

# Fabricación de mezclas bituminosas con incorporación de residuos en el marco del Plan Nacional Integrado de Residuos (PNIR)

Asphalt mixes incorporating waste as established by the Spanish Integrated Waste Plan

**Miguel Ángel del Val Melús.** Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos  
Catedrático de Caminos y Aeropuertos. Escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.  
Universidad Politécnica de Madrid (UPM). Grupo de investigación de Ingeniería de Carreteras I+D (UPM).  
miguel.delval@upm.es

**Resumen:** En este artículo se analiza la nueva situación creada en relación con el aprovechamiento de residuos en la construcción de firmes de carreteras tras la aprobación, a finales de 2008, del Plan nacional integrado de residuos. En particular, se aborda el empleo de residuos en la fabricación de mezclas bituminosas, diferenciándose las distintas misiones que aquéllos pueden desempeñar en éstas. Se incide especialmente en los residuos de plástico film (de distintos orígenes), en los neumáticos fuera de uso y en los residuos de construcción y demolición.

**Palabras Clave:** Firme; Mezcla bituminosa; Residuo; Reciclado; Desarrollo sostenible; Medio ambiente; Reología

**Abstract:** This article considers the situation concerning the reuse of waste in road pavement construction following the introduction of the Spanish *Integrated Waste Plan* at the end of 2008. The article examines the use of waste in asphalt mixes and describes the different purposes of the same, with particular focus on three of these wastes: plastic film (from various sources), waste tyres and construction and demolition debris.

**Keywords:** Pavement; Asphalt mix; Waste; Recycling; Sustainable development; Environment; Rheology

## 1. Antecedentes

Los residuos de todo tipo, tanto desechos como subproductos, se vienen utilizando en la construcción de carreteras desde hace décadas, en unas ocasiones buscando una forma de eliminar dichos residuos y en otras con la pretensión de conseguir un ahorro de las materias primas utilizadas habitualmente en esos procesos de construcción. En particular, un destino de los residuos han sido las capas de los firmes y, más en concreto, las mezclas bituminosas que constituyen las capas superiores de esos firmes. Se pueden encontrar en la literatura muchas referencias sistemáticas que datan de la década de 1970 y de los primeros años de la de 1980 (Elvira y Del Val, 1982), época en la que el primer objetivo de la utilización de residuos en las mezclas bituminosas era el ahorro energético, pero en la que también empezaban a tomarse en consideración criterios estrictamente ambientales.

## 1. Background

*All types of waste, whether refuse or residual materials or industrial by-products, have been employed in the construction of roads for decades, sometimes as a means of eliminating this waste and on other occasions to make savings on the raw materials normally used in these construction processes. Waste material has been particularly employed in pavements and, specifically, in the asphalt mixes forming the upper layers. Many references may be found in the literature dating back to the seventies and early eighties (Elvira & De Val, 1982), when the main reason for using waste in asphalt mixes was to obtain energy savings, but where consideration was also beginning to be given to environmental criteria.*

*The studies carried out in Spain over these years were not always followed through, though the use of*

Los estudios llevados a cabo en esos años en España carecieron de la necesaria continuidad en el tiempo, a pesar de que con algunos residuos se pasó de la fase de estudio de laboratorio a la de tramos de ensayo e incluso, en determinados casos, a la de ejecución de obras de una cierta importancia. Las razones por las que los esfuerzos realizados no se plasmaron en técnicas de aplicación habitual son diversas, pero se pueden destacar las siguientes (Departamento de Ordenación del Territorio y Medio Ambiente del Gobierno Vasco, 2004):

- Bajo precio de depósito en vertedero.
- Inexistencia o bajo coste de sanciones por vertido inapropiado.
- Bajo precio de las materias primas naturales tradicionalmente utilizadas.
- Existencia de un número reducido de instalaciones específicas para el tratamiento de los residuos.

A las anteriores razones, válidas en general al considerar todo posible aprovechamiento de cualquier tipo de residuo, hay que añadir, en el caso concreto de un posible aprovechamiento en capas de firme, que las especificaciones han favorecido poco, al menos hasta no hace demasiado tiempo, la incorporación de materiales procedentes del tratamiento de residuos.

## **2. Situación actual.** **El Plan Nacional Integrado de Residuos**

La situación empieza a cambiar con la promulgación de la *Ley 10/1998, de 21 de abril, de Residuos*. De ella se pueden destacar los siguientes aspectos (Del Val, 2005):

1. Tiene por objetivo contribuir a la protección del medio ambiente, coordinando la política de residuos con las políticas económica, industrial y territorial, al objeto de incentivar la reducción de aquéllos en origen y dar prioridad a su reutilización, reciclado y valorización sobre otras posibles técnicas de gestión.
2. Prevé la elaboración de planes nacionales de residuos, que han de ser el resultado de la integración de los respectivos planes autonómicos de gestión, admitiendo la posibilidad de que las entidades lo-

*some wastes occasionally moved on from the laboratory study phase to test sections and, in very specific cases, to use in works of certain importance. The fact that these efforts were not reflected by commonly applied techniques is essentially down to the following reasons (Basque Government Department for Regional Planning and the Environment):*

- *Low cost of waste disposal*
- *Non-existence or low cost of fines for illegal dumping*
- *Low price of natural raw materials traditionally employed in road construction*
- *Small number of waste processing plants*

*In addition to these reasons, that apply to the possible use of all types of waste, and when specifically referring to the use of waste in pavement construction, Spanish highway specifications have not tended to favour the incorporation of materials from waste processing plants until relatively recently.*

## **2. Current situation.** **The National Integrated Waste Plan**

*The situation began to change on the introduction of the Waste Act 10/1998 of 21 April. Particular reference may be made to the following aspects of this Act (Del Val, 2005):*

1. *The object of the Act is to contribute to the protection of the environment, coordinating waste policy with economic, industrial and regional policies in order to promote a reduction of waste at source and give priority to the reuse, recycling and recovery of waste over other possible waste management techniques.*
2. *The Act considers the preparation of national waste plans resulting from the integration of the respective regional waste management plans and allows the possibility that local authorities prepare their own management plans for urban waste.*
3. *The act is not restricted to regulating waste once generated, but also considers the stages prior to waste generation and regulates the activities of*

- cales puedan elaborar sus propios planes de gestión para los residuos urbanos.
3. No se limita a regular los residuos una vez generados, sino que los contempla también en la fase previa a su generación, regulando las actividades de los productores, importadores y compradores intracomunitarios y, en general, las de cualquiera que ponga en el mercado productos generadores de residuos.
  4. Con la finalidad de lograr una estricta aplicación del principio de "quien contamina paga", se hace recaer sobre el bien mismo, en el momento de su puesta en el mercado, los costos de la gestión adecuada de los residuos que genera dicho bien y sus accesorios, tales como el envasado o el embalaje.
  5. Con carácter general, se establece el régimen al que habrá de adecuarse la producción, la posesión y la gestión de residuos, manteniéndose un nivel mínimo de intervencionismo administrativo en los supuestos de eliminación y valorización de los residuos dentro del propio proceso productivo, cuando ello permita al gestor beneficiarse de las medidas de incentivación de mercados de valorización.
  6. Para la consecución de los objetivos de reducción, reutilización, reciclado y valorización, así como para la promoción de las tecnologías menos contaminantes en la eliminación de residuos, la Ley prevé que las administraciones públicas, en el ámbito de sus respectivas competencias, puedan establecer instrumentos de carácter económico y medidas que incentiven estas materias.

Como se ha apuntado, la Ley dispone, en su artículo 6, que "el Gobierno podrá establecer objetivos de reducción en la generación de residuos, así como de reutilización, reciclado y otras formas de valorización obligatoria de determinados tipos de residuos". Además de lo contenido en la propia Ley, y como también se ha apuntado, en ella se dispone que las herramientas para la formulación y consecución de esos objetivos son los planes autonómicos de residuos, de competencia de cada Comunidad Autónoma, y los planes nacionales de residuos, que "serán aprobados por el Consejo de Ministros, previa deliberación de la Conferencia Sectorial de Medio Ambiente, y en su elaboración deberá incluirse un trámite de información pública".

- producers, importers and intra-community buyers and, in general, those of anyone placing waste generating products on the market.
4. In order to ensure the strict application of the "polluter pays" principle, as soon as a product is placed on the market, the entity producing the same is responsible for the costs of suitable waste management generated by the products and its accessories, such as packaging or containers.
  5. A general system is established covering the production, holding and management of waste while maintaining a minimum degree of administrative intervention in cases of disposal and recovery of waste within the production process itself, where this enables the waste manager to benefit from incentives for waste recovery.
  6. In order to meet objectives concerning the reduction, reuse, recycling and recovery of waste, together with the promotion of less polluting technologies for waste disposal, the Act authorizes public authorities, within their respective capacities, to establish financial and other incentives in these areas.

As referred to above, article 6 of the Act stipulates that "the Government may establish objectives for reduction in waste production, together with the reuse, recycling and other mandatory forms of recovery of certain types of waste". In addition to the content of the Act and as already indicated, the Act also establishes that these objectives shall be implemented and obtained through regional waste plans, administered by each Regional Government, and national waste plans that "shall be approved by the Council of Ministers following deliberation by the Environmental Co-ordination Committee and prior public information sessions during the drafting of the same".

One such plan, the National Plan on Construction and Demolition Debris 2001-2006 was published in the Official Journal in 2001. This plan, as its name suggests, essentially refers to waste materials and rubble generated during demolition works. However, the plan only contains one reference to road that is not even particularly specific (in spite of indicating that asphalt mixes make up 5% of all construction

Así, por ejemplo, en 2001 se publica en el Boletín Oficial del Estado el Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición 2001-2006, que se refiere fundamentalmente a los coloquialmente denominados *escombros* (restos de la demolición de edificios). En cambio, sólo contiene una referencia, no demasiado concreta, a las carreteras (aparte de indicar que el asfalto -entiéndase las mezclas bituminosas- representa el 5 % de los residuos de construcción y demolición llevados a vertedero en la Comunidad de Madrid) cuando en la introducción del Plan se indica literalmente lo siguiente:

*“Los denominados residuos inertes pueden tener distintas procedencias: excavaciones de suelos o ejecución de obras de reforma en calles del casco urbano; los originados en carreteras e infraestructuras; mezcla de los escombros de construcción o demolición de edificios y los rechazos o roturas de la fabricación de piezas y elementos de construcción”*

Quizás pueda pensarse que hubiera sido deseable que en el Plan apareciera una referencia explícita a los residuos obtenidos al levantar o demoler pavimentos asfálticos. De todos modos, no hay nada que permita asegurar que el reciclado de mezclas bituminosas estuviese excluido de los objetivos del Plan (Del Val, 2005).

La dinámica de elaboración de planes nacionales referidos a residuos concretos se ve modificada desde el momento en el que el Ministerio de la Presidencia asume el dictar disposiciones de desarrollo de la Ley de Residuos, que se aprueban por Real Decreto y que se refieren a la producción y gestión de distintos residuos. Así, por ejemplo, el *Real Decreto 1619/2005, de 30 de diciembre, sobre la gestión de neumáticos fuera de uso* (Boletín Oficial del Estado nº 2, de 3 de enero de 2006) y el *Real Decreto 105/2008, de 1 de febrero, por el que se regula la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición* (Boletín Oficial del Estado nº 38, de 13 de febrero de 2008).

Mucho más recientemente (26 de diciembre de 2008), una vez que los diferentes planes nacionales aprobados habían finalizado con carácter general su período de vigencia y que ha sido publicada la nueva Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 19 de noviembre de 2008 sobre residuos, el Consejo de Ministros ha acordado, a propuesta del Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino,

*and demolition debris taken to landfills or dumps within the Región of Madrid). This reference is given in the introduction to the Plan and states:*

*“Inert waste may come from different sources: soil excavations or city centre street refurbishment works; those resulting from roadworks and infrastructures; the combination of building construction or demolition debris and reject or broken building supplies and components”*

*It would not have gone amiss if there had been a specific reference in the Plan to the waste obtained on demolishing asphalt road surfaces. However, there is nothing to suggest that the recycling of asphalt mixes is excluded from the objectives of the Plan (Del Val, 2005).*

*The preparation of national plans for specific waste underwent modification when the Ministry of the Presidency took the prerogative to issue provisions developing the Waste Act, approved by Royal Decree, and referring to the production and management of different waste. These provisions include, by way of example, the Royal Decree 1619/2005, of 30 December, on the management of waste tyres (Official Journal No. 2, of 3 January 2006) and Royal Decree 105/2008, of 1 February, regulating the production and management of construction and demolition debris (Official Journal No. 38 of 13 February 2008).*

*More recently (26 December 2008) and following the general expiry of the different national plans and the introduction of the new Directive 2008/99/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste, the Spanish Council of Ministers agreed, at the proposal of the Ministry for the Environment and Rural and Marine Affairs, to pass the National Integrated Waste Plan (PNIR) (Official Journal No. 49 of 26 February 2009). Though the plan considers, under separate chapters, the types of waste listed below, it fails to consider other waste which is produced in even greater quantities such as agricultural and farm waste, and others such as radioactive and hospital waste (Azni et al. 2005), etc.:*

- Household waste
- Hazardous waste

aprobar un *Plan Nacional Integrado de Residuos (PNIR)* (Boletín Oficial del Estado nº 49, de 26 de febrero de 2009). Este plan contempla en capítulos separados los tipos de residuos que se indican a continuación, que no son ciertamente todos los posibles, pues quedan fuera los que se producen en las mayores cantidades, que son los agrícolas y ganaderos, y otros como los radiactivos, los hospitalarios (Azni et al., 2005), etc.:

- Residuos urbanos de origen domiciliario.
- Residuos peligrosos.
- Vehículos fuera de uso.
- Neumáticos fuera de uso (NFU).
- Pilas y acumuladores.
- Residuos de aparatos eléctricos y electrónicos.
- Residuos que contienen PCB (policloruro de bifenilo) y PCT (policloruro de trifenilo).
- Residuos de construcción y demolición (RCD).
- Lodos de depuradoras.
- Suelos contaminados.
- Plásticos de uso agrario.
- Residuos de industrias extractivas.
- Residuos industriales no peligrosos.

En lo que se refiere a los distintos residuos específicos, en el capítulo dedicado a los neumáticos fuera de uso se señala que la legislación específica aplicable es el citado Real Decreto 1619/2005, de 30 de diciembre, y, por su parte, en el capítulo dedicado a los residuos de construcción y demolición (RCD) se recuerda que la legislación específica aplicable es el también citado Real Decreto 105/2008, de 1 de febrero; sobre éstos, el PNIR indica lo siguiente:

*“Se estima que la producción de RCD en España ha crecido en el período 2001-2006 a un ritmo medio del 8,7 % anual. Esta tendencia se ha roto en 2007 y pasará a tasas negativas a partir de 2008 como resultado del descenso en la actividad constructora que se está experimentando actualmente, más acusado en obras de edificación residencial. A una intensa producción de RCD se ha unido hasta ahora que un alto porcentaje de los RCD generados (se estima que más del 50 %) han venido siendo objeto de vertido incontrolado sin tratamiento alguno. De los tratados correctamente, 12 millones de toneladas (en torno al 30 % de los generados) se envían a vertedero directamente o como rechazo de operaciones previas de tratamiento, dando co-*

- *End of life vehicles*
- *Waste tyres*
- *Batteries and chargers*
- *Waste electrical and electronic equipment*
- *Waste containing PCB (Polychlorinated Biphenyls) and PCT (Polychlorinated Terphenyls)*
- *Construction and demolition debris (CDD)*
- *Sewage sludge*
- *Contaminated soils*
- *Agricultural plastics*
- *Mining waste*
- *Non-hazardous industrial waste*

*With regards to the different waste specified in the plan, the chapter dedicated to waste tyres indicates that the specific legislation applicable to this area is that of the said Royal Decree 1619/2005 of 30 December, while the chapter dedicated to construction and demolition debris (CDD) refers to the Royal Decree 105/2008, of 1 February. In this latter regard the Integrated Waste Plan (PNIR) states the following:*

*“The production of construction and demolition debris in Spain is estimated to have risen at an average annual rate of 8.7% over the 2001-2006 period. This trend changed in 2007 and moved to negative rates as from 2008 as a result of the current slowing down of building activity, particularly in residential building work. To date a very large percentage of the CCD (estimated at over 50%) resulting from this intense production of construction and demolition debris has been dumped illegally or in an uncontrolled manner without any treatment whatsoever. With regard to correctly processed CDD, 12 million tons (around 30% of the total produced) have been sent directly to landfills or following rejection from preliminary treatment operations, and just 3 million tons have been recovered as recycled aggregate”.*

*The National Integrated Waste Plan makes the following appraisal of the current situation:*

*“In general terms, the objectives for the prevention and recycling of CDD established for 2006 in the National Plan for Construction and Demolition Debris have not then been met. The*



mo resultado que apenas 3 millones de toneladas son valorizadas como árido reciclado”.

Por otro lado, el PNIR hace el siguiente balance de la situación actual:

*“En general, puede decirse que no se han alcanzado los objetivos de prevención y reciclado de RCD que para el año 2006 se había fijado el Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición. Las causas fundamentales son el extraordinario crecimiento de la actividad constructora en España en ese período, que se ha reflejado en un crecimiento imparable de los RCD generados. Por otra parte, el vertido ilegal o incontrolado de RCD, es decir, sin cumplir con los requisitos establecidos en la legislación de vertederos, ha sido significativo en todo el período 2001-2006 y, aunque se ha ido reduciendo paulatinamente, no lo ha hecho al ritmo que hubiera sido deseable. Ello, unido a los bajos precios de admisión de RCD en los vertederos autorizados, ha dificultado una operación sostenible y rentable de las plantas de tratamiento de RCD, que experimentan dificultades para su funcionamiento, máxime en el momento actual en que la cantidad de RCD generados ha disminuido sensiblemente.*

*En el futuro deberán explorarse las posibilidades que la valorización de residuos inertes en la restauración de espacios degradados (cumpliendo con los requisitos básicos establecidos por el Real Decreto 105/2008) presenta para poder alcanzar unos objetivos de valorización en línea con los establecidos en la nueva Directiva Marco de Residuos para los RCD.*

*A medio plazo deberá comprobarse también que el RD 105/2008 tiene los efectos de mejora en la situación actual que se han buscado con su aprobación. Deberá incidirse de forma especial en la erradicación de los vertederos ilegales de RCD y en las condiciones de funcionamiento de los legales, sobre todo en los precios de vertido, verdadero “talón de Aquiles” de la gestión de RCD si se quiere alcanzar unos niveles de reciclado aceptables (...).*

*(...) El tercer aspecto en el que hay que incidir de forma especial es en fomentar la demanda de productos del reciclado de RCD, en especial de áridos reciclados. Ello se conseguirá con el desarrollo de normativa sobre las condiciones técnicas y ambientales que deben incorporarse a los pliegos de pres-*

fundamental reasons are the extraordinary growth in building activity in Spain over this period, which has been reflected by an undiminished rise in the amount of CDD produced. Furthermore, the illegal or uncontrolled dumping of CDD, that is to say, dumping that does not comply with the requirements established in legislation on waste treatment areas, has been considerable throughout the entire 2001-2006 period and, while, this has gradually been reduced, it has not fallen at a desirable rate. This together with the low charges of admission of CDD at authorised land fills, has complicated the sustainable and profitable operation of CDD treatment plants and has led to operational difficulties at the same, particularly at the current moment in time when there has been a noticeable drop in the amount of CDD produced.

In the future it shall be necessary to explore the possibilities provided by the recovery of inert waste in the restoration of degraded areas (complying with the basic requirements established in Royal Decree 105/2008) in order to reach waste recovery objectives in line with those established for CDD in the new Waste Framework Directive.

In the medium term it shall also be necessary to verify that the RD 105/2008 has had the desired effects on improving the current situation as sought on the publication of the same. Particular attention should be made to the eradication of illegal dumping of CDD and the operating conditions of legal landfills, particularly with regards to disposal fees, the real “Achilles’ heel” of CDD management, if we wish to reach acceptable levels of recycling (...).

(...) A third aspect requiring particular emphasis is the promotion of the use of recycled CDD products, and particularly recycled aggregates. This can be achieved by developing legislation on the technical and environmental conditions that should be incorporated in work specifications to enable the inclusion of these materials in construction works and aid their employment by companies. The public authorities should do more to ensure

*cripciones técnicas de las obras para que se facilite la inclusión de estos materiales en los proyectos de obra y se facilite su empleo por parte de las empresas constructoras. Las administraciones públicas deben hacer más para que las obras en las que ellas actúen como promotoras incorporen estos materiales en porcentajes cada vez mayores como sustitución de materiales vírgenes”.*

De los trece tipos de residuos que, como se ha citado, el PNIR aborda separadamente, en uno u otro momento una buena parte de ellos se ha considerado como utilizable en la construcción de firmes (Kandhal, 1992; Decker, 1993), aunque, por supuesto, en muy diferente medida y, en determinados casos, no ya en los últimos tiempos, debido a que ahora se contempla su gestión de forma muy distinta a como se hacía en el pasado:

- Residuos urbanos de origen domiciliario (principalmente vidrios, plásticos y escorias de incineración de residuos urbanos).
- Residuos peligrosos (principalmente aceites industriales usados).
- Neumáticos fuera de uso.
- Residuos de construcción y demolición (RCD) (principalmente, áridos obtenidos a partir de la trituración de hormigones y, en la medida en que se acepte incluirlos en este grupo, productos del levantamiento de firmes viejos).
- Lodos de depuradoras.
- Plásticos de uso agrario.
- Residuos de industrias extractivas (principalmente gangas de explotaciones mineras y material de rechazo de cantera).
- Residuos industriales no peligrosos (principalmente escorias siderúrgicas, cenizas volantes de centrales térmicas, residuos de las industrias cerámicas y del vidrio, fibras, plástico de cables eléctricos, y subproductos de refinería tales como el azufre y los residuos de desasfaltado).

### **3. Los residuos en la fabricación de mezclas bituminosas**

---

Los residuos cuyo empleo en capas de firme alcanzó antes una cierta importancia fueron los inertes de naturaleza pétreo, utilizables sin mayores complicacio-

*that works promoted by the authorities incorporate ever increasing percentages of these materials in replacement of virgin materials”.*

*Many of the thirteen types of waste individually referred to in the National Integrated Waste Plan have, to a greater or lesser extent and in specific circumstances, been considered in the past to be suitable for use in road pavement construction (Kandhal, 1992; Decker, 1993). However, this is not so much the case nowadays as the management of these wastes is considered in a very different manner to that of the past:*

- Household waste (mainly glass, plastic and incinerated household waste)
- Hazardous waste (mainly used industrial oils)
- Waste tyres (ELT)
- Construction and demolition debris (CDD) (mainly aggregate obtained from the crushing of concretes and, to a certain extent and where accepted within this group, products from the demolition of old road surfaces).
- Sewage sludge
- Agricultural plastics
- Mining waste (mainly mine tailings and quarry rejects)
- Non-hazardous industrial waste (mainly slags, fly ash from thermal power plants, plastic from electric cables and refinery by-products such as sulphur and deasphalting residue).

### **3. Waste materials in the production of asphalt mixes**

---

*The waste materials previously employed in road pavement construction tended to be rock-based inert waste, which could be employed without greater complications (though, logically after the corresponding laboratory tests) as aggregates in the granular layers (quarry rejects, waste from the ceramic industry) and those that on account of their chemical composition could replace cement, even advantageously, in the lower layers (granulated blast-furnace slag, calcium sulphate fly ash). However, in more recent years and as is well known, asphalt mixes have been made on the basis*

nes (aunque, lógicamente, tras los correspondientes ensayos de laboratorio) como áridos en capas granulares (material de rechazo de cantera, residuos de las industrias cerámicas) y los que por su composición química podían ser sustitutivos, incluso con ventaja, del cemento como conglomerante en capas inferiores del firme (escorias granuladas de horno alto, cenizas volantes sulfocálcicas). Por el contrario, en los últimos años ha destacado sin duda, como es bien sabido, el empleo en la fabricación de mezclas bituminosas de polvo de caucho obtenido a partir de la trituración de neumáticos fuera de uso (Gallego, 1999; CEDEX, 2007).

La fabricación de mezclas bituminosas con incorporación de residuos se ha considerado un reto tecnológico desde la década de 1960. Los residuos pueden desempeñar en ellas distintas misiones:

- Sustitución parcial o total de los áridos.
- Sustitución total o parcial del filler.
- Sustitución total o parcial del ligante bituminoso.
- Modificación de la reología del ligante bituminoso.
- Modificación de la reología de la mezcla bituminosa.
- Refuerzo de la estructura resistente.

La sustitución parcial o total de áridos en las mezclas bituminosas se puede llevar a cabo evidentemente incorporando a las mezclas bituminosas residuos o productos obtenidos mediante el tratamiento de residuos que puedan ser considerados inertes y cuya naturaleza sea similar a la de los materiales naturales pétreos. En este sentido se han utilizado gangas de explotaciones mineras, material de rechazo de cantera, materiales granulares obtenidos mediante el tratamiento de RCD (Tertre, 2006), escorias de incineración de residuos urbanos, escorias metalúrgicas (principalmente escorias de acería y escorias cristalizadas de horno alto), vidrio y residuos de las industrias cerámicas. Las condiciones de empleo son, en el fondo, similares a las de cualquier árido natural, debiendo tenerse especial cuidado, sin embargo, con características tales como la porosidad y la adhesividad con el ligante bituminoso (Pérez et al., 2007). Por supuesto, hay que comprobar también que no se produzcan reacciones químicas con el propio ligante ni, sobre todo, con el agua con el que pueda estar en contacto la mezcla; en este sentido son especialmente conocidas las precauciones derivadas de la posible presencia

of rubber crumb obtained from the crushing of used tyres (Gallego, 1999; CEDEX, 2007).

*The production of asphalt mixes incorporating waste materials has been considered as a technical challenge ever since the 1960's. These waste materials may perform different functions in the mix:*

- *Partial or total replacement of aggregate.*
- *Partial or total replacement of filler*
- *Partial or total replacement of asphalt binder*
- *Modification of the rheological properties of the asphalt binder*
- *Modification of the rheological properties of the asphalt mix*
- *Strengthening.*

*The partial or total replacement of aggregates in asphalt mixes may evidently be performed by incorporating inert waste or products obtained from waste treatment with properties similar to that of natural rock-based materials. These products have included mine tailings, quarry rejects, granular materials obtained from the treatment of CDD (Tertre, 2006), incinerated household waste, metallurgical slag (mainly steel slag and air-cooled slag), glass and waste from ceramic industries. This waste is generally employed in the same manner as any natural aggregate, though special care should be taken with regards to aspects such as the porosity and adhesion with the asphalt binder (Pérez et al., 2007). It is obviously necessary to ensure that no chemical reactions occur with the binder itself not with the water that may be in contact with the mixture. In this latter regard, much is known of the precautions to be taken regarding the possible presence of free lime in slag, which requires prior deactivation (exposure to air for sufficient time or water treatment), in order to eliminate the risk of expansion. It is also necessary to check that no leaching occurs that may present a source of water or soil pollution or otherwise affect the flora or fauna.*

*With respect to the total or partial replacement of the filler, this is considered on the basis of waste of mineral nature in powder form. Regardless of the fact that this powder may be obtained from some of the waste products referred to in the preceding paragraph, the most widely employed form is that*



de cal libre en las escorias siderúrgicas, lo que exige su *desactivación* previa (teniéndolas al aire un tiempo suficiente o tratándolas con agua), a fin de eliminar el riesgo de expansividad. Así mismo, es necesario comprobar que no se producen lixiviados que pudieran ser fuente de contaminación de las aguas o de los suelos, o afectar de una u otra manera a la fauna o a la flora.

Por su parte, la sustitución total o parcial del filler se plantea a partir de residuos de naturaleza mineral que se presenten en forma pulverulenta. Independientemente de que se pudiera obtener este polvo de algunos de los residuos citados en el párrafo anterior, destacan sin duda las cenizas volantes de central térmica, especialmente las silicoaluminosas, debido a que por su baja actividad tienen un limitado interés en su empleo como conglomerante en sustitución del cemento. Lo que se debe evaluar por encima de todo (además de la finura, que siempre se puede ajustar mediante los correspondientes procesos de trituración) es la adhesividad con el ligante. Hay que señalar finalmente que no deben incluirse en este grupo, aunque sean también materiales pulverulentos, residuos que pueden tener una influencia en la reología de la mezcla bituminosa (por ejemplo, el polvo obtenido mediante la trituración del caucho NFU) o en la del ligante (el azufre de refinerías), o dar lugar a un efecto de refuerzo en la estructura resistente de la mezcla (como ocurre con fibras de tamaño microscópico, que a simple vista tienen aspecto pulverulento).

La sustitución total o parcial del ligante bituminoso de una mezcla por un residuo puede entenderse de dos maneras: por un lado, es posible cuando el residuo incorporado tiene unas características aglomerantes similares hasta cierto punto a las del ligante convencional (aceites, residuos de desasfaltado); por otro, cuando la incorporación del residuo aporta a la mezcla unas propiedades que permiten que la proporción necesaria de ligante bituminoso pueda reducirse. Uno de los residuos más estudiados (aunque poco aplicado en la práctica) es el plástico *film* (polietileno de baja densidad) incorporado directamente a la mezcla bituminosa; este plástico puede proceder tanto de residuos urbanos como de la agricultura (plásticos de invernadero), e incluso a veces de los RCD. Los principales estudios se llevaron a cabo en la década de 1980 para los plásticos del primero de esos orígenes (Del Val, 1985) y en la de 1990 para los del segundo origen cita-

*of fly ash from thermal power plants, and particularly aluminium silicates, due to limited interest these have when employed as a binder instead of cement on account of their low activity. The aspect which should be considered above all else (in addition to its fineness, which may always be adjusted by the corresponding crushing processes) is that of its adhesion with the binder. It should be indicated that this group of materials should not include crushed waste products that might have an influence on the rheology of the asphalt mix (such as the powder obtained from the crushing of waste tyres rubber) or on the binder (refinery sulphur), or those which have an stiffening effect on the structure of the mix (such as fibres of microscopic size which appear to the eye to be in powder form).*

*The total or partial replacement of the asphalt binder of a mix by a waste material may be considered in two ways: on the one hand, this is possible when the incorporated waste product has, to a certain extent, similar binding characteristics to those of a conventional binder (oils, deasphalting residue); or alternatively, when the incorporation of the waste material adds properties to the mix which allow a reduction in the amount of asphalt binder required. One of the waste materials that has been most widely studied (though infrequently employed in practice) is that of plastic film (low density polyethylene) incorporated directly in the asphalt mix. This plastic may come from both household waste or agricultural waste (greenhouse plastics) and even from CDD. The main studies on the use of plastics from this first group were conducted in the 80's (Del Val, 1985) while those concerning agricultural plastics were carried out in 1990. However, this technique was abandoned following the development of waste management processes that allowed the massive recycling of all these plastics, as an alternative to virgin polyethylene, for the manufacture of items such as pipes, new packaging, etc. (Fig. 1). The use of plastic film waste in asphalt mixes is being reconsidered at present as this only concerns a fraction of the treatment of solid household waste formed by plastics and which no longer purely concerns low density polyethylenes, but also includes those with a considerable mix of polymers and other materials, which make it very difficult or*



Fig. 1 Granza de polietileno obtenida a partir de residuos plásticos/  
Fig. 1. Polyethylene chips produced from waste plastic.

do. Sin embargo, la técnica se abandonó en la medida en que el desarrollo de los procesos de gestión de los residuos permitió reciclar masivamente todos esos plásticos, como alternativa al polietileno virgen, en la fabricación de elementos tales como tuberías, nuevos embalajes, etc. (Fig. 1). En la actualidad se está empezando a replantear el empleo de los residuos constituidos por plástico *film* en las mezclas bituminosas, pues se trata de una fracción del tratamiento de residuos sólidos urbanos formada por plásticos que ya no son sólo polietileno de baja densidad, sino que en ellos hay una notable mezcla de polímeros y de otros materiales, lo que hace muy difícil o incluso imposible su empleo en la fabricación de elementos de polietileno (Fig. 2).

Por otro lado, pueden ser aprovechados como sustitutos parciales de los ligantes bituminosos los aceites industriales usados (técnica obsoleta debido a los graves problemas ambientales que originan los eventuales lixiviados de metales pesados), así como los residuos de desasfaltado (con propano o con butano) que se obtienen en las propias refinerías de petróleo y que están en el origen de las denominadas mezclas bituminosas de alto módulo (Del Val, 1996).

Para que se produzca la modificación de la reología del ligante bituminoso es necesario que el residuo tenga una estructura molecular que permita su *inserción* en la estructura molecular del ligante mediante determinados procesos físicos y, si es preciso, con la ayuda de aditivos químicos. Es el caso del polvo de caucho obtenido por trituración de NFU cuando se utili-

even impossible to use for the manufacture of polyethylene elements (Fig. 2).

Asphalt binders could also be partially replaced by other waste materials such as used industrial oils (an obsolete technique on account of the serious environmental problems posed by any subsequent leaching of heavy metals) and deasphalting residue (with propane or butane) obtained at oil refineries and which serve as the basis of high-modulus asphalt mixes.

In order to modify the rheology of the asphalt binder, the waste has to have a molecular structure that allows its to be *inserted* in the molecular structure of the binder by certain physical processes and, where necessary, with the aid of chemical additives. This is the case of crumb rubber powder obtained from the crushing of waste tyres when employed using the "wet" system. This is also the case of certain plastic waste (first PVC, then low density polyethylene) incorporated in the bitumen by specific processes. However, in the majority of cases concerning waste plastic, these are incorporated in the mix and not in the binder and, subsequently, do not directly affect the rheology of this over the latter. Finally, it is also necessary to refer to the use of sulphur obtained as a by-product in oil refineries as a possible modifier of the rheology of the asphalt binder (Valero et al., 1976-78).

As we have just indicated, it is important to differentiate between those processes for modifying the binder and those modifying the asphalt mix. This is the case of plastic film, plastic waste from electrical cables, plastic bottles (first PVC, then high-density polyethylene and currently PET) or that of other plastics that may be recovered from CDD (Fig. 3) and which allow modifications to be made in the response to temperature change or to different loading rates; as is also the case of waste tyres incorporated by the "dry" process.

However, on occasions these products are added as strengtheners rather than to modify the rheology of the mix (SETRA, 2004). In this case, it is more important that the plastic be thermosetting rather than thermoplastic (though in this latter case, and in addition to the said rheological modification, a certain degree of stiffening may be obtained). This is also the case of waste in the form of fibres (which may be of very different nature, both organic and inorganic), that is to say, substances formed by



za mediante la denominada *vía húmeda*. Es también el caso de algunos desechos plásticos (antiguamente PVC, posteriormente polietileno de baja densidad) incorporados al betún asfáltico mediante determinados procesos; sin embargo, en la mayor parte de los casos de plásticos procedentes de residuos su incorporación se lleva a cabo a la mezcla y no al ligante, no actuando por tanto directamente sobre la reología de éste sino sobre la de aquélla. Finalmente, hay que citar también como posible modificador de la reología del ligante bituminoso el azufre obtenido como subproducto en las refinerías de petróleo (Valero et al., 1976-78).

Como se acaba de apuntar, es importante distinguir los procesos de modificación del ligante de los que pueden denominarse de *modificación* de la mezcla bituminosa. Éste es el caso del citado plástico *film*, de los desechos plásticos de cables eléctricos, de los plásticos procedentes de botellas (en el pasado PVC, posteriormente polietileno de alta densidad, en la actualidad PET) o de otros plásticos que pueden recuperarse de los RCD (Fig. 3), con los que se pueden conseguir modificaciones en la respuesta frente a los cambios de temperatura o frente a las distintas velocidades de aplicación de las cargas; es el caso también de los NFU incorporados por vía seca.

Pero en ocasiones, más que perseguirse la modificación reológica de la mezcla, lo que se pretende es reforzar su estructura resistente (SETRA, 2004). En ese caso ya no interesa tanto que los plásticos sean termoplásticos (aunque entonces, además de la citada modificación reológica se logra también un cierto efecto de refuerzo), sino termoendurecibles. Es lo que ocurre también con residuos que son fibras (que pueden ser de muy diferente naturaleza, orgánica o inorgánica), es decir, sustancias formadas por partículas que, aun microscópicas, tienen una dimensión muy superior a las otras dos, pero que sobre todo pueden caracterizarse por su elevadísima superficie específica, de manera que su incorporación a la mezcla permite incrementar notablemente la dosificación del ligante, consiguiéndose así beneficios relacionados sobre todo con la durabilidad de la mezcla (Del Val y Potti, 1991).

#### **4. Perspectivas que se abren con el Plan Nacional Integrado de Residuos**

En relación con los NFU, el PNIR hace referencia a una situación ya prácticamente consolidada en el sec-



Fig. 2. Plástico film procedente de RCD/  
Fig. 2. Plastic film produced from CDD.

*particles that, while microscopic, are of a size very much larger than the other two, but which may be particularly noted for their very high specific surface. The incorporation of these fibres in the mix allows a notable increase in the binder content and provide ensuing benefits, particularly with regards to the durability of the mix (Del Val & Potti, 1991).*

#### **4. Perspectives opened by the National Integrated Waste Plan**

*With regard to waste tyres, the Spanish Integrated Waste Plan makes reference to a situation that is practically consolidated in the road sector and which may, subsequently, be considered to be reaching technological maturity. In the chapter dedicated to this type of waste, the Plan indicates the following:*

*“One of the most important applications of waste tyres in public works is its use in asphalt mixes for roads, as tyre rubber improves performance, is more economical than other alternative modifiers and allows the recovery of a large amount of waste.*

*In order to promote this application, the General Technical Specifications for Road Works and Bridges (PG-3) issued by the Ministry of Transport, specifies the priority use of crumb rubber powder in*

tor de la carretera y que, en consecuencia, puede considerarse que está llegando a su madurez tecnológica. En el capítulo dedicado a estos residuos se señala expresamente lo siguiente:

*“Una de las aplicaciones de mayor interés en las obras públicas del caucho de NFU es su utilización en mezclas bituminosas para carreteras, puesto que el caucho de los neumáticos mejora su comportamiento, es más económico que otros modificadores alternativos y permite consumir una gran cantidad de residuo.*

*Para fomentar esta aplicación el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3) del Ministerio de Fomento, especifica el empleo prioritario de polvo de caucho en mezclas bituminosas siempre que sea técnicamente y económicamente posible.*

*Para ayudar a los técnicos y a las Administraciones de carreteras a utilizar estos materiales, definiendo las condiciones técnicas que permiten su empleo y complementando así a lo estipulado en el PG-3, en el año 2007 se publicó, conjuntamente por el entonces Ministerio de Medio Ambiente, por el Ministerio de Fomento y por el CEDEX, el “Manual de empleo de caucho de NFU en mezclas bituminosas” que facilitará la utilización a gran escala de estos materiales”.*

Parece pues que los redactores del PNIR manifiestan su satisfacción con lo ya conseguido en los últimos años, y consideran por tanto que no es preciso dar unas nuevas directrices para los años próximos.

En cambio, en lo que respecta a los RCD, las referencias del PNIR parece que se dirigen ya no tanto al presente como a un próximo futuro cuando se expresan de la siguiente manera:

*“Los departamentos de la Administración General del Estado y las demás administraciones públicas fomentarán que en los Pliegos de prescripciones técnicas de las obras que promuevan se incluyan condiciones tendentes a facilitar el empleo de materiales reciclados procedentes de tratamiento de RCD en sustitución de materiales naturales, siempre que cumplan las especificaciones técnicas de la aplicación a que se destinen. En particular, la Administración General del Estado propondrá modificaciones del Pliego General de Prescripciones Técni-*



Fig. 3 Plásticos diversos separados de RCD/  
Fig. 3. Diverse plastics separated from CDD.

asphalt mixes whenever this is technically and economically viable.

In 2007 and in order to assist road technicians and the corresponding authorities in the use of these materials, to define the technical conditions permitting its employment and to supplement that stipulated in the PG-3, the Ministry for the Environment, the Ministry of Transport and the CEDEX jointly published the “Manual for the employment of waste tyres rubber in asphalt mixes” to aid the wide-scale use of these materials”.

*In this way the authors of the National Integrated Waste Plan apparently indicate their satisfaction with the results obtained over recent years and subsequently consider it unnecessary to provide further guidelines for forthcoming years.*

*However, with regards to CDD, the references made in the PNIR appear to be aimed not so much to the present as to the near future, when indicating:*

*“The departments of the National Administration and all other public administrations shall include conditions in the technical specification of works that promote the employment of recycled materials proceeding from the treatment of CDD in replacement of natural materials, on the condition that these comply with the technical specifications concerning the application of the*



*cas para Obras de Carretera (PG-3) y la Instrucción sobre Hormigón Estructural (EHE) con vistas a incorporar requisitos técnicos sobre el empleo de áridos reciclados en las obras.*

*Los departamentos de la Administración General del Estado y las demás administraciones públicas fomentarán que en los proyectos de obra se tengan en cuenta las alternativas de diseño y constructivas que generen menos residuos en la fase de construcción y de explotación, así como aquellas que favorezcan el desmantelamiento ambientalmente correcto del bien inmueble al final de su vida útil.*

*Los órganos de contratación de la Administración General del Estado y sus organismos públicos, al determinar los criterios que hayan de servir de base para la valoración de la oferta más ventajosa, procurarán tomar en consideración las medidas sobre prevención y reciclado de RCD, así como la utilización en las unidades de obra de áridos y otros productos procedentes de valorización de residuos, siempre que cumplan las especificaciones técnicas de la aplicación a que se destinen”.*

Como se puede observar el PNIR subraya dos puntos clave para promover el aprovechamiento de los RCD y, en particular, el empleo de los áridos reciclados: la modificación de las especificaciones y de la normativa técnica, y sobre todo la consideración expresa en los procesos de licitación de las obras de un eventual aprovechamiento de estos residuos por parte de los licitadores. En definitiva, parece bastante claro que el sector viario, tanto administraciones como empresas, deberá focalizar sus esfuerzos hacia los RCD.

Sorprendentemente, el PNIR no hace ninguna referencia más al posible aprovechamiento en la construcción de carreteras en general o de firmes en particular de ningún otro residuo, y ello a pesar de que, como se ha indicado más arriba, en el pasado ya se han utilizado en la técnica viaria residuos urbanos de origen domiciliario, residuos peligrosos como los aceites industriales usados, lodos de depuradoras, plásticos de uso agrario, residuos de industrias extractivas y residuos industriales no peligrosos. Es cierto que con los actuales criterios de gestión de los residuos no tiene ningún sentido plantear la utilización en carreteras de algunos de ellos (residuos peligrosos, lodos de depuradoras), pero en cambio es innegable que otros (residuos de industrias extractivas y residuos industriales no peligrosos)

same. The National Administration shall propose modifications to the General Technical Specifications for Road Works (PG-3) and the Structural Concrete Code (EHE) in order to incorporate technical requirements regarding the employment of recycled aggregates in the works. The departments of the National Administration and all other public administrations shall promote the introduction of work projects that consider design and construction alternatives that generate less waste during construction and operation, and those that favour an environmentally correct demolition of the property at the end of its working life.

National Administration departments and all other public administrations overseeing tender procedures shall, when establishing criteria serving as the basis of appraisal of the most advantageous tender proposal, ensure that particular consideration be given to prevention measures and the recycling of CDD, together with use in construction of aggregates and other products recovered from waste materials, on the condition that these meet the technical specifications concerning the application in question”.

*The National Integrated Waste Plan subsequently underlines two key points to promote the use of CDD and the use of recycled aggregates in particular: the modification of specifications and technical standards; and, express consideration during the tendering of works to the ensuing use of this waste by tenderers. It then seems fairly clear that the road sector, both public and private, should focus their efforts on the use of CDD.*

*Surprisingly, the Plan makes no further reference to the possible use of any other waste material in the construction of roads in general and pavements in particular, in spite of the fact, and as indicated above, that household waste, hazardous waste such as used industrial oils, sewage sludge, agricultural plastics, mining waste and non-hazardous industrial waste have all been used in road construction in the past. While it is the case that under current waste management criteria it would make no sense to consider the employment of some of these waste materials in roads (such as hazardous materials and sewage sludge), other waste materials (such as*



pueden tener una aplicación en carreteras tanto o más interesante que la que tienen los NFU, tanto desde el punto de vista ambiental como, sobre todo, desde el punto de vista de la técnica viaria. Ciertamente, no se puede afirmar que el PNIR excluya un posible aprovechamiento de los residuos industriales en la construcción de carreteras (lo que el sector viario debe en todo caso explorar de manera permanente), pero revela una cortedad de miras muy llamativa después del éxito que, al menos dentro de la política ambiental, ha supuesto el empleo de NFU en la fabricación de mezclas bituminosas. ♦

*mining waste and non-hazardous industrial waste) may undoubtedly have an application in roads of similar or even greater interest to that of waste tyres, from an environmental perspective and, particularly, in terms of road technique. While the Plan cannot be said to exclude the possible use of industrial waste in road construction (this being an aspect which the road sector should be permanently exploring), it shows a very noticeable lack of foresight in spite of the very successful incorporation of waste tyres in the production of asphalt mixes, at the very least in terms of environmental policy. ♦*

#### Referencias/References:

- Aman, L.: *Life Cycle Assessment (LCA) of utilisation of used tyres*. IVL Svenska Miljöinstitutet, Estocolmo, 2004.
- Azni, I., Katayon, S., Ratnasamy, M.: *Stabilization and utilization of hospital waste as road and asphalt aggregate*. J Mater Cycles Waste Manag., 7:33-37, 2005.
- CEDEX: *Manual de empleo de NFU en mezclas bituminosas*. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), Madrid, 2007.
- Cortes Generales: *Ley 10/1998, de 21 de abril, de Residuos*. Boletín Oficial del Estado nº 96 (22 de abril de 1998), pág. 13372-13384, Madrid, 1998.
- Decker, D.S.: *Evaluating the Use of Waste Materials in Hot Mix Asphalt*. Special Report 165, National Asphalt Pavement Association, Lanham (Maryland), 1993.
- Del Val, M.A.: *Incorporación de productos plásticos a los materiales de construcción de firmes: conocimientos actuales sobre el tema (1ª parte)*. Boletín de Información del Laboratorio de Carreteras y Geotecnia, nº 163, pág. 37-52, Madrid, 1984.
- Del Val, M.A.: *Incorporación de productos plásticos a los materiales de construcción de firmes: conocimientos actuales sobre el tema (2ª parte)*. Boletín de Información del Laboratorio de Carreteras y Geotecnia, nº 164, pág. 23-30, Madrid, 1984.
- Del Val, M.A.: *Estudio de laboratorio para la caracterización como material de firmes de carreteras de los plásticos procedentes del tratamiento de residuos sólidos urbanos*. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 1985.
- Del Val, M.A.: *El empleo de desechos y subproductos industriales como agentes estabilizantes de materiales granulares en carreteras*. El Monitor, nº 1532, pág. 46-49, Madrid, 1985.
- Del Val, M.A.: *Mezclas bituminosas resistentes a las deformaciones plásticas mediante sustitución parcial del betún por un desecho plástico urbano*. III Congreso Iberoamericano del Asfalto, Cartagena (Colombia), 1985.
- Del Val, M.A.: *Aprovechamiento de residuos plásticos urbanos en la construcción de firmes*. Comité Nacional Español de la AIPCR, Madrid, 1986.
- Del Val, M.A.: *Enrobés drainants avec des déchets plastiques. Étude de laboratoire*. 4º Euro-bitume Symposium, Madrid, 1989.
- Del Val, M.A.: *Contribution à la mise au point d'un nouveau matériau de construction des chaussées: l'enrobé bitumineux à haut module pour couches de base*. Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées, nº 204, nº 43-52, París, 1996.
- Del Val, M.A.: *Consideraciones ambientales sobre las mezclas asfálticas*. I Jornadas Nacionales de ASEFMA, Madrid, 2005.
- Del Val, M.A.: *Consideraciones ambientales sobre las mezclas asfálticas*. Rutas, nº 112, pág. 8-14, Madrid, 2006.
- Del Val, M.A., Gallego, J.: *Efecto del empleo del caucho de neumáticos usados por vía seca en las características de las mezclas bituminosas en caliente*. I Congreso Andaluz de Carreteras, Granada, 1998.
- Del Val, M.A., Potti, J.J.: *Mezclas bituminosas especiales fabricadas con fibras acrílicas*. VI Congreso Iberoamericano del Asfalto, Santiago (Chile), 1991.
- Departamento de Ordenación del Territorio y Medio Ambiente del Gobierno Vasco: *Monoografía sobre residuos de construcción y demolición*. Sociedad Pública de Gestión Ambiental (IHOBE), Bilbao, 2004.
- Direction des Routes: *Les déchets et la route*. Document de travail, Direction des Routes (République Française), París, 2003.
- EAPA: *Industry Statement on the recycling of asphalt mixes and use of waste of asphalt pavements*. European Asphalt Pavement Association (EAPA), Bruselas, 2005.
- Elvira, J.L., Del Val, M.A.: *Los residuos sólidos y su aplicación en la construcción de carreteras*. Carreteras, nº 2, pág. 8-17, Madrid, 1982.
- Elvira, J.L., Del Val, M.A.: *Nota sobre una tecnología española para el aprovechamiento de desechos plásticos de origen urbano como materiales de firmes de carreteras*. Carreteras, nº 13, pág. 76-80, Madrid, 1984.
- Gallego, J.: *Mezclas bituminosas modificadas por adición de neumáticos. Estudio de la influencia de las características del caucho y del proceso de fabricación y puesta en obra de la mezcla*. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 1999.
- Gallego, J.: *Mezclas bituminosas modificadas por adición de polvo de neumáticos*. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, Madrid, 2001.
- 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*. Carreteras, nº 98, pág. 43-48, Madrid, 1998.
- Gallego, J., Del Val, M.A., Tomás, R.: *Digestión del caucho de neumáticos incorporado por*

- vía seca a las mezclas asfálticas. X Congreso Iberoamericano del Asfalto, Sevilla, 1999.
- Gallego, J., Del Val, M.A., Tomás, R.: *Digestión del caucho de neumáticos incorporado por vía seca a las mezclas asfálticas*. Carreteras, nº 110, pág. 29-34, Madrid, 2000.
- Gallego, J., Del Val, M.A., Tomás, R.: *A Spanish Experience with Asphalt Pavements Modified with Tire Rubber*. Asphalt Rubber 2000 Conference, Vilamoura (Portugal), 2000.
- Gallego, J., Del Val, M.A., Tomás, R.: *Influence of Tire Rubber Crumb Digestion on the Behavior of Asphalt Mixes by the Dry Process*. Congreso Europeo del Asfalto (Euroasphalt & Eurobitume), Barcelona, 2000.
- Gallego, J., Tomás, R., Del Val, M.A.: *Neumáticos usados: un residuo útil en la pavimentación de carreteras*. Ingeoprés, nº 45, pág. 20-25, Madrid, 1996.
- Gallego, J., Tomás, R., Del Val, M.A.: *Aprovechamiento de neumáticos usados en la fabricación de mezclas asfálticas*. I Congreso Hispano-Portugués y IV Simposio Español sobre Carreteras y Medio Ambiente, Torremolinos, 1998.
- Gallego, J., Tomás, R., Del Val, M.A.: *Pavimentos asfálticos con neumáticos de desecho. La opción más ecológica para un residuo en aumento*. Residuos, vol. 9-46, pág. 62-68, Bilbao, 1999.
- Gallego, J., Tomás, R., Del Val, M.A.: *Caracterización mediante ensayos convencionales y dinámicos de mezclas asfálticas fabricadas con betún modificado con caucho de neumáticos*. Carreteras, nº 100, pág. 21-26, Madrid, 1999.
- Hix, C., Mills, K., King, K., Scieffelin, J.: *Pollution Prevention Opportunities Checklist for Hot Mix Asphalt Plants*. Asphalt Project Mid-term Industry Report, Colorado Department of Public Health and Environment, Pinellas County (Colorado), 2002.
- Kandhal, P.S.: *Waste Materials in Hot Mix Asphalt - An Overview*. NCAT Report No. 92-6, National Center for Asphalt Technology, 1992.
- Ministerio de la Presidencia: *Real Decreto 1619/2005, de 30 de diciembre, sobre la gestión de neumáticos fuera de uso*. Boletín Oficial del Estado nº 2 (3 de enero de 2006), pág. 352-357, Madrid, 2006.
- Ministerio de la Presidencia: *Real Decreto 105/2008, de 1 de febrero, por el que se regula la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición*. Boletín Oficial del Estado nº 38 (13 de febrero de 2008), pág. 7724-7730, Madrid, 2008.
- Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea: *Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 19 de noviembre de 2008 sobre los residuos y por la que se derogan determinadas Directivas*. Diario Oficial de la Unión Europea 22.11.288, L 312/3 a L 312/30, Bruselas, 2008.
- Pérez, I., Gallego, J., Toledano, M., Talbo, J., Garrido, S.F.: *Caracterización del comportamiento a fatiga de mezclas bituminosas en caliente fabricadas con áridos reciclados*. Anales de la Mecánica de Fractura, Vol. 1 (2007), pág. 157-162, Madrid, 2007.
- Pérez, I., Toledano, M., Gallego, J., Talbo, J.: *Mechanical properties of hot mix asphalt made with recycled aggregates from reclaimed construction and demolition debris*. Materiales de Construcción, Vol. 57, 285, pág. 17-29, Madrid, 2007.
- Román, E.: *Gestión de residuos de obra y restos de construcción*. Jornadas sobre residuos de construcción y demolición, Diputación de Cádiz, El Puerto de Santa María, 2006.
- Román, E.: *Recuperación de los RCD's en la obra civil*. Jornadas sobre residuos de construcción y demolición, Diputación de Cádiz, El Puerto de Santa María, 2006.
- Romero, E.: *Residuos de construcción y demolición*. Máster de Ingeniería Ambiental 2006-2007, Universidad de Huelva, Huelva, 2006.
- Secretaría de Estado de Cambio Climático: *Resolución de 20 de enero de 2009 por la que se publica el Acuerdo del Consejo de Ministros por el que se aprueba el Plan Nacional Integrado de Residuos para el período 2008-2015*. Boletín Oficial del Estado nº 49 (26 de febrero de 2009), pág. 19893-20016, Madrid, 2009.
- Secretaría General de Medio Ambiente: *Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición (PNRCD) 2001-2006*. Boletín Oficial del Estado nº 166 (12 de julio de 2001), pág. 25305-25313, Madrid, 2001.
- SETRA: *Enrobés bitumineux renforcés par addition de déchets plastiques*. Note d'information nº 28, Collection Chaussées, Service d'Études des Routes et des Autoroutes (SETRA), París, 2004.
- Tertre, J.I.: *Aplicaciones de áridos reciclados*. Jornadas sobre residuos de construcción y demolición, Diputación de Cádiz, El Puerto de Santa María, 2006.
- Valero, L., Díez, J.J., Olivares, J., Rubio, B.: *Estudio de la dosificación, fabricación y características de las mezclas betún-azufre*, Laboratorio de Carreteras y Geotecnia "José Luis Escario", Madrid, 1976-1978.