugar de vertido o por medio de dispositivos como hidrociclones. También puede ser necesario un drenaje previo debido a un elevado contenido de agua.

Los productos de dragado tales como arena o grava pueden utilizarse como áridos para hormigones, aunque puede ser necesario un cribado para alcanzar la granulometría deseada. Su utilización para ladrillos y productos cerámicos tiene limitaciones ya que el contenido de arena no debe superar el 30% y los resultados de los ensayos requeridos deben ser favorables.

Los productos de dragado pueden utilizarse como materia prima para la producción de escolleras o bloques para la protección de diques o taludes de la erosión.

### 3.4.4.- Bermas en mar abierto

La función de una berma en mar abierto es absorber parte de la energía del oleaje que se aproxima a la playa, de forma que el clima marítimo sea menos severo, o bien la de modificar la dirección e intensidad del transporte local de sedimentos, con objeto de conseguir una mejora en la estabilidad de la playa. Generalmente se disponen de forma paralela a la playa, aunque la mejor disposición para cada lugar específico viene determinada por la dirección del oleaje más severo. Suelen proyectarse para estar permanentemente sumergidas, a menos que se construyan de escolleras, por lo que es posible su construcción mediante la descarga por fondo de los

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: 6.1	Mes: DICIEMBRE Año: 2007
<b>MATERIALES DE DRAGADO</b>		

productos de dragado desde gánguiles permitiendo que el mismo equipo o similar pueda ser empleado en el dragado y en el vertido del material.

El proceso de erosión de la berma, cuando exista, dependerá fundamentalmente de la profundidad del agua sobre la berma y del clima marítimo. Cuando el incremento del coste para la formación de la berma es pequeño en relación a otras alternativas de vertido, la duración de la berma no tiene excesiva relevancia, especialmente si está constituida por materiales continuamente disponibles a bajo coste a partir de operaciones de dragado de mantenimiento.

La modificación del clima marítimo en las proximidades de la costa producidas por las bermas puede mejorar las condiciones para la práctica de actividades recreativas como surf, natación o vela.

#### **3.4.5.- Recubrimientos**

Su objetivo es el aislamiento de materiales del entorno marino o incluso en tierra firme, mediante la colocación de una capa continua, estable y limpia, de un material apropiado sobre el material a aislar. Los recubrimientos exigen la formación de una capa resistente a la acción de oleaje y de las corrientes recubriendo los productos contaminados depositados previamente. Pueden utilizarse arenas, arcillas y materiales formados por la mezcla de varios tipos de suelos. Los recubrimientos también pueden ser realizados en tierra firme, siendo la arcilla el material mas adecuado en estos casos. El material a recubrir y el de recubrimiento pueden tener origen en el mismo proyecto de dragado.

#### **3.4.6.- Obras de defensa de costas.**

Además de la regeneración de playas y creación de bermas, los materiales de dragado pueden ser empleados en la construcción de otras estructuras.

Pueden ser empleados en la construcción de espigones, tanto formando el núcleo con arenas bombeadas o utilizando productos arcillosos.

La roca obtenida en los procesos de dragado puede utilizarse como protección de taludes de todo uno, piezas de escollera, espigones o material para núcleos de dique.

#### **3.4.7.- Mejora de terrenos.**

Los productos de dragado de origen fluvial proceden de la erosión de tierras vegetales y materia orgánica que pueden ser utilizados sobre terrenos de calidad agrícola baja con el objeto de mejorar la estructura del suelo. Incluso los productos de dragado provenientes de ambientes salinos pueden, después de tratamientos apropiados ser adecuados para su aprovechamiento como

tierra vegetal. Los suelos pueden ser utilizados para plantaciones con fines no alimenticios, tales como árboles destinados a la fabricación de pasta papel y arbustos ornamentales.

Existe experiencia en otros países de mejora de terrenos mediante métodos que consisten en la aportación de materiales cohesivos, como limos y arcillas, provenientes de dragados de

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: <b>6.1</b>	Mes: <b>DICIEMBRE</b> Año: <b>2007</b>
<b>MATERIALES DE DRAGADO</b>		

mantenimiento. Estos métodos normalmente requieren una división interna de la zona de colocación para permitir aportaciones sucesivas de forma rotativa hasta una altura limitada. De esta forma se optimiza el proceso de desecación. Para alcanzar un buen drenaje superficial pueden mezclarse materiales granulares con la capa superior de material cohesivo.

Los terrenos mejorados utilizando materiales finos tendrán generalmente resistencias inferiores que aquellos mejorados utilizando materiales granulares. Entre las potenciales aplicaciones de los materiales finos se incluyen explotaciones agrícolas y ganaderas, zonas recreativas, campos de juego, campos de golf y parques.

Con la excepción de la clasificación holandesa para vertido en tierra de material dragado, que entre otras aplicaciones incluye el uso en agricultura y creación de espacios verdes, no existe legislación ambiental en otros países europeos.

### **3.5.- OBRAS REALIZADAS**

En España se vienen reutilizando los materiales de dragado desde los años 70, pero es realmente a mediados de los 90, cuando esta opción de gestión se aplica a un volumen importante del material dragado.

Dentro de los proyectos a destacar se encuentra, la reutilización de 13.500.000 m<sup>3</sup> procedentes de los fondos portuarios del Puerto de Valencia en la ampliación de la dársena sur y línea de atraque realizada en 1996.

También son de destacar las regeneraciones periódicas de las playas del Arenal del Puntal, Loredo y Somo realizadas con los materiales procedentes del dragado del canal de acceso al Puerto de Santander que aportan volúmenes anuales que oscilan de los 150.000 a los 400.000 m<sup>3</sup>.

Otra obra de gran interés ha sido la creación de un recinto para confinamiento de material dragado no apto para el vertido al mar en el Puerto de Huelva. Este recinto que ha sido receptor de unos 3.000.000 m<sup>3</sup> de material dragado, finalmente ha propiciado la construcción de un muelle multipropósito adosado al citado recinto.

Otras aplicaciones de material dragado que afectan a menores volúmenes pero dignas de mención han sido la utilización de materiales procedentes del dragado del río Guadalquivir (700.000 m<sup>3</sup>) en usos agrícolas por el Ayuntamiento de Lebrija en el periodo 1999-2001, o el empleo de arenas procedentes del Puerto de Ceuta (50.000 m<sup>3</sup>) como material de construcción.

## **4.- CONSIDERACIONES MEDIOAMBIENTALES**

### **Generalidades**

La Ley 10/1998, de Residuos, de 21 de abril, establecía en su artículo 3 que tendrían consideración de residuo todos aquellos que figurasen en el Catálogo Europeo de Residuos

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: <b>6.1</b>	Mes: <b>DICIEMBRE</b> Año: <b>2007</b>
<b>MATERIALES DE DRAGADO</b>		

(CER). Este Catálogo fue aprobado por la Decisión 94/3/CE de 20 de diciembre de 1993. Asimismo se definían como “residuos peligrosos” en el artículo 3 de la Ley 10/1998 aquellos que figuraban en la lista de residuos peligrosos, aprobada en el Real Decreto 952/1997 (que incorporaba la Decisión 94/904/CE en la que se incluía la lista comunitaria de residuos peligrosos), así como los recipientes y envases que los hayan contenidos. También son considerados peligrosos por dicha Ley los que hayan sido calificados como peligrosos por la normativa comunitaria y los que pueda aprobar el Gobierno de conformidad con lo establecido en la normativa europea o en convenios internacionales de los que España sea parte.

Las Decisiones Comunitarias 94/3/CE y 94/904/CE han sido derogadas por la Decisión 2000/532/CE mediante la que se aprueba La Lista Europea de Residuos, que entre otras modificaciones refunde la lista de residuos y la lista de residuos peligrosos en una sola. La orden MAM/304/2002 de 8 de febrero (con corrección de errores de 12 de marzo), publica en su Anejo 2 la mencionada Lista Europea de Residuos.

En el Anejo 2 de la Orden MAM/304/2002 se establece en la Introducción que los residuos que aparecen en la lista señalados con un asterisco (\*) se consideran residuos peligrosos. Se establece también en la Introducción que *“cualquier residuo clasificado como peligroso a través de una referencia específica o general a sustancias peligrosas sólo se considerará peligroso si las concentraciones de estas sustancias son suficientes para que el residuo presente una o más de las características enumeradas en el anexo III de la Directiva 91/689/CEE del Consejo. En lo que se refiere a las características H3 a H8, H10 y H11 se aplica el apartado A de la introducción del Anejo II”* Este apartado incluye concentraciones de diferentes tipos de sustancias como cancerígenas, muy tóxicas, mutagénicas y otras, a partir de las cuales se considera que el residuo es peligroso y que en todos los casos superan la concentración de 1000 mg/kg

Los materiales de dragado vienen incluidos en la Lista Europea de Residuos en el Capítulo 17 correspondiente a “Residuos de la Construcción y demolición” con los siguientes códigos:

17 05 05\* Lodos de drenaje que contienen sustancias peligrosas

17 05 06 Lodos de drenaje distintos de los especificados en el código 170505

El término “lodos de drenaje” corresponde a la traducción que se ha hecho del término que figura en la versión inglesa de la Decisión 2000/532/CE y que correspondía a “dredging spoil”, equivalente por tanto a los materiales de dragado.

En el caso de materiales de dragado que contengan sustancias peligrosas será necesario demostrar que sus cantidades no son suficientes para que presente alguna de las características de peligrosidad para que pueda ser clasificado como un residuo no peligroso.

Las Directrices para la gestión de material dragado de los Convenios Internacionales de Protección del Medio Marino establecen en la evaluación de las opciones de gestión de material dragado, la obligatoriedad de valorar la posible aplicación de un uso productivo al material de dragado.

No existe una normativa específica que regule la reutilización de los materiales de dragado, pero existen una serie de publicaciones o Normas que pueden ser tenidas en consideración.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: <b>6.1</b>	Mes: <b>DICIEMBRE</b> Año: <b>2007</b>
<b>MATERIALES DE DRAGADO</b>		

En concreto para regeneraciones de playas puede servir de referencia la publicación del CEDEX “Guía metodológica para la elaboración de estudios de impacto ambiental de las extracciones de arenas para la regeneración de playas”

Para la clasificación del material dragado según el grado de contaminación, puede servir de referencia las “Recomendaciones para la Gestión del Material Dragado” elaboradas por el CEDEX en 1994, que incluyen valores límites de contaminantes para el vertido al mar de materiales de dragado y proponen condiciones de aislamiento del material en caso de que se superen ciertos valores de contaminantes. Estas Recomendaciones se encuentran actualmente en proceso de revisión.

En el caso de utilización del material dragado en tierra deberá ser tenido en consideración el R.D. 9/2005 sobre suelos contaminados y el R.D. 1481/2001 sobre eliminación de residuos en vertedero.

## **6.- REFERENCIAS**

- [1] CEDEX: Clave 23-499-9-1555 Metodología para determinar cargas antropogénicas (1º Fase) Junio 2000.
- [2] CEDEX, Manuales y Recomendaciones “Guía metodológica para la elaboración de estudios de impacto ambiental de las extracciones de arenas para la regeneración de playas” 2004.
- [3] CEDEX, Clave 23-496-9-142 “Estudio sobre los aspectos ambientales de los dragados”. Julio 2001
- [4] 2ª Curso General de Dragados. Mayo 2004 (Puertos del Estado)
- [5] CEDEX, Clave 23-405-9-202 “Inventario de dragados en los Puertos Españoles. Actualización 2004, Noviembre 2005
- [6] AIPCN, Informe del Grupo de Trabajo nº19, “El aprovechamiento de los productos de dragado”1996
- [7] U.S. Army Corps of Engineers “Beneficial uses of Dredged Material”. 1987.
- [8] CEDEX- Puertos del Estado. Recomendaciones para la Gestión del Material Dragado en los Puertos Españoles. 1994
- [9] Estaire José, Propiedades geotécnicas de los suelos marinos, Master en Ingeniería de Puertos y Costas.
- [10] U.S. Army Corps of Engineers. Coastal Engineering Manual, Chapter 1” Coastal Sediment Properties”2002

<b>FICHA TÉCNICA</b>	CLAVE: <b>6.1</b>	Mes: <b>DICIEMBRE</b> Año: <b>2007</b>
<b>MATERIALES DE DRAGADO</b>		

#### **7.- ENTIDADES DE CONTACTO**

- PUERTOS DEL ESTADO  
Avenida del Partenón 10, 28042 Madrid