

VALDÉS V., GONZALO A.; MARTÍNEZ R., ADRIANA H.; PÉREZ-JIMÉNEZ, FÉLIX E.

Estudio de Variabilidad en Mezclas Asfálticas en Caliente Fabricadas con Altas Tasas  
de Material Asfáltico Reciclable (RAP)

Revista de la Construcción, vol. 7, núm. 1, 2008, pp. 60-71

Pontificia Universidad Católica de Chile

Chile

Disponible en: <http://redalyc.uaemex.mx/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=127612580006>



*Revista de la Construcción*

ISSN (Versión impresa): 0717-7925

mandradg@uc.cl

Pontificia Universidad Católica de Chile

Chile

¿Cómo citar?

Número completo

Más información del artículo

Página de la revista

*Variability Study of  
Hot-Mix Asphalt  
with High Rates of  
Reclaimed Asphalt  
Pavement (RAP)*

# Estudio de Variabilidad en Mezclas Asfálticas en Caliente Fabricadas con Altas Tasas de Material Asfáltico Reciclable (RAP)



## Autores

GONZALO A. VALDÉS V. Académico Departamento de Obras Civiles  
Universidad de La Frontera – Temuco – Chile  
Ingeniero Constructor – Mg. Doctorando Universidad Politécnica de Cataluña,  
Barcelona – España  
email: gvaldes@ufro.cl

ADRIANA H. MARTÍNEZ R. Profesora Asociada ETSECCPB  
Universidad Politécnica de Cataluña – Barcelona – España  
Ingeniera Civil – Doctora Ingeniera en Caminos, Canales y Puertos  
email: adriana.martinez@upc.edu

FÉLIX E. PÉREZ-JIMÉNEZ Catedrático de Caminos ETSECCPB  
Universidad Politécnica de Cataluña – Barcelona – España  
Ingeniero y Doctor Ingeniero en Caminos, Canales y Puertos  
email: edmundoperez@upc.edu

**Fecha de recepción** 09/04/08

**Fecha de aceptación** 02/05/08

## Resumen

En el presente artículo se presentan los resultados del estudio destinado a caracterizar y determinar la variabilidad de las propiedades del material asfáltico reciclable (RAP) y de las mezclas asfálticas fabricadas en caliente con altas tasas de RAP en su composición. Se seleccionaron tres proyectos, construidos en diferentes provincias españolas entre los años 2004 y 2007, los cuales utilizaron mezclas recicladas en tasas entre el 40 y el 60% de RAP. En el RAP se evaluó la variabilidad existente en los acopios en torno al contenido de ligante y granulometría, mientras que en las mezclas recicladas se analizaron las mismas variables junto con las propiedades

volumétricas y mecánicas obtenidas de los ensayos Marshall realizados al control de las mezclas. En general, los resultados obtenidos indican una mayor variabilidad granulométrica y de contenido de asfalto en las mezclas con altos contenidos de RAP respecto a las mezclas convencionales, pero a su vez, los resultados señalan que las técnicas de homogenización realizadas al RAP y el fraccionamiento de éste, previo a su utilización, permiten disminuir considerablemente la variabilidad granulométrica y de contenido de asfalto de las mezclas recicladas, y a la vez, registrar variabilidades de sus propiedades volumétricas y mecánicas similares a las mezclas convencionales.

**Palabras clave:** reciclado, mezclas asfálticas, rehabilitación.

## Abstract

*Results of a study oriented to characterize and to determine the variability of the properties of the reclaimed asphalt pavement (RAP) and hot recycled asphalt mixtures with high rates of RAP in their composition are presented. Three projects carried out in different Spanish provinces between the years 2004 and 2007 were selected, which ones used recycled mixtures with RAP rates between 40 and 60%. On each RAP, variability in the storings around the asphalt content and the particle size distribution was evaluated, whereas in the recycled mixtures the same variables were analyzed together with the volumetric and mechanical properties obtained from*

*Marshall's tests applied to control the mixtures. In general, the results obtained indicate a high variability in the particle size distribution and asphalt content in the mixtures with high contents of RAP with respect to the conventional mixtures, and also the results obtained indicate that the homogenizing techniques used for the RAP and the division of RAP, previous to its use, allow to reduce considerably the variability in the particle size distribution and in the asphalt content of the recycled mixtures at high rates, and simultaneously, to register variability of its volumetric and mechanical properties similar to the conventional mixtures.*

**Key words:** recycled, asphalt mixtures, rehabilitation.

## Introducción

En el marco del proyecto de investigación CENIT 2007: Investigación Estratégica de Carreteras más Seguras y Sostenibles (Acrónimo: FENIX), llevado a cabo actualmente en España, cuyo objetivo principal se basa en crear los conocimientos técnicos necesarios para la obtención de tecnologías en la construcción de infraestructura viaria que haga que estas sean más seguras para los usuarios y con un impacto medioambiental mínimo y sostenible, y dentro del área de mezclas recicladas en caliente, se presenta el siguiente estudio destinado a evaluar, en mezclas asfálticas recicladas fabricadas en planta en caliente, la variabilidad existente del material asfáltico reciclable (RAP), y la influencia de este, en las mezclas con altas tasas de material reciclado, además de determinar los factores que originan variaciones de las mezclas recicladas a altas tasas fuera de las permitidas en las especificaciones españolas actuales.

Frecuentemente, en las mezclas recicladas se utilizan tasas de RAP que van del 10% al 30% y según lo señalado en numerosas investigaciones, para estas tasas de reciclado, las mezclas tienen un comportamiento similar a las mezclas convencionales (Kandhal *et al.*, 1995; McDaniel, *et al.*, 2000; Miró y Pérez, 2002; Alarcón y Pérez, 2003). Sin embargo, hoy en día, en algunos proyectos de rehabilitación se requiere reciclar a mayores tasas, si se desea utilizar íntegramente los residuos generados producto del fresado o demolición de los pavimentos asfálticos, desarrollando así, una construcción sostenible que minimiza el gasto energético y de recursos naturales mediante el aprovechamiento íntegro tanto del ligante adherido como del agregado pétreo contenido en el RAP.

El RAP se define como el pavimento asfáltico que ha cumplido su vida útil que ha sido fresado o extraído y posteriormente triturado (McDaniel *et al.*, 2001), y sus propiedades dependen directamente de varios factores como: el tipo de mezcla asfáltica del que proviene, la metodología empleada en su extracción, la capa del pavimento que se extrajo, o bien, del proyecto que proviene, lo que produce generalmente una heterogeneidad en el material, implicando algunas variaciones significativas en cuanto a la calidad los áridos, contenido y tipo de ligante adherido, lo cual puede influir en homogeneidad de la mezcla final que se desea fabricar, sobretodo cuando el RAP se emplea en altas tasas.

Por ello, se presentan a continuación los objetivos planteados para el estudio, que se resumen en:

- Determinar la variabilidad existente en los acopios de RAP y sus posibles causas de heterogeneidad.
- Determinar la variabilidad existente en las propiedades de las mezclas fabricadas en planta en caliente que contengan altas tasas de RAP, comprobando sus desviaciones con mezclas convencionales sin RAP en su composición.
- Determinar la influencia del RAP en las propiedades de las mezclas que contienen altas tasas de material reciclado.

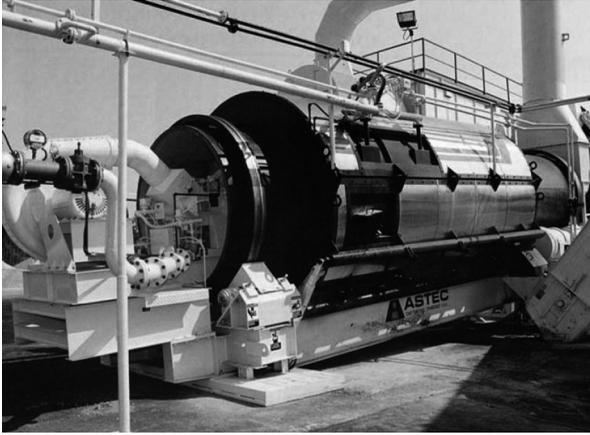
## Proyectos seleccionados

Se seleccionaron tres proyectos para el análisis de los resultados de los ensayos de control efectuados tanto al material reciclado como a las mezclas asfálticas, que cumplieron con la condición de haber fabricado y empleado mezclas utilizando altas tasas de RAP, y además tuvieron la particularidad de haber empleado en su etapa de producción de mezcla la misma planta continua, con doble tambor, de la marca ASTEC, ilustrada en la Figura 1, cuya principal característica es que posee un tambor secador doble, con dos tambores concéntricos, especialmente diseñada para la fabricación de mezclas recicladas, en que el RAP no entra en contacto directo con la llama del mechero, calentándose el mismo por una parte a través de la transferencia de calor desde el primer tambor y posteriormente en el proceso de mezclado cuando entra en contacto con los áridos vírgenes.

El primer proyecto seleccionado fue el refuerzo y rehabilitación de la carretera nacional N-230, ubicado en la provincia de Lérida (Figura 2), ejecutado en el 2004, en el cual se realizó el fresado de los 6 cm superiores de mezcla asfáltica del pavimento antiguo y luego se extendió una carpeta asfáltica de 8 cm de mezcla reciclada en caliente en planta tipo S-20<sup>1</sup> con una tasa de 50% de RAP, y sobre esta, una carpeta de rodadura de 6 cm de mezcla convencional. Esta obra tuvo la particularidad de realizar un proceso de cribado en los 40 mm del RAP previo a su utilización.

<sup>1</sup> Mezcla semidensa, tamaño máximo nominal de 20 mm – especificación española.

**Figura 1** Planta continua, secador mezclador tipo doble tambor



**Figura 2** Provincias españolas donde se construyeron los proyectos seleccionados



El segundo proyecto seleccionado fue la rehabilitación del pavimento de la autovía A-7, ubicado en la provincia de Murcia (Figura 2), ejecutado en el 2005, en el cual se realizó un fresado del carril derecho en todo el espesor de la mezcla existente, que se efectuó primero en un espesor de 20 cm en los tramos con base asfáltica, y luego, en 15 cm en los tramos con base grava-cemento. Luego, se empleó en las capas de reposición y primera capa de refuerzo una mezcla reciclada única tipo GS-20<sup>2</sup> con una tasa de 50% de RAP, y sobre esta, se extendió una capa de 7 cm de mezcla convencional tipo S-20, y finalmente, se extendió una carpeta de rodadura de 3 cm de una mezcla tipo M-10<sup>3</sup>. Esta obra tuvo la particularidad de realizar un proceso de cribado, homogenización y secado del RAP previo a su utilización.

El tercer proyecto seleccionado fue la rehabilitación del pavimento de la carretera A-140, ubicado en la provincia de Huesca (Figura 2), ejecutado durante el 2007, en el cual se procedió al fresado de los 8 cm superiores de mezcla asfáltica del pavimento antiguo y luego se extendió una capa asfáltica de 8 cm de mezcla reciclada en caliente en planta tipo S-20 con una tasa de 60% de RAP. Sobre esta, se construyó una capa intermedia de 5 cm de mezcla reciclada en caliente tipo S-12<sup>4</sup> con una tasa de 40% de RAP, y finalmente se dispuso de una capa de rodadura tipo F8<sup>5</sup> en la que se utilizó un

ligante asfáltico modificado con polímeros. Este proyecto tuvo la particularidad de la utilización de dos fracciones del RAP en el proceso de fabricación de las mezclas de recicladas, con el objetivo de disminuir la heterogeneidad del material. Las fracciones y proporciones de RAP utilizadas para la mezcla S-20 fueron 15% de RAP 0/8 mm y 45% de RAP 8/25mm, y para la mezcla S-12 fueron 20% RAP 0/8 mm y 20% RAP 8/25mm.

Los ensayos realizados en los proyectos seleccionados, tanto al RAP como a las mezclas recicladas en caliente, se ejecutaron de acuerdo a las actuales especificaciones españolas mediante las normas que se señalan a continuación:

- NLT-164/90 Contenido de ligante en mezclas bituminosas.
- NLT-165/90 Análisis granulométrico de los áridos recuperados de las mezclas bituminosas.
- NLT-168/90 Densidad y huecos en mezclas bituminosas compactadas.
- NLT-159/00 Resistencia a la deformación plástica de las mezclas bituminosas empleando el aparato Marshall.

La Tabla 1 indica las características principales de las mezclas utilizadas en los proyectos seleccionados en el estudio.

<sup>2</sup> Mezcla que se encuentra en la zona de solape de las bandas granulométricas de las mezclas semidensa S-20 y gruesa G-20, de tamaño máximo nominal de 20 mm – especificación española.

<sup>3</sup> Mezcla discontinua, tamaño máximo nominal de 10 mm – especificación española.

<sup>4</sup> Mezcla semidensa, tamaño máximo nominal de 12 mm – especificación española.

<sup>5</sup> Mezcla discontinua, tamaño máximo nominal de 8 mm – especificación española.

**Tabla 1** Proyectos seleccionados para el análisis de variabilidad del RAP y mezclas recicladas

Proyecto	Carretera	Kilometrajes	Ligante de aportación	Tipo de mezcla	Mezcla reciclada (Ton)	RAP (%)
1	N-230	163,2 al 187,1	B 100	S20 R50	30.000	50
2	A-7	566,0 al 572,0	B 110	G/S20 R50	20.000	50
3	A-140	16,3 al 22,2	REJUV-250	S20 R60	16.128	60
			REJUV-200	S12 R40	12.960	40

## Normativa española actual

La normativa española que regula la utilización del RAP y de las mezclas recicladas viene redactada en el artículo 22 del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Conservación de Carreteras, PG-4. Esta normativa describe el procedimiento que se debe cumplir para el reciclado en planta de capas asfálticas, el cual se aplica a mezclas asfálticas recicladas con una proporción en masa del material asfáltico reciclable (RAP) comprendida entre el 10 y el 50% de la masa total de la mezcla, donde las tolerancias permitidas al RAP, tras la extracción del ligante, se observan en la Tabla 2 y algunos de sus puntos más importantes se describen a continuación:

- La dotación de ligante de aportación deberá ser como mínimo el 60% de la dotación total del ligante hidrocarbonado de la mezcla reciclada.
- La razón entre la estabilidad Marshall y la deformación Marshall será inferior a 8 KN/mm.
- La dotación total de ligante hidrocarbonado (el de aportación más el procedente del material asfáltico reciclable) no será inferior expresada en proporción en masa sobre el total de los áridos en seco de la mezcla

(incluido el polvo mineral y los áridos procedentes del RAP), al 4% en capas intermedias y 3,5% en capas de base, incluidas las tolerancias.

Para la mezcla reciclada fabricada en planta, el artículo 22 del PG-4 hace referencia a cumplir con las tolerancias admisibles especificadas en el artículo 542 del Pliego de Prescripciones Técnicas para Carreteras y Puentes, PG-3, el cual señala lo siguiente:

- La tolerancia admisible, en más o en menos, respecto de la dotación de ligante hidrocarbonado de la fórmula de trabajo será del tres por mil ( $\pm 0,3\%$ ) en masa, del total de áridos (incluido el polvo mineral).
- Las tolerancias admisibles, en más o en menos, respecto de la granulometría de la fórmula de trabajo serán las siguientes, referidas a la masa total de áridos (incluido el polvo mineral):
  - Tamices superiores al 2 mm de la UNE-EN 933-2:  $\pm 3\%$ .
  - Tamices comprendidos entre el 2 mm y el 0,063 mm de la UNE-EN 933-2:  $\pm 2\%$ .
  - Tamiz 0,063 mm de la UNE-EN 933-2:  $\pm 1\%$ .

**Tabla 2** Tolerancias sobre la fórmula de trabajo del RAP. (Fuente: Art. 22, Orden Circular 8/2001)

Características	Unidad	Tolerancia
Cernido de tamices > 2 mm	% en masa del material a reciclar seco	$\pm 5$
Cernido de tamices > 0,063 mm y $\leq 2$ mm		$\pm 3$
Cernido tamiz 0,063 mm		$\pm 1,5$
Contenido de ligante		$\pm 0,4$
Penetración del ligante recuperado	0,1 mm	$\pm 4$

## Discusión y desarrollo

Los resultados de los ensayos fueron almacenados y organizados en una base de datos, posteriormente se determinaron y analizaron parámetros estadísticos como desviaciones medias y desviaciones estándar de las propiedades controladas al RAP y a las mezclas con diferentes tasas de RAP. En un primer análisis se estudió la variabilidad del RAP y luego la variabilidad de los parámetros de las mezclas recicladas, junto con el nivel de cumplimiento de la normativa española actual.

### Análisis de variabilidad del RAP

Los resultados de los ensayos de extracción de asfalto del RAP muestran en la Figura 3 una clara dispersión durante el período en que estos ensayos fueron realizados, pero en la mayor parte de los resultados observados, los contenidos de ligante del RAP fluctuaron en torno al contenido considerado en la fórmula de trabajo (F.T.), donde el promedio de las extracciones fue similar al contenido de ligante utilizado para realizar la fórmula de trabajo. En algunos sectores del gráfico ilustrado en la Figura 3 se aprecian dispersiones altas, del orden de 1 y 1,5% del contenido de ligante del RAP respecto a la fórmula de trabajo, lo cual se considera un rango bastante amplio, sobre todo cuando se emplea RAP en altas tasas en las mezclas. Respecto a lo señalado por la normativa española en la Tabla 2, se obtuvo un 35,1% de cumplimiento en las extracciones del RAP utilizado en la carretera N-230, pero a su vez, el 94,4% y el 72,2% de las extracciones realizadas al RAP utilizado en la carretera A-140 cumplió con la normativa, para las fracciones de 0/8 mm y 8/25 mm, respectivamente.

Las variaciones granulométricas obtenidas en el RAP se ilustran en la Tabla 3, en la cual se observa que las mayores variaciones, dadas por la desviación estándar respecto de la fórmula de trabajo, se producen en los tamices 2, 4, 8 y 12,5 mm UNE, en los cuales se observan amplios rangos de variabilidad, superando en muchos casos lo permitido en la normativa. Sin embargo, a nivel global, las granulometrías efectuadas al RAP cumplen en un 73,2% en el RAP 0/25 mm utilizado en la carretera N-230, y en la carretera A-140, en un 94 y 72%, en el RAP 0/8 mm y 8/25 mm, respectivamente. El RAP 0/8 mm fue el que obtuvo una menor variabilidad la granulometría, tal como se aprecia en la Tabla 3 y se ilustra en la Figura 4.

En el análisis de variabilidad realizado al RAP utilizado en dos de los tres proyectos seleccionados, carreteras N-230 y A-140, indican que al separar el RAP en fracciones para la fabricación de la mezcla se logra tener un mayor control sobre las variables de contenido de asfalto y granulometría. La mayor variabilidad se encuentra en los tamaños mayores de RAP, tanto para el contenido de asfalto como para los tamaños de sus partículas, por lo tanto al tener un mayor control sobre esta fracción es factible reducir las heterogeneidades del material. Esto confirma lo señalado por Don Brock (2007), que al trabajar con más de una fracción de RAP en la fabricación de mezclas recicladas se reduce la variabilidad del material en relación al contenido de asfalto y la granulometría.

Figura 3 Contenido de asfalto RAP

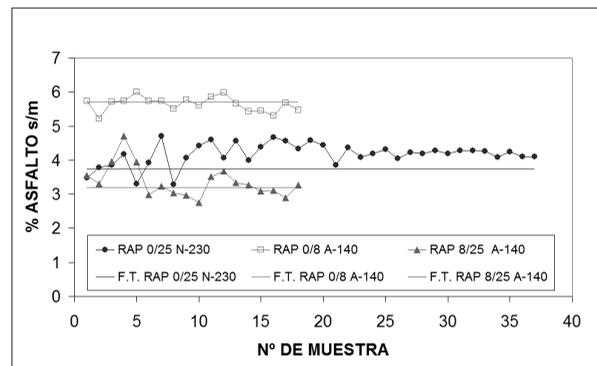
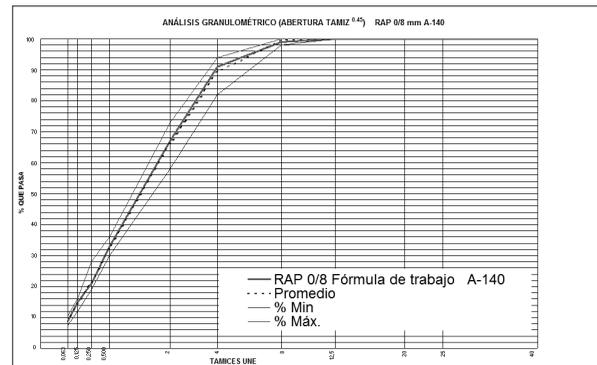


Figura 4 Variabilidad del RAP 0/8 mm utilizado en la carretera A-140



**Tabla 3 Estadísticas de las granulometrías realizadas al RAP**

Granulometría del RAP											
Proyecto	Tamices UNE (mm)	25	20	12,5	8	4	2	0,5	0,25	0,125	0,063
RAP 0/25 N-230	Desviación estándar	0,42	3,18	6,23	6,44	6,49	5,36	3,14	2,17	1,42	1,24
	Cumplimiento normativa (%)	100	94,6	73	64,9	37,8	21,6	54,1	83,8	97,3	78,4
RAP 0/8 A-140	Desviación estándar	-	-	-	0,61	3,12	3,61	1,82	2,15	1,38	0,67
	Cumplimiento normativa (%)	-	-	-	100	88,9	77,8	100	94,4	100	94,4
RAP 8/25 A-140	Desviación estándar	0,51	1,70	6,36	7,90	6,51	5,04	2,48	1,88	1,23	0,91
	Cumplimiento normativa (%)	100	100	33,3	38,9	61,1	50	83,3	72,2	94,4	94,4

### Análisis de variabilidad de la mezcla reciclada

#### Contenido de asfalto y granulometrías

La variabilidad del contenido de asfalto en las mezclas recicladas se presenta en la Figura 5, en la cual se ilustran las desviaciones medias y las desviaciones medias respecto a la fórmula de trabajo de los valores de contenido de asfalto de todas las mezclas analizadas en este estudio. Estas desviaciones representan, por una parte, el valor medio de las diferencias en valor absoluto entre los valores obtenidos en las granulometrías y del valor medio de las muestras (ecuación 1), y por otra, el valor medio de las diferencias en valor absoluto entre los valores obtenidos en las granulometrías respecto al valor señalado en la fórmula de trabajo (ecuación 2). Los valores estadísticos obtenidos son comparados con las desviaciones medias respecto de su fórmula de trabajo de mezclas convencionales, obtenidas de un promedio de 86 mezclas extendidas en proyectos ya ejecutados (Tahmoressi, M y Kennedy, T, 1988; Solaimanian, M y Kennedy, T, 1989).

$$DM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |X_i - \bar{X}| \quad (1) \quad DM_{FT} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |X_i - X_{FT}| \quad (2)$$

Donde:

$DM$  : Desviación media

$DM_{FT}$  : Desviación media c/r a la fórmula de trabajo

$X_i$  : Valor de una muestra

$\bar{X}$  : Valor medio de las muestras

$X_{FT}$  : Valor propuesto en la fórmula de trabajo

En la Figura 5 se observa una primera comparación de las desviaciones medias respecto al promedio de los valores del contenido de asfalto obtenido de las extracciones realizadas a las muestras de las mezclas recicladas analizadas, indicando variaciones que van de 0,1 a 0,27 % apreciando una tendencia a incrementar la variabilidad en el contenido de asfalto a medida que se incrementa el porcentaje de RAP en la mezcla. Sin embargo, se aprecia para la mezcla S20 R50<sup>6</sup>, empleada en la carretera N-230 y la mezcla GS20 R50, utilizada en la autovía A-7, con igual porcentaje de RAP en su composición, que existe una clara diferencia en las des-

<sup>1</sup> La especificación española denomina el tipo de mezcla asfáltica en caliente reciclada añadiendo a la denominación del tipo de mezcla correspondiente la letra "R" y dos dígitos que indiquen la proporción de material asfáltico reciclable empleado en la mezcla (Por ejemplo: S20R35).

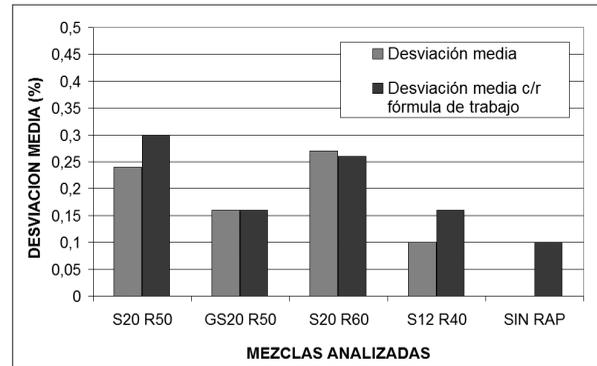
viaciones medias obtenidas, observándose una mayor homogeneidad de la segunda mezcla descrita, producto del tratamiento previo realizado al RAP utilizado en la fabricación de la mezcla.

En las desviaciones medias del contenido de ligante respecto a la fórmula de trabajo de las mezclas analizadas, no se observa una tendencia clara, puesto que la mezcla con menor desviación media (GS20 R50) no es la que contiene menor cantidad de RAP en su composición, pero si la que realizó un proceso previo de homogenizado y secado del RAP antes de incorporarlo en la mezcla, y por otro lado, la mezcla S12 R40 utilizó mayor porcentaje de RAP 0/8 mm en su composición, lo que implica que se reduce la variabilidad en la mezcla fabricada procesando el RAP mediante un homogenizado y secado, y mediante la utilización de RAP en sus fracciones mas homogéneas.

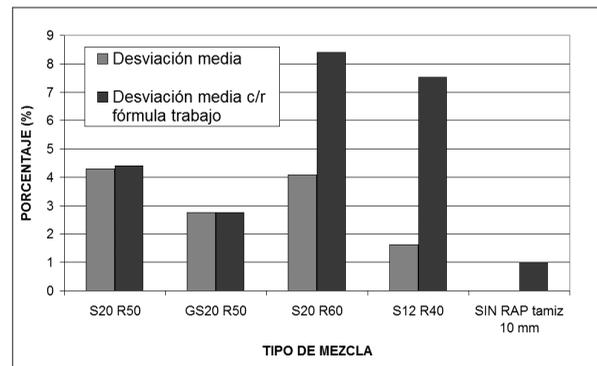
La Tabla 4 muestra los valores estadísticos globales obtenidos para las mezclas analizadas respecto al contenido de asfalto en su composición, donde se observa que las mezclas GS20 R50 y S12 R40, resultaron ser las mezclas más homogéneas obteniendo similares desviaciones medias y porcentajes de cumplimiento de la normativa española expuesta en el Pliego PG-3.

Las Figuras 6 y 7 ilustran las desviaciones medias respecto al promedio y las desviaciones medias respecto al valor señalado en las fórmulas de trabajo en los tamices 8 y 0,063 mm UNE para cada tipo de mezcla. Además se observa que estos valores son comparados con las desviaciones respecto de su fórmula de trabajo de mezclas convencionales, obtenidas de un promedio de 58 mezclas (Tahmoressi, M y Kennedy, T, 1988; Solaimanian, M y Kennedy, T, 1989).

**Figura 5** Desviaciones del contenido de asfalto



**Figura 6** Desviaciones granulométricas para el tamiz 8mm UNE



**Tabla 4** Estadísticas del contenido de asfalto

Contenido de asfalto s/m (%)				
	S20 R50 N-230	GS20 R50 A-7	S20 R60 A-140	S12 R40 A-140
<b>Fórmula de trabajo</b>	4,53	4,3	4,4	4,5
<b>Promedio</b>	4,73	4,33	4,36	4,65
<b>Desviación media</b>	0,24	0,16	0,27	0,10
<b>Desviación media c/r fórmula de trabajo</b>	0,30	0,16	0,26	0,16
<b>Cumplimiento normativa (%)</b>	58,8	89,4	60	85,7

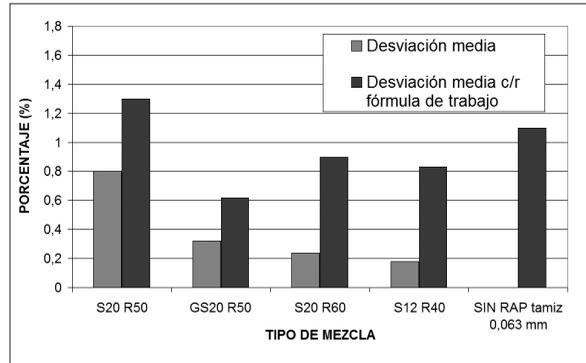
En la Figura 6 se realiza una primera comparación de las desviaciones medias respecto al promedio de las granulometrías efectuadas en el tamiz 8 mm UNE, indicando variaciones que van de 1,6 a 4,3 %, apreciando una ligera tendencia a incrementar la variabilidad a medida que se incrementa el porcentaje de RAP en la mezcla. Si se analizan las desviaciones medias respecto a la media y respecto a la fórmula de trabajo de las mezclas con iguales contenidos de RAP de 50%, se observa una mayor homogeneidad para la mezcla G/S20 R50, donde el proceso de homogenizado realizado tuvo una gran influencia en el resultado. Al analizar las desviaciones medias respecto a la fórmula de trabajo se observan las mayores desviaciones en las mezclas S20 R60 y S12 R40 utilizadas en la carretera A-140, con porcentajes de 8,3 y 7,5%, respectivamente. Si se comparan las diferencias de desviación respecto de la fórmula de trabajo con las obtenidas para el tamiz de 10 mm de mezclas convencionales, se observa que existe una gran diferencia, ya que para mezclas convencionales se tiene una desviación media respecto su fórmula de trabajo de un 1% y para las mezclas recicladas con alto contenido de RAP estas variaciones fluctúan entre 2,7 y 8,3%.

En la Figura 7 se observan las desviaciones medias de las granulometrías realizadas respecto al promedio de las muestras y respecto a la fórmula de trabajo para el tamiz 0,063 mm UNE. En este gráfico se observa que para el tamiz 0,063 mm UNE no se exhibe una gran desviación media respecto al promedio de las muestras, mostrando que las mezclas más homogéneas en su composición, son las mezclas S12 R40 y S20 R60, con valores de 0,18 y 0,24%, respectivamente. Las desviaciones medias respecto a la fórmula de trabajo son similares a las obtenidas en mezclas convencionales e incluso menores en la mayoría de las mezclas recicladas analizadas.

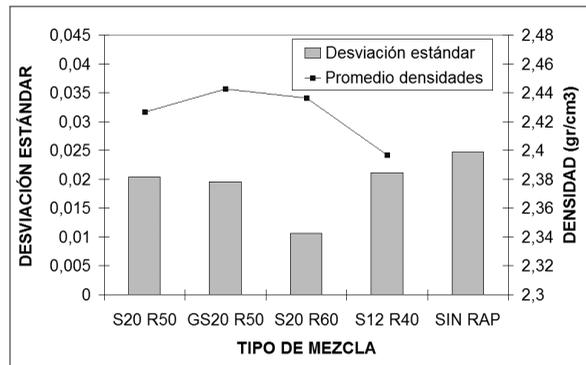
### Propiedades volumétricas y mecánicas

Los parámetros volumétricos y mecánicos fueron obtenidos de los ensayos Marshall realizados a las mezclas recicladas utilizadas en los proyectos seleccionados, los cuales fueron comparados entre sí y con los resultados obtenidos del análisis de ensayos realizados en seis proyectos que se utilizaron mezclas convencionales y fueron ejecutados en la comunidad autónoma de Cataluña, España, durante los años 2006 y 2007 (Laboratorio de Caminos de la Universidad Politécnica de Cataluña, 2007).

**Figura 7** Desviaciones granulométricas para el tamiz 0,063 mm UNE



**Figura 8** Desviación estándar de densidades



### Densidades

En la Figura 8 se presenta una comparación de las desviaciones estándar de las mezclas analizadas, en la cual se observa una menor variabilidad de las densidades obtenidas en la mezcla S20 R60, ilustrándose a su vez, que el resto de las mezclas analizadas fluctúan en torno a 0,020 gr/cm<sup>3</sup>. Por otra parte, se observa en la Figura 8, que las mezclas analizadas son comparadas con la desviación estándar de mezclas convencionales sin RAP en su composición, en la cual las desviaciones de las densidades obtenidas se encuentran en el rango típico e incluso son inferiores en algunos casos en relación a las mezclas convencionales.

### Contenido de huecos

La variabilidad del contenido de huecos de las mezclas estudiadas se observa en la Figura 9, en la cual se aprecia que las desviaciones son inferiores a 0,9% para todas

las mezclas analizadas, y se encuentran incluso bajo la desviación estándar de mezclas convencionales analizadas para este parámetro, por otra parte, no se observa una incidencia directa de que el porcentaje de RAP en la fabricación de la mezcla altere la variable de contenido de huecos, puesto que la mezcla más homogénea resultó ser la con mayor contenido de RAP.

### Estabilidad Marshall

La variabilidad de las estabilidades Marshall registradas en las probetas de las mezclas estudiadas se presentan en la Figura 10, donde se observa que las mezclas S12 R40 y GS20 R50 obtuvieron las menores desviaciones de las mezclas recicladas analizadas y cuyas variabilidades obtenidas son levemente superiores a las obtenidas en las mezclas convencionales sin RAP, lo que implica nuevamente que el proceso de homogenizado y secado del RAP y la mayor utilización de fracciones más pequeñas del RAP como la utilizada en la mezcla S12 R40 aportan a disminuir la variabilidad de la mezcla reciclada en lo que a estabilidad Marshall se refiere. Por otra parte se puede apreciar una tendencia a incrementar la estabilidad conforme existe un aumento de porcentaje de RAP existente en la mezcla.

### Deformación Marshall

La variabilidad de las deformaciones Marshall registradas en las probetas de las mezclas estudiadas se presentan en la Figura 11, en la cual se observa, al igual que en el análisis de las estabilidades registradas, que las mezclas S12 R40 y GS20 R50 obtuvieron las menores desviaciones estándar respecto a los valores de deformación Marshall registrados en las mezclas recicladas analizadas y cuyos valores son similares a los obtenidos de las mezclas convencionales sin RAP. Las deformaciones promedio obtenidas en las mezclas recicladas se encuentran en el rango establecido en el PG-3 y sus valores son similares a las obtenidas en las mezclas convencionales.

### Módulo Marshall

La Figura 12 presenta un gráfico comparativo de las variaciones producidas en el módulo Marshall para las mezclas recicladas, en la cual se aprecia que la mezcla que obtuvo una mayor variación fue la S20 R60, utilizada en la carretera A-140, sin embargo, se puede observar que las mezclas S20 R50, GS20 R50 y S12 R40 obtuvieron variaciones muy similares a las mezclas convencionales sin RAP en su composición e incluso la mezcla S12 R40 obtuvo variaciones menores. Respecto al promedio de

los módulos Marshall obtenidos, se observa en la Figura 11 que la mezcla más frágil es la GS20 R50, con el mayor módulo Marshall obtenido, sin embargo todas las mezclas se encuentran en su promedio bajo los 8 KN/mm exigidos en el Pliego PG-4 para este parámetro.

Figura 9 Desviación estándar contenido de huecos

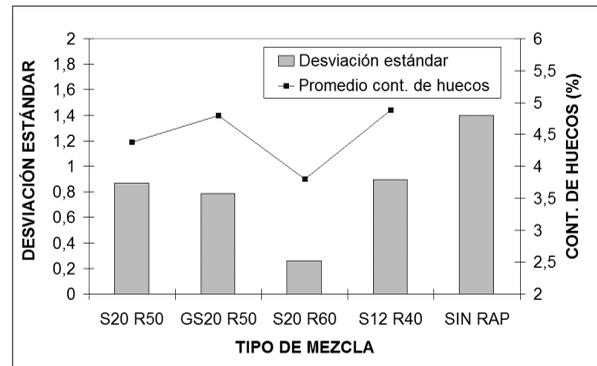


Figura 10 Desviación estándar estabilidad Marshall

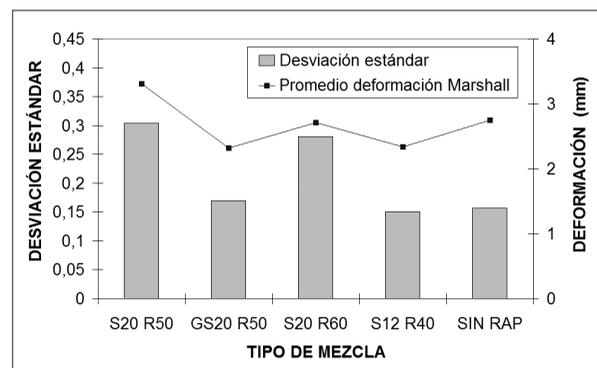
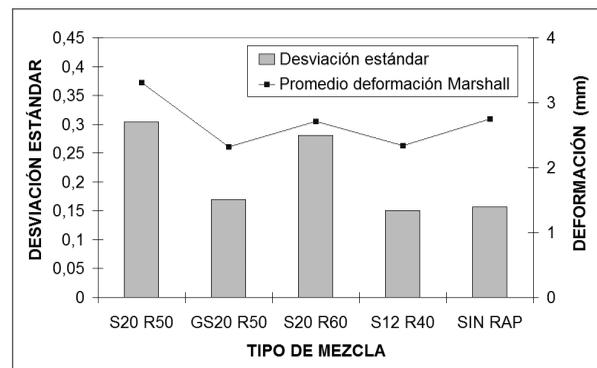
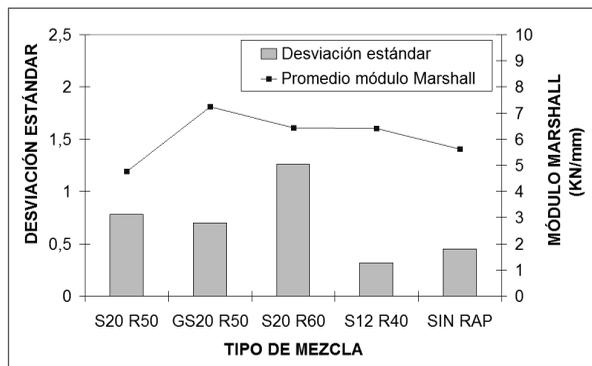


Figura 11 Desviación estándar deformación Marshall



**Figura 12** Desviación estándar del módulo Marshall



## Conclusiones

En la caracterización del RAP utilizado en los proyectos seleccionados, los resultados de los ensayos de extracción realizados muestran una clara variabilidad en el contenido de ligante y en la granulometría, sin embargo, al analizar el RAP en fracciones, se observa que existe una menor variabilidad en estos parámetros en las fracciones menores (0/8 mm) que en las fracciones mayores (8/25 mm), lo cual indica, que al separar el RAP en fracciones para la fabricación de la mezcla se logra tener un mayor control sobre las variables de contenido de asfalto y granulometría, incidiendo directamente en la homogeneidad de la mezcla final, sobretodo cuando se utilizan altas tasas de RAP en su fabricación.

En las mezclas recicladas analizadas se observa una variabilidad general en las granulometrías efectuadas, sobretodo en los tamaños de los tamices 4, 8 y 12,5 mm UNE, no así en los tamaños menores, cuyas variaciones respecto a la fórmula de trabajo son similares a las de mezclas convencionales. Además, se concluye que el proceso de homogenizado y secado del RAP, y la utilización en mayor cantidad de la fracción más fina del RAP (0/8 mm), ayuda reducir la variabilidad granulométrica en la mezcla final.

El contenido de asfalto de las mezclas recicladas que fueron elaboradas con RAP previamente homogenizado y secado tuvieron una variabilidad mínima, ligeramente superior que las mezclas convencionales, al igual que aquellas que utilizaron mayor porcentaje de RAP más fino (0/8 mm) en su composición, lo que indica la influencia directa de la variabilidad del contenido de asfalto

obtenido en el RAP en la variabilidad del contenido de asfalto de la mezcla final.

Se manifiesta una tendencia a incrementar la variabilidad en el contenido de asfalto a medida que se incrementa el porcentaje de RAP en la mezcla, sin embargo para las mezclas analizadas con igual porcentaje de RAP en su composición, existe una diferencia marcada en las desviaciones medias obtenidas, observándose una mayor homogeneidad en la mezcla que realizó un tratamiento previo al RAP antes de utilizarlo.

En el caso de las mezclas que trataron previamente el RAP mediante un proceso de homogenizado o utilizaron en una mayor proporción la fracción más fina del RAP, las variabilidades registradas en las granulometrías y contenidos de asfalto, tanto en el RAP como en las mezclas recicladas a altas tasas, no se reflejaron en variabilidades significativas en las propiedades volumétricas y mecánicas obtenidas por el ensayo Marshall, encontrándose en las desviaciones determinadas, valores similares a los obtenidos en mezclas sin RAP en su composición.

En comparación con las mezclas convencionales las propiedades volumétricas determinadas a las mezclas recicladas analizadas, contenidos de huecos y densidades, mostraron una variabilidad similar.

En la estabilidad Marshall registrada en las mezclas recicladas se observa una tendencia a incrementar conforme aumenta el porcentaje de RAP existente en la mezcla, al igual que la variabilidad. Las variaciones en la deformación Marshall, en algunas mezclas, se observaron similares e incluso inferiores las determinadas en mezclas convencionales.

Los módulos Marshall registrados en las mezclas analizadas cumplieron con lo exigido por la normativa, que sea inferior a 8 KN/mm, y su grado de variabilidad fue similar al establecido en las mezclas convencionales.

## Agradecimientos

Los autores agradecen a las empresas participantes del proyecto Fénix que han permitido utilizar los resultados obtenidos en la redacción de este artículo.

## Referencias

1. Alarcón J. y Pérez F.E. (2003). *Estudio del comportamiento de mezclas bituminosas recicladas en caliente en planta*, Tesis Doctoral, ETSECCPB, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España.
2. Don Brock J. and Richmond J. L. (2007). *Milling and Recycling*, Technical Paper T-127, pp 1-36, ASTEC INC., Chatanooga, USA.
3. Federal Highway Administration (1997). *Pavement Recycling Guidelines for State and Local Governments*, Report No FHWA-SA-98-042, Washington, DC.
4. Kandhal P. S., Rao S. S., Watson D. E. and Young, B. (1995). *Performance of recycled hot mix asphalt mixtures in State of Georgia*, National Center for Asphalt Technology, NCAT Report 95-01.
5. Laboratorio de Caminos, Universidad Politécnica de Cataluña (2007), *Informes Técnicos de Obras*, ETSECCPB, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España.
6. McDaniel R. and Anderson R. M. (2001). *Recommended use of reclaimed asphalt pavement in the Superpave mix design method: Technician's Manual*, Rep. No. 452, NCHRP, Transportation Research Board, National Research Council, Washington D.C.
7. McDaniel R., Soleymani H., Anderson R., Turner P. and Peterson R. (2000). *Recommended Use of Reclaimed Asphalt Pavement in the Superpave Mix Design Method*, NCHRP Web Document 30 (Project D9-12): Contractor's Final Report.
8. Ministerio de Fomento (2004). *Firmes y Pavimentos. Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3)*, Orden FOM 891/2004, España.
9. Ministerio de Fomento (2002). *Firmes y Pavimentos. Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Conservación de Carreteras (PG-4)*, Dirección General de Carreteras, Madrid, España.
10. Miró Recasens R. y Pérez Jiménez F. (2002). *Características Mecánicas de las Mezclas Recicladas en Caliente*, Revista Carreteras, 119, 29 -44.
11. Ortiz Ripoll J. y Felipo Sanjuán J. (2006), *Recomendaciones para la Producción en Central de Mezclas Bituminosas en Caliente con Altas Tasas de Reciclado*, Revista Carreteras, 149, 15-26.
12. Pérez F., Miró R. y Martínez A. (2006). *Reciclado en Planta en Caliente de Mezclas Bituminosas*, Estudio, Diseño y Control de Mezclas Bituminosas, 1º edición, Asociación Española de Carreteras, pp. 159-182, Madrid, España.
13. Solaimanian M. and Kennedy, T.W. (1989), *Evaluation of Field Compaction, Density Variations, and Factors Affecting Density Through 1987 HMA Field Construction Data*. Report 468-4F. Center for Transportation Research, University of Texas at Austin.
14. Tahmoressi, M. and Kennedy, T.W. (1988), *Organization and analysis of 1987 HMA Field Construction Data. Report 1197-1F*. Center for Transportation Research, University of Texas at Austin.