

# Reciclado de materiales bituminosos: conclusiones del proyecto DIRECT-MAT (Técnicas de demolición y reciclado de materiales para la carretera)

El principal objetivo del proyecto DIRECT-MAT (Dismantling and RECYcling Techniques for road MATerials) ha sido facilitar que las experiencias nacionales en el campo de la demolición y el reciclado de materiales relacionados con la carretera puedan ser compartidas y divulgadas entre países europeos, para beneficio de todos ellos. Incluido en el 7º Programa Marco de la Unión Europea y desarrollado entre los años 2009 y 2011, el proyecto ha contado con la participación de 20 centros de investigación de 15 países europeos. Los procesos de demolición y reciclado de materiales de la carretera han sido objeto de estudio de numerosos trabajos de investigación nacionales en los últimos años. Sin embargo, los resultados de los mismos raramente han beneficiado al resto de países europeos. El principal logro del proyecto ha consistido en la elaboración de una base de datos donde se ha volcado toda la información recopilada durante el desarrollo de los trabajos, y que actualmente es de acceso público. La base supone una valiosa herramienta de consulta para todos los agentes interesados en la amplia variedad de técnicas de reciclado que se llevan a cabo en la actualidad a nivel europeo. El presente artículo pretende dar a conocer los trabajos desarrollados por el grupo de materiales bituminosos, constituido en el marco de las investigaciones del proyecto DIRECT-MAT.

**Palabras clave:** Reciclado, materiales para la carretera, base de datos, guías de buenas prácticas, materiales bituminosos

The main objective of the DIRECT-MAT (Dismantling and RECYcling Techniques for road MATerials) project has been to facilitate the dissemination at an European scale of national field experience regarding the dismantling and recycling of road related materials, for the benefit of all European countries. Included within the 7th Framework Programme of the EU, this was a three year project developed between 2009 and 2011, and was comprised of 20 partners from 15 participating countries. The processes of demolition and road material recycling have previously been studied in national research projects in the last years; nevertheless, the results of those projects almost never benefit other European countries. The most important result of the project has been the development of a Web database where all the information gathered during the project has been uploaded. Nowadays, it has public access. The database is a very useful research tool for stakeholders interested in the wide variety of recycling techniques that are being carried out in Europe. This article describes the works developed by the bituminous materials working group, one of the seven groups set up in the framework of the DIRECT-MAT project researches.

**Keywords:** Recycling, Road materials, Database, Best Practices Guides, Bituminous materials

Ana Isabel González Abadías, [agonzalez@cedex.es](mailto:agonzalez@cedex.es)  
Baltasar Rubio Guzmán, [brubio@cedex.es](mailto:brubio@cedex.es)

Centro de Estudios del Transporte del CEDEX

# Reciclado de materiales bituminosos: Conclusiones del proyecto DIRECT-MAT (Técnicas de demolición y reciclado de materiales para la carretera)

## 1. Introducción

En los últimos años, muchos países europeos han acumulado numerosas experiencias sobre técnicas de reciclado de los residuos de materiales de la carretera en la propia carretera. Sin embargo, se ha comprobado que las prácticas nacionales difieren considerablemente de unos países a otros. Además, los documentos y bases de datos disponibles no suelen estar traducidos a un idioma común. Como consecuencia, los logros y experiencias de los diferentes países no se comparan, por lo que el resto de los países no puede beneficiarse de ellos.

El proyecto DIRECT-MAT (DIsmantling and RECYcling Techniques for road MATerials) nació con el objetivo de crear instrumentos para que las experiencias nacionales en el campo de la demolición y el reciclado de materiales relacionados con la carretera puedan ser compartidas y divulgadas entre países europeos. El proyecto, incluido en el 7º Programa Marco de la Unión Europea, comenzó en enero de 2009 y finalizó en diciembre de 2011. En él participaron 20 centros de investigación de 15 países diferentes.

Para alcanzar los objetivos del proyecto, se ha elaborado una base de datos que recopila las investigaciones validadas

existentes, así como experiencias prácticas en obra. Además, contiene una colección de Guías de Buenas Prácticas (en adelante GBP) para la demolición y reciclado de diferentes tipos de materiales, elaboradas tomando como referencia las distintas experiencias de los países participantes.

Las tareas se dividieron entre un total de siete grupos de trabajo. Los trabajos comenzaron con la revisión de la documentación nacional existente, para continuar con el análisis de datos tomados de casos prácticos, con el objetivo de generar informes sobre las técnicas de demolición, reutilización y reciclado. Por último, se redactaron las GBP en base a los resultados y conclusiones extraídas de todos los trabajos anteriores.

El presente artículo se centrará en la descripción de los trabajos llevados a cabo por el Grupo de Trabajo 4, encargado del estudio de los materiales bituminosos. Más concretamente, se presentará un resumen de la información aportada por la recopilación de experiencias prácticas y las GBP. El CEDEX, a través del Centro de Estudios del Transporte, ha participado en el grupo de materiales bituminosos. En la Tabla 1 se relaciona el resto de los componentes, la mayor parte de ellos pertenecientes al Foro Europeo de Laboratorios de Investigación de Carreteras, FEHRL (Forum of European National Highway Research Laboratories).

Tabla 1: Participantes Grupo de trabajo 4 (Materiales bituminosos) del proyecto europeo DIRECT-MAT.

Nº	Nombre de la organización	País
1 (*)	Braunschweig Institute of Technology (TUBS/ISBS)	Alemania
2	Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC)	Francia
3	Belgian Road Research Centre (BRRC)	Bélgica
4	Swedish Geotechnical Institute (SGI)	Suecia
5	Danish Road Institute (DRI)	Dinamarca
6	Laboratorio Nacional de Engenharia Civil (LNEC)	Portugal
7	Institute for Transport Sciences (KTI)	Hungría
8	University College Dublin (UCD)	Irlanda
9	Swedish National Road and Transport Research (VTI)	Suecia
10	Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX)	España
11	Slovenian National Building and Civil Engineering Institute (ZAG)	Eslovenia
12	The Highway Institute (IP)	Serbia
13	Road and Bridge Research Institute (IBDiM)	Polonia

(\*): Coordinador

## 2. Recopilación de casos de estudio

Tras la revisión bibliográfica llevada a cabo en las primeras etapas del proyecto, los componentes del grupo de trabajo presentaron casos de estudio que reflejaban las experiencias relacionadas con las técnicas de reciclado. Más concretamente, se solicitó que, para cada caso, se aportaran datos relacionados con la obra, la caracterización de los materiales, tanto in situ como en el laboratorio, y el comportamiento a corto y medio plazo del pavimento resultante.

En la Tabla 2 figura el número de casos prácticos aportados por cada país participante en el grupo de materiales bituminosos.

Se puede apreciar que las técnicas de reciclado de materiales bituminosos que se han registrado en un mayor número de casos han sido las de reciclado in situ en frío y mezcla caliente en planta. Esto no significa necesariamente que sean las técnicas más comunes, sino que se han documentado mayoritariamente.

Durante el análisis de los casos de estudio registrados se detectó cierta tendencia a informar solamente de las experiencias positivas. Así pues, es posible que la recopilación llevada a cabo no represente la experiencia global europea; de hecho, se circunscribe a un número limitado de países. Sin embargo, su estudio puede ser útil para detectar cuáles son los problemas más frecuentes a la hora de aplicar las diferentes técnicas de reciclado.

Las conclusiones deducidas del análisis de los 41 casos de estudio presentados fueron las siguientes, dependiendo del tipo de técnica que se trate:

- **Técnicas de demolición:** El fresado es la técnica más extendida para la demolición de firmes flexibles. Existe el consenso general de que el fresado selectivo capa a capa es la mejor práctica para conseguir una mejor homogeneidad del material recuperado. Sin embargo, no se aplica en todos los casos, dado que implica mayores costes y tiempos de operación.
- **Caracterización del material recuperado de mezclas bituminosas:** Una óptima caracterización del material recuperado reduce la necesidad de mezclarlo con material virgen y, por tanto, posibilita porcentajes de reciclado mayores. En la Figura 1 se muestra una fotografía de una instalación de clasificación de material bituminoso recuperado. La caracterización de los materiales del firme previa a la demolición es especialmente importante en las técnicas de reciclado in situ, donde el material demolido no se suele mezclar con otros materiales. Para el caso del reciclado en planta, se trata de mezcla bituminosa recuperada normalmente de diferentes orígenes, por lo que la caracterización previa tiene menor relevancia.
- **Reciclado en caliente en planta.** Este tipo de técnica ha sido aplicada con éxito en vías con alta intensidad de tráfico pesado. Ninguno de los casos de estudio ha abor-

Tabla 2. Casos de estudio presentados por cada país.

		Países												
		Alemania	Bélgica	Dinamarca	Eslovenia	España	Francia	Hungría	Irlanda	Polonia	Portugal	Serbia	Suecia	Total
Demolición		1							1					2
Técnica	Mezcla caliente en planta (Hot in plant mix)	1				2	3	2		1	2		3	14
	Mezcla semicaliente en planta (Warm in plant mix)													0
	Mezcla fría en planta (Cold in plant mix)			1						1		1	2	5
	Reciclado in situ en caliente (Hot in place)				1			2				1		4
	Reciclado in situ en frío (Cold in place)	2			4	2	1			1	2		4	16
<b>Total</b>		<b>4</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>5</b>	<b>4</b>	<b>4</b>	<b>4</b>	<b>0</b>	<b>4</b>	<b>4</b>	<b>2</b>	<b>9</b>	<b>41</b>

## Reciclado de materiales bituminosos: Conclusiones del proyecto DIRECT-MAT (Técnicas de demolición y reciclado de materiales para la carretera)



Figura 1: Clasificación y almacenamiento de material bituminoso recuperado.

dado los problemas de reciclado de material bituminoso que contenga betunes modificados con polímeros o con caucho.

- **Reciclado en frío en planta.** Los cinco casos de estudio recopilados han demostrado un buen comportamiento a largo plazo de los firmes. En contraposición con la técnica equivalente in situ, la composición de la mezcla se controla más fácilmente en planta.
- **Reciclado in situ en caliente.** Esta técnica exige una meticulosa caracterización previa del firme. Su utilización no es muy frecuente.
- **Reciclado in situ en frío.** La aplicación generalizada de una capa de rodadura encima de la mezcla reciclada indica la falta de confianza en la capacidad de los materiales reciclados en frío para soportar directamente la circulación del tráfico. Si bien el tipo de maquinaria utilizada en la mayoría de los casos de estudio es la misma, los procedimientos de ensayo utilizados para caracterizar y optimizar las características de los materiales varían considerablemente de unos países a otros.

### 3. Guía de buenas prácticas

En la GBP "Best Practice guide for the dismantling of asphalt roads and use of recycled materials in asphalt layers" (Guía de Buenas Prácticas para la demolición de carreteras asfálticas y uso de materiales reciclados en capas asfálticas), de consulta pública a través de la base de datos, se ha tratado de resumir, de forma práctica, toda la información obtenida en las etapas previas del proyecto DIRECT-MAT. Cuando existe

un consenso internacional sobre un determinado procedimiento de reciclado, éste se puede catalogar como "Buena Práctica". En otras ocasiones, las técnicas varían considerablemente entre países, por lo que la GBP presenta un resumen de los posibles enfoques.

El documento se estructura en los siguientes capítulos: Introducción, caracterización previa de los firmes, demolición, reciclado en planta de materiales granulares y materiales tratados con conglomerantes hidráulicos, reciclado en planta de material bituminoso recuperado (en adelante RAP, haciendo referencia al acrónimo en inglés-reclaimed asphalt pavement), Reciclado in situ de RAP y líneas de investigación recomendadas.

El diagrama de flujo de la Figura 2 representa las distintas técnicas de demolición y reciclado de material recuperado de mezclas bituminosas:

En los siguientes apartados se resumen las principales conclusiones alcanzadas.

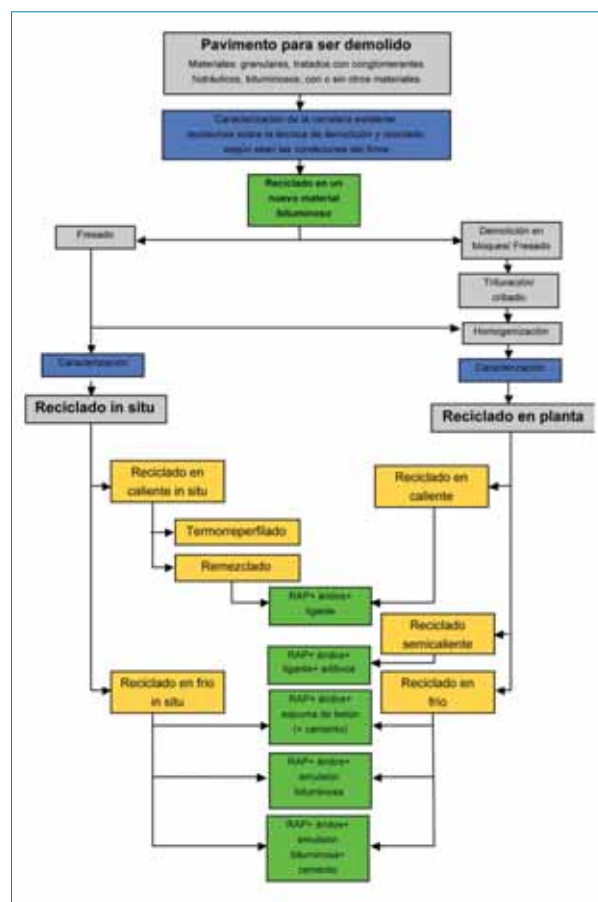


Figura 2: Diagrama de flujo de las técnicas de demolición de firmes flexibles, así como del reciclado de material bituminoso recuperado.

Tabla 3. Opciones de reciclado recomendadas para firmes con pavimento bituminoso.

Condiciones del pavimento (inspección visual)	Técnica de reutilización/reciclado									
	Rehabilitación de la capa de rodadura		Rehabilitación de capas bituminosas				Rehabilitación de capas bituminosas y capas tratadas con conglomerantes hidráulicos/capas granulares			
			In situ		En planta		In situ		En planta	
	Caliente en planta	Caliente in situ	Caliente	Frío	Caliente	Frío	Caliente	Frío	Caliente	Frío
Irregularidad (roderas)	x	x <sup>2)</sup>	o <sup>4)</sup>	o <sup>4)</sup>	o <sup>4)</sup>	o <sup>4)</sup>	-	-	-	-
Irregularidad (por falta de capacidad estructural)	-	-	x	x	x	x	x	x	x	x
Resistencia al deslizamiento	x	x <sup>3)</sup>	-	-	-	-	-	-	-	-
Piel de cocodrilo	-	-	x	x	x	x	x	x	x	x
Desprendimientos	x	x	-	-	-	-	-	-	-	-
Baches	-	-	-	-	x	x	-	-	x	x
Grietas longitudinales	o <sup>1)</sup>	o <sup>1)</sup>	x	x	x	x	x	x	x	x
Grietas transversales	o <sup>1)</sup>	o <sup>1)</sup>	x	x	x	x	x	x	x	x

x viable, o viable con aclaraciones, - no viable / no económico

<sup>1)</sup> si las grietas tienen su origen en la superficie del pavimento.

<sup>2)</sup> Termorreperfilado si el deterioro tiene su origen en una baja compactación, remezclado o termorregeneración si su origen es falta de estabilidad.

<sup>3)</sup> Termorregeneración.

<sup>4)</sup> Si el origen de las roderas es la capa intermedia.

### 3.1 Caracterización del firme bituminoso que se va a demoler

Las razones por las que un firme debe ser demolido o rehabilitado pueden ser un excelente indicador de las condiciones en las que se va a encontrar el material recuperado, y de las mejores opciones para el reciclado. La Tabla 3 refleja, dependiendo de las condiciones actuales del firme, las técnicas de reciclado más adecuadas para cada caso.

### 3.2 Demolición

Para la demolición de los materiales bituminosos, los métodos existentes son el fresado y la demolición en bloques. El

primero permite una demolición más selectiva, así como la obtención de un material más homogéneo y de mejor calidad. Las principales ventajas del fresado son:

- La profundidad de fresado es variable, dependiendo de los equipos disponibles.
- Se obtiene como resultado un material con una granulometría que permite su uso directo en nuevas mezclas, sin operaciones adicionales como trituración o cribado. Esta es una condición necesaria en las técnicas in situ.
- La técnica de fresado capa a capa permite la recuperación de material procedente de un solo origen, caracterizado por una gran homogeneidad, permitiendo su uso en mezclas con altos porcentajes de reciclado.

## Reciclado de materiales bituminosos: Conclusiones del proyecto DIRECT-MAT (Técnicas de demolición y reciclado de materiales para la carretera)

Tabla 4: Límite de las variaciones de las características del RAP.

País	Granulometría [%]			Contenido de ligante [%]	Penetración [1/10 mm]	Punto de reblandecimiento TR&B [°C]
	<0,063 mm	>0,063; <2 mm	> 2 mm			
Austria	x	x	x	x	-	x
Bélgica <sup>1)</sup>	±3		±10	±1	±10	±10
Dinamarca	Sin especificar					
Francia	±2-3	±7,5-10		±0,5 - 1	±7,5	±4
Alemania	x	x	x	x	-	x
Hungría	Sin especificar para porcentajes de reciclado bajos					
Irlanda	Sin especificar					
Polonia	x	x	x	x	-	x
Portugal	±1,5	±3	±5	±0,4	±4	-
Serbia	Sin especificar					
Eslovenia	Sin especificar					
España	±1,5	±3	±5	±0,4	±4	-
Suecia	x	x	x	x	x	x
Reino Unido	Sin especificar					

x La medición de la variación de las características del RAP se tiene en cuenta para conseguir la homogeneidad de la mezcla asfáltica (directriz técnica – valor umbral sin especificar)

<sup>1)</sup> Si no se cumplen las tolerancias, el contenido de RAP permitido se reduce a la mitad del valor.

- El fresado selectivo facilita la separación de sustancias peligrosas que puedan estar contenidas en el firme, como alquitrán o amianto.

La demolición en bloques es una técnica que se adapta mejor a pequeñas obras o a tramos de firme que van a ser demolidos en su totalidad.

### 3.3 Reciclado en planta de material bituminoso recuperado (RAP)

#### 3.3.1 Caracterización / control de calidad

El reciclado en planta de material bituminoso recuperado (RAP) requiere de un buen control de calidad. Dependiendo del tipo de técnica que se vaya a aplicar (caliente, semicaliente o frío), se evaluarán unos determinados parámetros durante el diseño de la mezcla.

Para que las MBC (mezclas bituminosas en caliente) que contienen RAP satisfagan los mismos requisitos exigidos a las

MBC convencionales, se deben cumplir requerimientos adicionales para ajustar la granulometría o asegurar la homogeneidad. Muchos países han introducido exigencias en cuanto a esta última, relacionados con la granulometría, el contenido de betún y los ensayos de penetración y punto de reblandecimiento del betún recuperado, tal y como se puede apreciar en la Tabla 4.

#### 3.3.2 Manejo del material recuperado en la planta

El material recuperado se debe tratar en la planta, con objeto de mejorar sus características y así conseguir mayores porcentajes de reciclado. Pueden distinguirse tres fases: trituración, clasificación y cribado, y acopio y homogeneización.

Durante la **trituración**, se procesan materiales de firme procedentes de las distintas operaciones de demolición, con el objetivo de conseguir tamaños más reducidos.

A continuación, y con el fin de mejorar la homogeneidad de las diferentes fracciones tras el fresado y/o trituración, se aconseja realizar el proceso de **cribado** clasificando el material



Figura 3: Ejemplo de unidad móvil de trituración y cribado.

de acuerdo con los tamaños exigidos (Figura 3). Gracias a la separación del material por fracciones, el material resultante con menor tamaño máximo y con la granulometría más apropiada puede utilizarse en las mezclas bituminosas de mayor calidad.

Por último, en la fase de **acopio y homogenización** se procede al almacenamiento en acopios separados, que permiten clasificar el material de acuerdo con sus diferentes características (tamaño máximo de partícula, granulometría, tipo de betún, origen del material, etc). Estos acopios deben ser controlados regularmente para asegurar la adecuada calidad del material, de tal forma que se mantengan constantes sus propiedades y composición. Esto exige disponer de zonas de acopio. Además, dado que el contenido de agua puede reducir el porcentaje de utilización del material reciclado, es aconsejable que los acopios estén techados.

Mediante la adecuada gestión del material reciclado entrante en la planta y el establecimiento de acopios homogéneos, las características del material almacenado en cada acopio se pueden controlar fácilmente para que sus propiedades sean constantes.

Resulta imprescindible llevar a cabo las fases de trituración, clasificación y cribado, y acopio y homogeneización, cuando se trabaja con altas tasas de reciclado.

### 3.3.3 Reciclado en caliente en planta

Se trata de la técnica más común en Europa. En la mayoría de los países, estas mezclas bituminosas recicladas son técnicamente equivalentes a las convencionales, pudiéndose aplicar en todo tipo de capas y categorías de tráfico. En general, las mezclas que contienen materiales bituminosos recuperados deben cumplir los mismos requerimientos que si no los incluyeran. El contenido de material reciclado en la mezcla depende tanto del diseño como de la producción de la mezcla:

- Diseño de la mezcla: tipo de mezcla, propiedades del material reciclado (granulometría, viscosidad del betún, homogeneidad...)
- Producción de la mezcla: tipología de la planta, técnica de alimentación y contenido de agua del RAP.

Varios trabajos de investigación han constatado que la utilización de material reciclado no tiene una influencia negativa en los resultados de los ensayos de laboratorio. Sin embargo, otros establecen que el uso de este tipo de materiales puede empeorar algunas propiedades finales de la mezcla bituminosa (sensibilidad al agua, resistencia a la fisuración por fatiga y resistencia a la formación de roderas).

En relación con el diseño de la mezcla, para estimar las propiedades del ligante resultante se utilizan las ecuaciones 1 y 2, en relación con los parámetros de penetración y de la temperatura de anillo y bola (TR&B):

$$\log pen_m = \frac{b_0}{100} \times \log pen_0 + \frac{b_n}{100} \times \log pen_n + \frac{b_t}{100} \times \log pen_t$$

Ecuación 1

$$T_{R\&K,m} = \frac{b_0}{100} \times T_{R\&B,0} + \frac{b_n}{100} \times T_{R\&B,n} + \frac{b_t}{100} \times T_{R\&B,t}$$

Ecuación 2

Donde  $b_0$ ,  $b_n$  y  $b_t$  son los porcentajes de ligante nuevo envejecido y otro posible tipo en el ligante total de la mezcla ( $b_0 + b_n + b_t = 100$ ).

## Reciclado de materiales bituminosos: Conclusiones del proyecto DIRECT-MAT (Técnicas de demolición y reciclado de materiales para la carretera)

Estas ecuaciones no son válidas para los casos de ligantes envejecidos modificados con polímeros. El ligante resultante de la combinación del ligante virgen y el procedente del RAP deberían cumplir las mismas especificaciones.

La homogeneidad del material recuperado tiene una importancia determinante en el contenido máximo de material reciclado en la mezcla. En este sentido, la separación de acopios, según el origen o tipo del material, es una buena práctica, sencilla de llevar a cabo cuando se utilicen altas tasas de reciclado.

Podría decirse que la homogeneidad (expresada a su vez mediante las variaciones de las características más representativas del RAP), define el contenido máximo de RAP de una mezcla. En la Figura 4 se expresa, según las especificaciones alemanas, la forma de determinar el contenido máximo de RAP de una mezcla en función de la variación de sus propiedades.

Las marcas rojas determinan los intervalos de las propiedades medidas del RAP. El valor más alto en el eje de ordenadas de la parte izquierda del gráfico determina el porcentaje de RAP para la capa de base. Cuanto más elevado sea el intervalo de variación, menor será el porcentaje de RAP permitido.

Los límites para el porcentaje de RAP vienen condicionados fundamentalmente por el tipo de la central de fabricación de mezclas. Generalmente, se utilizan tres tipos de plantas (a, b y c en la Tabla 5), a las que se pueden añadir módulos adicionales para mejorar los porcentajes de reciclado, tal y como se describe en la Tabla 5.

Las figuras 5 y 6 representan esquemas de las plantas descritas.

Es importante tener en cuenta que, para disgregar totalmente el RAP, debe aplicarse un tiempo de mezclado mayor que para las mezclas bituminosas elaboradas exclusivamente con materiales vírgenes.

Por otro lado, durante el proceso de producción de la mezcla, la humedad debería ser lo más baja posible. De lo contrario, la capacidad de la planta asfáltica podría verse influida negativamente.

Por último, en cuanto a las tasas de reciclado, algunos estudios han informado de la utilización de porcentajes de material recuperado superiores al 70%, si bien lo más frecuente es que los porcentajes varíen entre 10% y 40%. Proporciones mayores suelen estar limitadas por el coste de

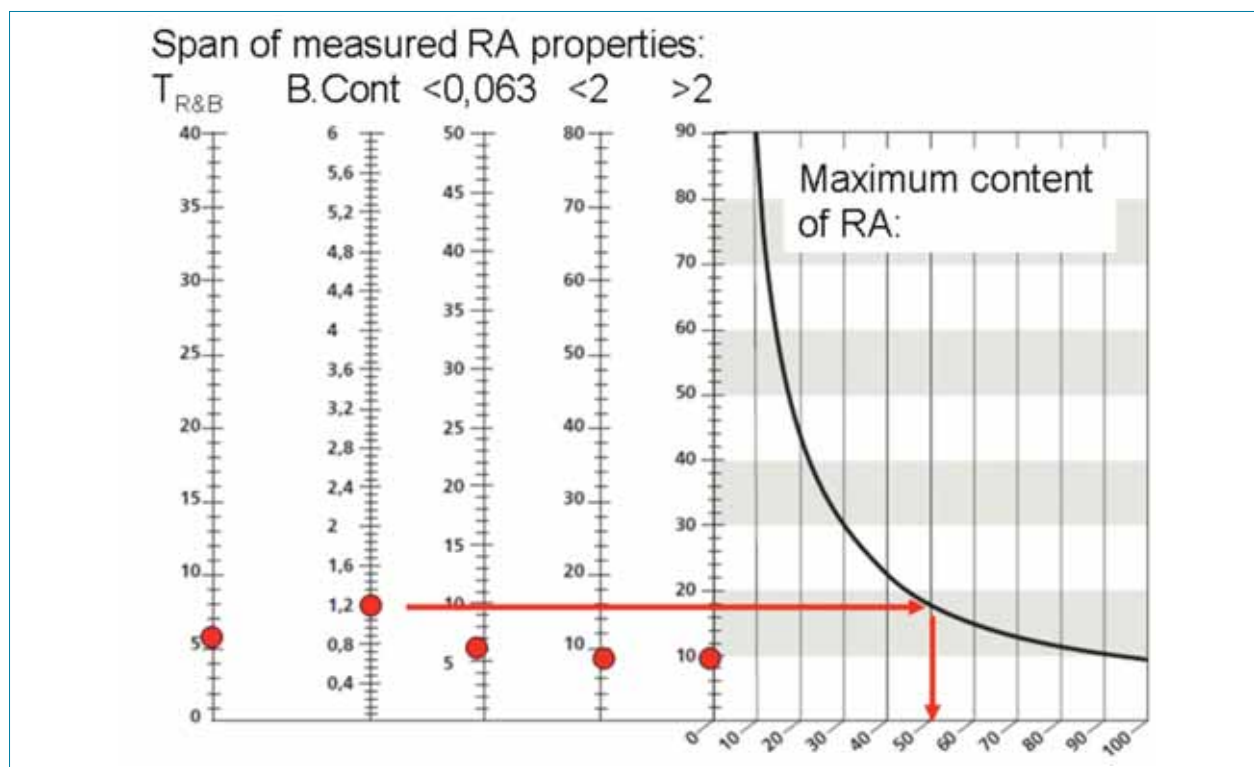


Figura 4: Contenido máximo de RAP dependiendo de la variación de sus propiedades, según las especificaciones alemanas. Fuente: Synthesis of national and international documents on existing knowledge regarding the recycling of reclaimed road materials in asphalt, DIRECT-MAT, 2010.



Tabla 5. Características y porcentajes de reciclado de los diferentes tipos de plantas.

1	Calentamiento indirecto del RAP al ponerse en contacto con los áridos en el mezclador. Se calienta durante el tiempo de mezclado.	Opción	1: Dosificación con la balanza de dosificación de áridos 2: Dosificación con una balanza extra
	Porcentaje máximo de RAP: 30%		
2	Calentamiento indirecto del RAP al ponerse en contacto con los áridos en el mezclador (incorporación continua). RA Pse añade con los áridos calientes. No es posible el tamizado en caliente de los áridos.	Opción	1: Adición al final del TS (*) 2: Adición en el elevador de cangilones 3: Adición del cribado en caliente en el bypass.
	Porcentaje máximo de RAP: 30%		
3	Calentamiento conjuntamente con los áridos. Puede provocar un envejecimiento del ligante del RAP. No es posible el tamizado en caliente de los áridos.	Opción	1: Adición en la mitad del TS 2: Adición en el secador cerca del mechero
	Porcentaje máximo de RAP: 20%		
4	Con tambores paralelos. Calentamiento separado del RAP y los áridos. El RAP se calienta en un tambor paralelo. Evita el envejecimiento del ligante.	Opción	1: Dosificación con la balanza de dosificación de los áridos. 2: Dosificación con una balanza extra
	Porcentaje máximo de RAP: 60%		
b) Planta continua de TSM (**)	El RAP se calienta en el tambor como los áridos. Puede provocar un envejecimiento del ligante del RAP.	Opción	1: RAP se incorpora al tambor como los áridos 2: RAP se incorpora por el anillo de reciclado
	Porcentaje máximo de RAP: 25%		
c) Planta continua con tambores paralelos	Calentamiento separado del RAP y los áridos. Permite un calentamiento suave que evita el envejecimiento del ligante.	Opción	1: Dosificación con la balanza de dosificación de los áridos. 2: Dosificación con una balanza extra
	Porcentaje máximo de RAP: 60%		

(\*): Tambor-Secador

(\*\*):Tambor-Secador-Mezclador

las inversiones en equipamientos adicionales de las plantas que permiten mayores porcentajes de reciclado (equipamientos con unidades independientes de calentamiento).

### 3.3.4 Reciclado en frío en planta

Si bien es cierto que es una técnica menos frecuente que el reciclado en frío "in situ", puede resultar la más apropiada en determinadas circunstancias. Dependiendo de las necesidades o condiciones técnicas, se pueden emplear en la nueva mezcla ligantes tipo emulsión bituminosa, espuma de betún o cemento. No obstante, aunque la mayor parte de las plantas de mezclado existentes en el mercado admiten cualquier tipo de ligante, la emulsión bituminosa es la más empleada en estos ca-

sos. Normalmente, las mezclas recicladas se usan en capas de base, pero también pueden ser utilizadas en capas intermedias o de rodadura en carreteras secundarias.

El procedimiento de diseño es similar al de mezclas convencionales. La posibilidad de llevar a cabo ensayos adicionales depende de las especificaciones de cada país y de las particularidades de cada obra. Normalmente, el RAP no requiere de tratamientos especiales, a no ser que contenga un índice de contaminantes mayor del permitido.

Una de las ventajas de esta técnica es la posibilidad de tener en planta un mayor control sobre la proporción de materiales vírgenes, pudiéndose elaborar así mezclas que cumplan con requisitos más exigentes. Este tipo de plantas son capaces de alcanzar niveles de producción diaria bastante ele-

## Reciclado de materiales bituminosos: Conclusiones del proyecto DIRECT-MAT (Técnicas de demolición y reciclado de materiales para la carretera)

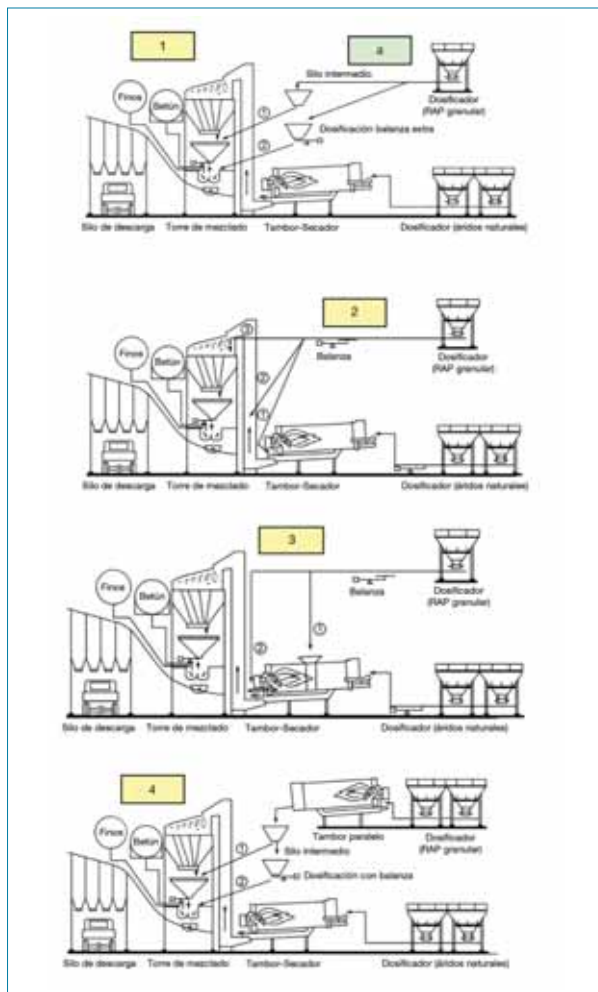


Figura 5. Plantas discontinuas. Synthesis of national and international documents on existing knowledge regarding the recycling of reclaimed road materials in asphalt, DIRECT-MAT, 2010.

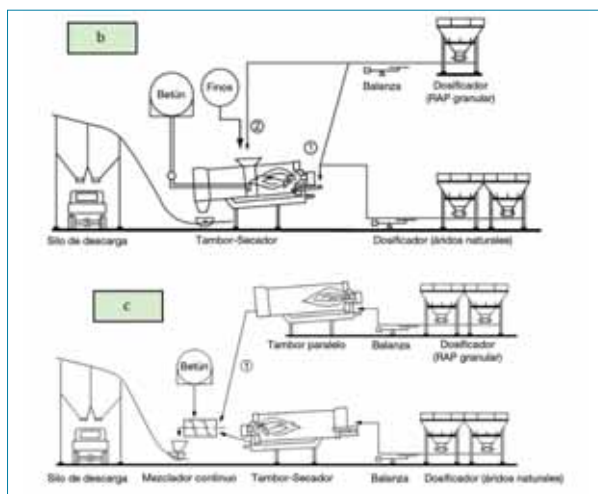


Figura 6. Plantas continuas de TSM y con tambores paralelos. Fuente: Synthesis of national and international documents on existing knowledge regarding the recycling of reclaimed road materials in asphalt, DIRECT-MAT, 2010.

vados de mezclas de alta calidad. Están compuestas, generalmente, de un mezclador continuo con ejes gemelos y palas ajustables, que normalmente son capaces de producir mezclas frías en modo continuo o discontinuo. Estas instalaciones no suelen suponer ningún tipo de limitación para el contenido de RAP, y es posible utilizar únicamente este material en la nueva mezcla. El tiempo de mezclado dependerá del tipo de ligante añadido, y la calidad del ligante reciclado.

Los tiempos de curado son una desventaja del uso de emulsión bituminosa o cemento, ya que dependen en gran parte de las condiciones de humedad y temperatura.

### 3.4 Reciclado *in situ* de material bituminoso recuperado

#### 3.4.1 Caracterización del firme

En general, las técnicas de reciclado *in situ* requieren de una inspección más exhaustiva del firme preexistente, ya que todo el material recuperado se reciclará directamente en el propio firme.

La homogeneidad de las secciones de firme se puede evaluar mediante el estudio de la documentación existente relativa al proyecto constructivo original, así como a partir de inspecciones visuales y de ensayos realizados con georradar (*Ground Penetration Radar - GPR*). Mediante la toma de testigos, se pueden estudiar la composición y propiedades de cada capa y la adherencia entre ellas.

#### 3.4.2 Reciclado *en caliente in situ*

Este tipo de reciclado comprende las siguientes técnicas:

- Termorregeneración. Consiste en el escarificado de la superficie del firme recalentado, la nivelación y compactación del material recuperado y la aplicación de una capa de rodadura.
- Remezclado. Tras el recalentado y escarificado del firme existente, éste se mezcla con nuevos áridos y/o betún, tras lo cual se vuelve a extender en una sola capa.
- Remezclado "plus". Combinación de los dos anteriores. El firme existente es recalentado, escarificado, mezclado con material nuevo y colocado de nuevo en el pavimento. Encima de esta capa reciclada se coloca una nueva capa as-

fáltica. Todo el proceso se lleva a cabo con una única máquina, que necesariamente habrá de contar con dos extendedoras.

La temperatura y espesor del pavimento calentado dependerán de la capacidad de calentamiento y la velocidad del tren de reciclado, pero también de las condiciones ambientales. Se necesitan temperaturas superiores a 80 °C en todo el espesor de fresado. Este tipo de fresado necesita menos energía mecánica y provoca una degradación de los áridos menor que el fresado en frío.

### 3.4.3 Reciclado en frío *in situ*

Las mezclas asfálticas en frío son aquellas cuyo ligante bituminoso se incorpora a la mezcla en forma de emulsión bituminosa o espuma de betún, permitiendo que la producción y puesta en obra de la mezcla se realice a temperatura ambiente. La técnica conlleva una serie de ventajas ambientales y económicas, como la reducción de costes energéticos y de emisión de contaminantes, o la reducción de tiempo y costes de transporte de materiales.

Las mezclas recicladas *in situ* con emulsión bituminosa presentan unas características muy apropiadas para ser utilizadas en capas de base, aunque sus características difieren de las MBC convencionales, ya que su módulo es más bajo que el de éstas, pero su rotura es más plástica y dúctil, permitiendo el movimiento de las fisuras existentes bajo el firme y su consiguiente absorción. Aunque se puede conseguir una buena cohesión de la mezcla utilizando la emulsión apropiada, la cohesión final depende de la densidad conseguida durante la compactación. Es decir, cuanto mayor sea ésta, mayor resulta ser el módulo de la mezcla y su cohesión; si bien no es fácil porque se trata de mezclas difíciles de compactar.

No existe un método de diseño de la mezcla comúnmente aceptado para este tipo de mezclas, y las recomendaciones y ensayos realizados varían enormemente de un país a otro. Los materiales recuperados pueden ser exclusivamente bituminosos o incluir otro tipo de materiales, como granulares. En ocasiones, se requiere la incorporación de materiales vírgenes o correctivos, como cemento o cal, para que la mezcla final cumpla los requisitos deseados.

Durante la producción de este tipo de mezclas también es normal añadir agua, para facilitar la envuelta de los áridos

por la emulsión bituminosa o la espuma de betún y, así, mejorar la trabajabilidad de la mezcla y su compactación. En general, los procedimientos de diseño de estas mezclas incluyen los siguientes pasos:

- Determinación de la granulometría del RAP y elección de la granulometría óptima para cumplir los requerimientos de calidad.
- Selección del tipo de emulsión bituminosa.
- Evaluación preliminar de la compatibilidad físico-química del material granular con la emulsión bituminosa/ espuma de betún.
- Determinación del contenido óptimo de agua para la optimización del manejo de la mezcla y la compactación de las capas.
- Determinación del contenido óptimo de betún residual.

Una vez que se determina la fórmula de la mezcla en el laboratorio, se llevarán a cabo tramos de prueba, con los siguientes objetivos:

- Ajuste de la velocidad de la máquina de reciclado, con objeto de conseguir la granulometría adecuada del material recuperado.
- Definición del procedimiento de compactación.
- Ajuste del contenido óptimo de agua, para conseguir una buena homogeneidad y compactación.
- Seguimiento del contenido de agua y evolución del curado.
- Estimación del tiempo necesario antes de la reapertura al tráfico.

La puesta en obra se lleva a cabo mediante “trenes de reciclado”, compuestos por una máquina recicladora conectada a tanques de agua y de emulsión bituminosa o espuma de betún, seguidos por el equipo de compactación. La selección y uso del equipo de reciclado y compactación tiene una gran influencia en las características finales y en la homogeneidad de la capa reciclada. A su vez, la profundidad del reciclado influye enormemente en la calidad de la mezcla. Otro elemento esencial a tener en cuenta para conseguir resultados satisfactorios es la compactación. Se necesitan equipos pesados, y se recomienda combinar rodillos metálicos con vibración (11 t o más) y neumáticos (23 t o más).

## Reciclado de materiales bituminosos: Conclusiones del proyecto DIRECT-MAT (Técnicas de demolición y reciclado de materiales para la carretera)

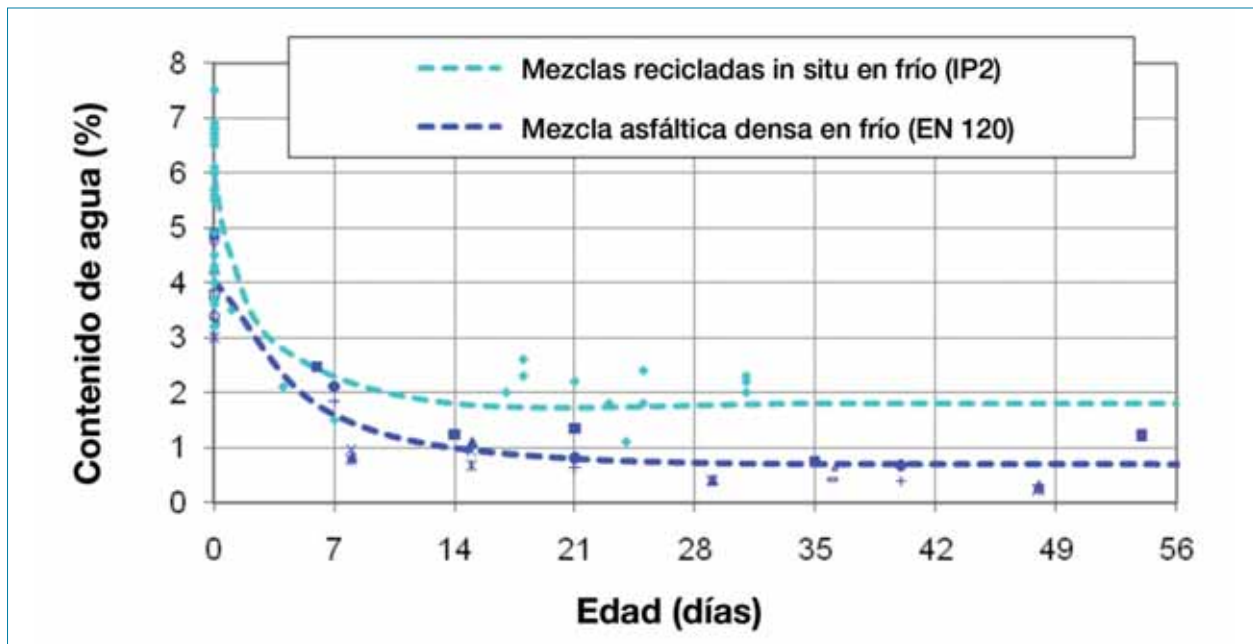


Figura 7. Evolución del contenido de agua de una mezcla en frío.

Los materiales correctivos, en caso de ser usados, se colocan en el pavimento previamente a las operaciones de reciclado. En todo momento habrá que prestar atención a las condiciones meteorológicas; las operaciones se deberían realizar con buen tiempo, con objeto de minimizar el tiempo de curado, permitiendo que la mezcla alcance sus características finales lo antes posible.

Debido a la posible variabilidad de las características de los materiales empleados, se recomienda la realización de ensayos mecánicos de control de calidad (resistencia a la compresión y tracción, sensibilidad al agua...), además de los que normalmente se llevan a cabo relacionados con la composición de la mezcla, como la granulometría, contenido de betún, densidad y contenido de huecos...

Uno de los aspectos más importantes relacionados con este tipo de técnica es el periodo de curado, ya que uno de los principales constituyentes de las mezclas es el agua, ya sea la añadida a la mezcla, como la contenida en la emulsión bituminosa. Después de la fabricación de la mezcla y la puesta en obra de la misma, la emulsión bituminosa rompe y el betún se separa del agua. En ese momento, el agua se va retirando gradualmente, primeramente mediante la compactación, y posteriormente mediante evaporación y el efecto del tráfico rodado. Al final del proceso de curado, una película continua y cohesiva de ligante mantiene los áridos uni-

dos. La Figura 7 muestra la evolución del contenido de agua durante un tiempo aproximado de dos meses tras la puesta en obra y se compara con mezclas curadas en laboratorio:

Por razones prácticas, el conocimiento de la evolución del curado es muy importante para la programación de los trabajos, ya que:

- La capa debe tener la suficiente estabilidad y resistencia cuando el tramo se reabra al tráfico, lo que implica un tiempo de curado mínimo de la superficie (normalmente 2 días).
- El contenido de agua de la mezcla debe haberse estabilizado antes de que la capa reciclada se cubra con otra nueva capa, de otra manera podría haber dificultades para que continúe la evaporación de agua (normalmente tres semanas).

Cuando la técnica es aplicada correctamente, las capas recicladas en frío in situ han demostrado un buen comportamiento después de 10 años de servicio.

### 3.5 Líneas de investigación recomendadas

#### Caracterización del firme existente

- Se podría potenciar la utilización del georradar para localizar defectos estructurales y heterogeneidades en el firme.

- El desarrollo de bases de datos con información sobre el diseño de mezclas e historiales de rehabilitación de las redes de carreteras existentes podría ayudar en la toma de decisiones en la fase de planificación respecto a las posibles estrategias de mantenimiento y rehabilitación, así como reducir los costes de la caracterización del firme existente.

#### **Técnicas de reciclado en frío**

- Dada la gran cantidad de procedimientos de diseño de la mezcla existentes, podría ser útil un esfuerzo normativo para estandarizar:
  - ensayos de compactación en laboratorio.
  - procedimientos de curado;
  - métodos de ensayo de comportamiento;
  - especificaciones de diseño de la mezcla.
- Sería útil potenciar la investigación sobre el efecto de los diferentes ligantes en el material recuperado o en la calidad del reciclado.

#### **Técnicas de reciclado en caliente**

- Se debería profundizar en el conocimiento de la interacción del betún virgen con el betún envejecido contenido en el RAP.
- Sería interesante llevar a cabo la evaluación de las necesidades de energía de los diferentes procedimientos de mezclado, con objeto de definir la huella de carbono de las diferentes tecnologías.
- Se debería establecer la comparación de las características de fatiga de las capas tradicionales y recicladas, ya que existe cierto riesgo de que la resistencia a la fatiga de las capas bituminosas con un alto porcentaje de RAP pueda ser peor que el de las capas con áridos vírgenes.
- Respecto a la ejecución de las técnicas de reciclado, se podría tratar de desarrollar metodologías efectivas para la reducción de los riesgos para la salud de los trabajadores durante el reciclado en caliente in situ.
- Sería conveniente la identificación y solución de problemas relacionados con los materiales bituminosos reciclados con betún modificado con polímeros o con caucho.

- Podría ser útil la evaluación del efecto de las marcas viales en la calidad del material recuperado y de las nuevas capas fabricadas con este material.

#### **Evaluación del comportamiento a largo plazo**

- Relacionado con la recopilación y el análisis de datos, se ha detectado que el grado de detalle es muy heterogéneo, posiblemente debido a la falta de información. La creación de una base de datos global para los tramos de ensayo realizados con técnicas de reciclado en carreteras europeas, que contenga información detallada sobre la estructura de los firmes, las propiedades de los materiales, las cargas de tráfico y las condiciones meteorológicas, entre otros, de diferentes países podría ser de gran ayuda para analizar el comportamiento a largo plazo de materiales específicos, técnicas constructivas, así como enfoques constructivos innovadores.
- Para el estudio del comportamiento a largo plazo y de las futuras necesidades de mantenimiento, se considera de gran utilidad la evaluación de la eficiencia de los costes y de los impactos ambientales, áreas que también se caracterizan por sus lagunas de conocimiento.

#### ***4. Base de datos***

La base de datos DIRECT-MAT es uno de los principales resultados del proyecto. Todos los datos recopilados en el mismo se han volcado en dicha base, que en la actualidad es de acceso público, previo registro en la web <http://www.direct-mat.eu/>. La información se estructura en tres bloques:

- Revisiones bibliográficas.
- Recopilación de datos de campo y laboratorio (casos de estudio).
- Guías de Buenas Prácticas (GBP).

La herramienta cuenta con un motor de búsqueda por conceptos y un apartado de definiciones técnicas. Además, para una consulta más cómoda de las revisiones bibliográficas y las GBP, la aplicación permite desplegar el índice de los documentos para poder acceder más rápidamente al capítulo buscado. Por otro lado, el texto cuenta con una serie de hipervínculos que permiten dirigirse a cualquier documento

## Reciclado de materiales bituminosos: Conclusiones del proyecto DIRECT-MAT (Técnicas de demolición y reciclado de materiales para la carretera)



Figura 8: Ventana de la base de datos donde se pueden localizar los diferentes casos de estudio según su localización geográfica.

que se mencione (documentos de referencia, casos de estudio...) Asimismo, las revisiones bibliográficas incluyen una serie de anexos particularizados para cada país participante en los diferentes grupos de trabajo.

En lo que se refiere a los casos de estudio, la base de datos ofrece una tabla de filtrado previa, en la que se puede seleccionar el tipo de material demolido y final. Todas las experiencias están georreferenciadas sobre el mapa de Europa para indicar su país de origen e incluyen un resumen de las mismas (Figura 8).

La herramienta será actualizada periódicamente. En el apartado "Su opinión", el usuario puede comunicar nuevos casos de estudio rellenando un sencillo cuestionario. Un comité de expertos estudiará la información, y si se considera adecuada será incorporada a la base de datos. De la misma manera, también los usuarios pueden participar si consideran que algún dato ha quedado obsoleto y debería ser actualizado.

### 5. Conclusiones

Las investigaciones llevadas a cabo en el marco del proyecto DIRECT-MAT han permitido la recopilación de las múltiples técnicas existentes en la actualidad relacionadas con el reciclado de los diferentes materiales de la carretera en la propia carretera, y en particular, con el reciclado de materiales bituminosos.

El resultado del proyecto ha sido la elaboración de una serie de guías de buenas prácticas (GBP) sobre la demoli-

ción y utilización de los materiales reciclados, entre ellas la relativa a materiales bituminosos, y la creación de una base de datos que recopila la información generada en el proyecto.

Las GBP permiten resumir la experiencia europea en el campo del reciclado, con objeto de ser una referencia útil en la materia para todos aquellos interesados en el uso de estas técnicas. En los casos en los que los procedimientos aplicados internacionalmente difieren claramente de unas regiones a otras, las guías recopilan los principales enfoques para ayudar a los técnicos en el proceso de toma de decisiones. Además, las líneas de investigación propuestas contribuirán a la mejora de las técnicas de reciclado.

Con todo ello, se pretende animar al uso de tecnologías de reciclado en la ingeniería viaria. Para países con poca experiencia en este campo, las recomendaciones dadas en las GBP pueden suponer una gran ayuda para mejorar sus porcentajes de reciclado. Pero incluso en países donde estas prácticas son de uso común, las GBP pueden aportar luz sobre enfoques alternativos que podrían contribuir a reducir costes económicos y ambientales.

Por otra parte, la base de datos se presenta como una herramienta imprescindible para facilitar el manejo de la gran cantidad de información reunida. Se plantea ahora el reto de seguir manteniendo vivo el espíritu del proyecto mediante la actualización periódica de la información. El conocimiento evoluciona continuamente, y si las nuevas experiencias e investigaciones no se van incorporando a la base de datos, esta herramienta quedará obsoleta en poco tiempo. Por ello, se considera muy importante la incorporación en la base de datos de las experiencias que vayan produciéndose en los distintos países para que esta herramienta sea de utilidad en el futuro, así como la profundización en las necesidades de investigación identificadas en el proyecto.

### 6. Referencias

- Centro de Estudios del Transporte (CEDEX), 2011. Seminario de presentación del proyecto europeo DIRECT-MAT. Madrid, 9 de marzo 2011.
- Descantes, Y; Lumiere, L, 2011. Final Workshop. Database (presentación) WP6. Bruselas, 18 de octubre de 2011.

- DIRECT-MAT, 2011. "Best Practice Guide for de dismantling of asphalt roads and use of recycled materials in asphalt layers".
- DIRECT-MAT, 2011. "Report on practical application case studies regarding dismantling and recycling of asphalt".
- DIRECTMAT, 2010."Synthesis of national and international documents on existing knowledge regarding the recycling of reclaimed road materials in asphalt".
- Sinis Fernández, F.; Rubio Guzmán, B., González Abadías, A., 2011:" El proyecto DIRECT-MAT: Técnicas de demolición y reciclado de materiales para la carretera – Compartiendo conocimientos y prácticas". n° 161 Ingeniería Civil (ISSN: 0213-8468).
- González Abadías, A.; Ruiz-Ayúcar Berlinches, E.; Sinis Fernández, F. (2012): "Conclusiones del proyecto DIRECT-MAT: Técnicas de demolición y reciclado de materiales para la carretera" n° 167 Ingeniería Civil (ISSN: 0213-8468).