

Experiencias con mezclas templadas en Jédula (Cádiz). Seguimiento del comportamiento estructural en el tiempo y evaluación ambiental con el eco-comparador SEVE

En los últimos tiempos existe un creciente interés por el desarrollo de mezclas bituminosas que, con las mismas prestaciones y exigencias de una mezcla en caliente convencional, sean fabricadas a temperaturas inferiores, con los consiguientes beneficios medioambientales y de seguridad de los trabajadores. Una de las tecnologías para la obtención de mezclas bituminosas a una temperatura inferior a 100 °C es la desarrollada por Eiffage Infraestructuras, empleando betún como ligante y aprovechando la humedad de las arenas. Dicha tecnología ha sido probada en un proyecto de I+D+i suscrito por esta empresa y la Consejería de Fomento y Vivienda de la Junta de Andalucía, a través de la Agencia de Obra Pública (AOPJA). Sobre el tramo de prueba se ha realizado un estudio del comportamiento de los dos tipos de mezclas extendidas (caliente y templada) durante un periodo de tiempo de cuatro años, evaluando aspectos de resultados de puesta en obra (densidades alcanzadas), así como de comportamiento estructural mediante auscultación dinámica de alto rendimiento (ADAR) y ensayos de rigidez sobre testigos. En este artículo se presentan los resultados comparativos obtenidos en esta fase de seguimiento. Además, el estudio se completó con una evaluación ambiental basada en la metodología de Análisis de Ciclo de Vida realizada con el eco-comparador SEVE, cuya metodología y bases de datos están validadas internacionalmente por una entidad independiente acreditada.

Palabras clave: Mezclas bituminosas, auscultación dinámica de alto rendimiento, análisis de ciclo de vida

Recently there has been an increasing interest towards development of bituminous mixes that, although having the same performances and requirements as conventional hot mixes, are produced at lower temperatures, which makes them beneficial both for the environment and for worker safety. One of the technologies used to obtain bituminous mixes at temperatures below 100°C has been developed by Eiffage Infraestructuras, using bitumen as binder and making use of the moisture content of sand. This technology has been tested in a R&D&I project developed by the same company and the Department of Public Works and Housing of the Regional Government of Andalusia, through the Spanish Agency of Public Works (AOPJA). During a period of 4 years, behaviour of two types of extended mixes (hot and warm) was studied on the test section, in which the laying results (obtained densities) and their structural behaviour were evaluated by means of a high-performance dynamic auscultation system (ADAR) and stiffness tests on cores. This paper presents comparative results obtained during this follow-up phase. Moreover, the study was completed with an environmental evaluation based on the Life Cycle Analysis methodology carried out with the SEVE eco-gauge; its methodology and databases are validated at international level by an independent accredited body.

Keywords: Bituminous mixes, high-performance dynamic auscultation system, life cycle analysis

M^a Elena Hidalgo,
mehidalgo@infraestructuras.eiffage.es
Eiffage Infraestructuras

Alberto Bas, albertojbas@juntadeandalucia.es
Delegación Provincial de Cádiz. Consejería de Fomento y Vivienda. Junta de Andalucía

Paloma Ortega,
mariap.ortega.delgado@juntadeandalucia.es
Dirección General de Movilidad. Consejería de Fomento y Vivienda. Junta de Andalucía

M^a José Sierra, mjsierra@aopandalucia.es
Agencia de Obra Pública de la Junta de Andalucía

Experiencias con mezclas templadas en Jédula (Cádiz). Seguimiento del comportamiento estructural en el tiempo y evaluación ambiental con el eco-comparador SEVE

1. Introducción

En el año 2008 se firmó un contrato de colaboración entre la empresa Gestión de Infraestructuras de Andalucía, S. A. (actualmente Agencia de Obra Pública de la Junta de Andalucía, AOPJA) y la empresa Eiffage Infraestructuras para el trabajo de investigación denominado 'Empleo de mezclas templadas para la construcción de firmes de carreteras. Una alternativa frente a las mezclas bituminosas en caliente convencionales'. La duración del Convenio es de cuatro años, por lo que finalizó en el año 2012.

Este proyecto se encuadra dentro del desarrollo de nuevos tipos de mezclas asfálticas que contribuyan a mejorar los aspectos medioambientales, tanto en la fabricación como en la puesta en obra, y tiene como objetivo final verificar el comportamiento frente a una mezcla convencional, de un tipo de mezcla bituminosa denominada 'mezcla templada', obtenida tras la fabricación a una temperatura inferior a 100 °C. Para ello, se ha realizado un estudio en laboratorio de las características de estas mezclas, estudio que se ha complementado con la realización de un tramo de ensayo en condiciones reales de uso, con el fin de contrastar su comportamiento en el tiempo frente a las mezclas convencionales.

1.1 Características de las mezclas templadas







Las mezclas templadas desarrolladas, y que han sido objeto de evaluación en este proyecto, son mezclas bituminosas fabricadas con betún como ligante, al igual que en el caso de las mezclas en caliente convencionales, pero obtenidas a una temperatura inferior a 100 °C.

Esta técnica tiene como particularidad que no requiere el calentamiento total de los áridos empleados en la fabricación de la mezcla, sino que es aprovechada la humedad de la arena para conseguir la temperatura final, así como su manejabilidad.

El proceso llevado a cabo para la fabricación de las mezclas templadas se desarrolla en las siguientes etapas:

- Calentamiento del árido grueso a la temperatura requerida para conseguir la temperatura final de la mezcla.
- Envuelta del árido grueso por la totalidad del betún, utilizándolo a la temperatura habitual de empleo en función de sus características.
- Adición de la arena que contiene los elementos finos del esqueleto mineral con la humedad que disponga.
- Adición de una cantidad de agua suficiente para conseguir la autoexpansión del betún generando un aumento

Tabla 1. Datos generales de la obra.

Título del Proyecto	Acondicionamiento de la Travesía de Jédula en la A-382 desde el P.K 15+700 al 17+200, Arcos de la Frontera (Cádiz)	
Presupuesto	2.584.668,86 €	
Contratista	EIFFAGE INFRAESTRUCTURAS Jefe de Obra: Javier Ruiz Carretero	
Dirección de Obra	Junta de Andalucía. Delegación Provincial de Cádiz Servicio de Carreteras Directora de Obra: Paloma Ortega	
Gerencia de Obra	AOPJA (Antigua GIASA) Gerente de Obra: Carmen Aldana	
Asistencia Técnica	Inserco Ingenieros, S. L. Jefe de Unidad: Francisco Bocanegra	
Lab. de Recepción	CEMOSA Coordinador: Oscar Román	
Control ADAR	Euroconsult-GyA Coordinador: Javier Tavira	
Longitud del tramo	1,5 Kilómetros	

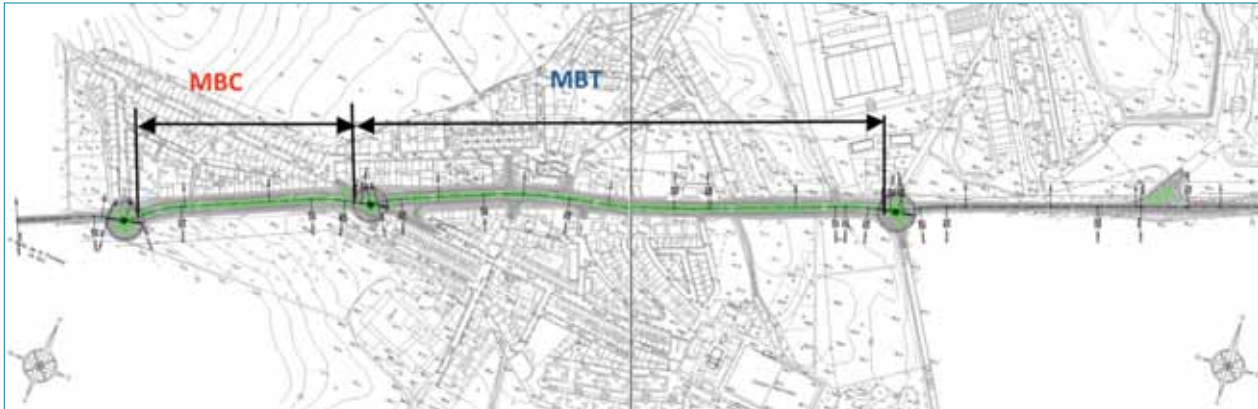


Figura 1: Planta tramo experimental.

Tramo con MBC	Rodadura AC16 SURF (6 cm)	Tramo con MBT	Rodadura AC16 SURF (6 cm)
	Base AC22 BASE (9 cm)		Base AC22 BASE (9 cm)
	Zahorra artificial (35 cm)		Zahorra artificial (35 cm)
	Suelo seleccionado S-3 (50 cm) CBR ≥ 20		Suelo seleccionado S-3 (50 cm) CBR ≥ 20
	TNS CBR = 10		TNS CBR = 10

Figura 2: Paquete de firme.

de la superficie específica del ligante y la disminución de la viscosidad aparente, consiguiendo, de esta forma, el mezclado perfecto de los áridos.

- El intercambio térmico permanente que se produce en las diferentes fases de la operación de mezclado, originando la condensación del agua residual, que se dispersa en la masa de betún y asegura la manejabilidad final de la mezcla.
- Se consigue una temperatura final en la mezcla inferior a 100 °C.
- La mezcla obtenida presenta el mismo aspecto que una convencional, pero con una menor emisión de humos.

1.2 Tramos de investigación

Los datos generales de la obra donde se ha ejecutado el tramo experimental de este proyecto se presentan en la Tabla 1.

La unidad de obra sobre la que se ha realizado la investigación corresponde al extendido de dos mezclas bituminosas aplicadas, una como capa base y otra como capa de rodadura (AC22 BASE G y AC16 SURF D), con un betún 35/50.

Las mezclas bituminosas que componen el firme se extendieron, en ambas capas, en dos tramos diferenciados dentro de todo el trazado (Figura 1 y Figura 2):

- Mezclas obtenidas a temperaturas entre 165 y 170 °C, correspondientes a una mezcla bituminosa en caliente convencional (MBC).
- Mezclas obtenidas a temperaturas inferiores a 100 °C, correspondientes a una mezcla templada (MBT).

2. Metodología de trabajo

Esta investigación se ha llevado a cabo en varias fases, con el fin de conseguir el control de todo el proceso:

Fase de diseño, correspondiente a la definición de la fórmula de trabajo (y su posterior comprobación por parte de la Dirección de Obra), de cada una de las mezclas utilizadas (caliente y templada). En esta fase se realizó, además, el Ensayo Inicial de Tipo, según los requisitos del Mercado CE, comprobando que para ambos tipos de mezcla se cumplieran las prescripciones

Experiencias con mezclas templadas en Jédula (Cádiz). Seguimiento del comportamiento estructural en el tiempo y evaluación ambiental con el eco-comparador SEVE

técnicas exigidas, tanto para la capa de base como en rodadura. Para el caso de la mezcla templada, no se realizó estudio Marshall, debido a que la proporción de cada una de las fracciones de áridos y el contenido de betún es idéntica al de la mezcla convencional en caliente; únicamente se define la proporción de arena fría que se va a adicionar y se realiza el ajuste de filler, teniendo en cuenta la proporción de éste en la arena fría. De igual modo, se ajustó la cantidad de agua que añadir para conseguir una mezcla templada final con una humedad del 0,5%.

Fase de fabricación, en la que se han controlado los siguientes parámetros de fabricación:

- humedad de la arena,
- porcentaje de filler de la arena seca y húmeda,
- cantidad de agua requerida
- balance térmico resultante,
- tiempo de amasado para asegurar el cubrimiento homogéneo de la mezcla y su manejabilidad.

Adicionalmente, se controlaron en esta fase, de acuerdo a la normativa de ensayos de la serie UNE-EN 12697, la temperatura y las características de las mezclas fabricadas (MBC y MBT) en cuanto a granulometría, contenido de ligante, ensayo Marshall, ensayo de deformación permanente y ensayo de sensibilidad al agua. Previamente se definieron las condiciones de ensayo más adecuadas para cada tipo de mezcla (por ejemplo, pre-acondicionamiento de la muestra a la temperatura de fabricación, determinación de la humedad de la mezcla templada previo a los ensayos de caracterización, empleo de la compactación giratoria, etc).

Fase de puesta en obra. La puesta en obra se realizó empleando una extendidora convencional. A continuación la compactación se llevó a cabo utilizando primeramente un compactador vibratorio de rodillo y posteriormente un compactador de neumáticos. En esta fase se realizaron controles de temperatura mediante termografías. Asimismo, como comprobación final sobre la unidad terminada se determinaron espesores, densidad y grado de compactación a partir de testigos de obra y medida de deflexiones mediante control de auscultación dinámica de alto rendimiento (ADAR).

Fase de seguimiento. Esta fase tiene como finalidad comprobar el comportamiento de cada una de las mezclas extendidas a lo largo de la explotación del tramo sometido al tráfico y agentes atmosféricos. Esta evaluación se determinó mediante la planificación de una serie de controles que había que realizar durante un periodo de cuatro años: seguimiento de deflexiones mediante control ADAR y evaluación de módulos dinámicos mediante la extracción de testigos.

En este artículo se presentan los controles realizados en la fase de puesta en obra y en la fase de seguimiento.

3. Resultados obtenidos

3.1 Control de temperaturas en la puesta en obra

En la etapa de puesta en obra se realizaron tomas de temperatura de las mezclas a su salida de planta, a la llegada del camión a obra y una vez extendida.

La temperatura de la mezcla convencional caliente, una vez fabricada, se encontraba en torno a los 160-165 °C. La

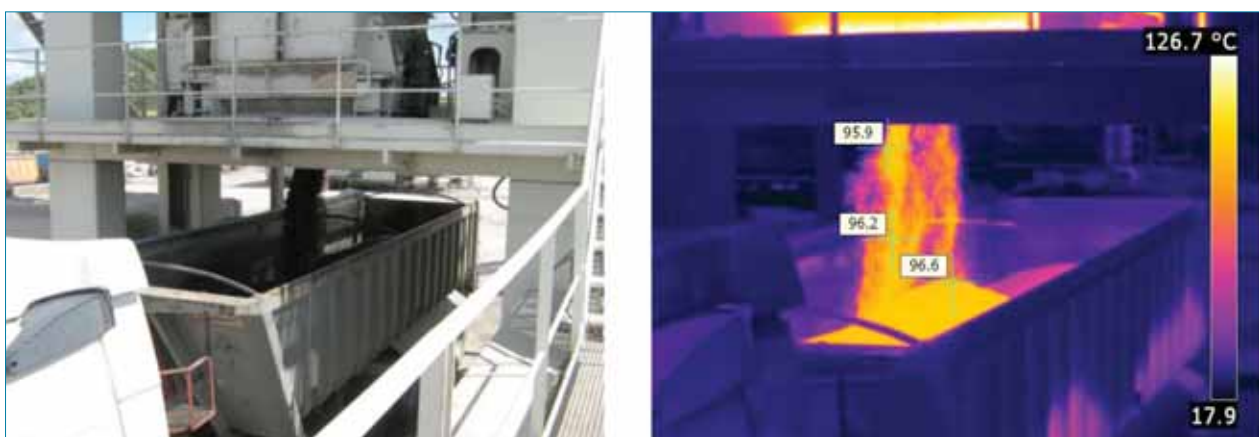


Figura 3. MBT: Termografía de la temperatura de la mezcla tomada durante el proceso de carga del camión.

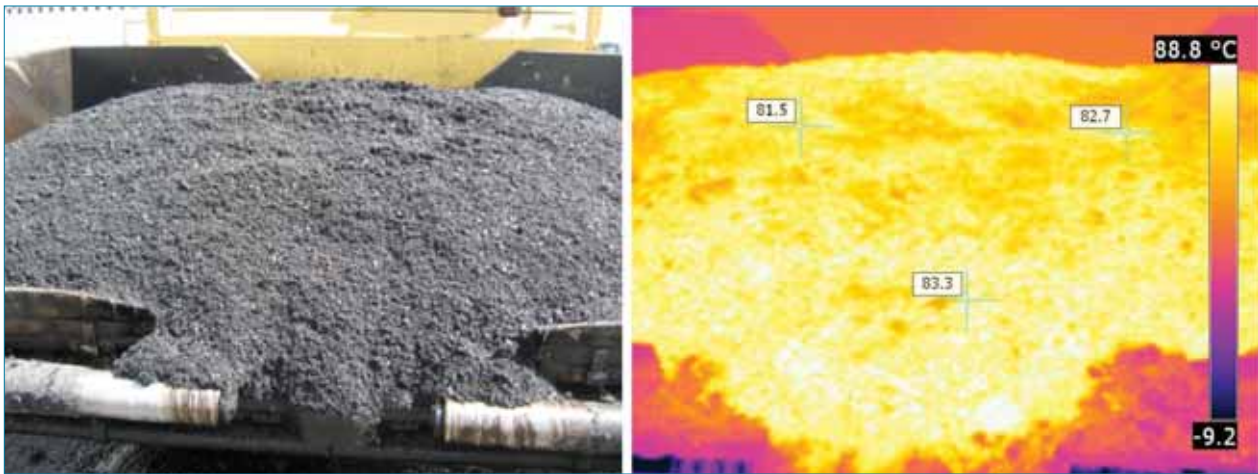


Figura 4. MBT: Termografía de la temperatura de la mezcla en la tolva de la extendidora.



Figura 5. MBT: Termografía de la temperatura de la mezcla en el sinfín de la extendidora.

temperatura de la mezcla templada, a su salida de planta, se encontraba en torno a los 90-100 °C (Figura 3). Las termografías presentadas corresponden a la capa de rodadura con la mezcla templada.

Las temperaturas de la mezcla templada, en el momento de la carga en la extendidora una vez llegada a obra, se encontraban entre 80 y 85 °C (Figura 4), existiendo una pérdida media de temperatura de unos 10 °C tras haber transcurrido, en algunos casos, hasta tres horas desde su fabricación.

La temperatura ambiente durante la puesta en obra fue de 12 °C con un día nublado sin lluvia para la capa base y de 15 °C para la capa de rodadura.

Una vez extendida la mezcla templada, ésta se encontraba en torno a los 70-80 °C (Figura 6). La temperatura de compactación, como se muestra en la imagen, se encontraba

en torno a los 60-70 °C durante el proceso de compactación (Figuras 7 y Figura 8).

3.2 Control de la unidad terminada: Densidades alcanzadas evaluadas sobre testigos

Los resultados obtenidos a partir de extracción de testigos por el laboratorio de la Dirección de Obra se presentan a continuación (Gráfica 1 y Gráfica 2). En ambas capas (base y rodadura), el grado de compactación obtenido en obra con respecto a la densidad Marshall de referencia fue superior al 98%, tanto para la mezcla caliente como para la templada. Esto pone de manifiesto que las mezclas templadas fabricadas con esta técnica no presentan desventajas respecto a las mezclas convencionales calientes en cuanto a alcanzar las

Experiencias con mezclas templadas en Jédula (Cádiz). Seguimiento del comportamiento estructural en el tiempo y evaluación ambiental con el eco-comparador SEVE



Figura 6. MBT: Termografía de la temperatura de la mezcla templada recién extendida.



Figura 7. MBT: Termografía de la temperatura de la mezcla durante la compactación con rodillo.

densidades de obra, pudiéndose abrir al tráfico en el mismo plazo que las mezclas calientes.

3.3 Control de deflexiones y módulos dinámicos en la fase de seguimiento

Como se ha indicado anteriormente, sobre el tramo de prueba ejecutado se ha realizado un programa de seguimiento de la capacidad portante del firme durante cuatro años mediante auscultación dinámica de las deflexiones por medio del Deflectómetro de Impacto Dynatest HWD 8081. Este seguimiento ha sido realizado por la UTE Euroconsult-GYA. Se han aplicado las condiciones de ensayo marcadas en el pliego ADAR de AOPJA (antes GIASA) de mayo de 2004, así como los coeficientes correctores de la deflexión por la humedad de la explanada y temperatura del pavimento, según

las correcciones establecidas en la norma 6.3-IC del Ministerio de Fomento.

Al objeto de analizar la evolución de la capacidad portante de los tramos, a continuación se presentan unas tablas y gráfica-resumen comparativas de los resultados obtenidos.

Analizando los valores obtenidos, se observa que las deflexiones en el carril izquierdo son siempre superiores a las obtenidas en el carril derecho, tanto en la mezcla en caliente como en la mezcla templada, lo que indica que la razón no hay que buscarla en la capa bituminosa, sino más bien en las capas inferiores. De hecho, en esta obra se dieron particularidades de drenaje de las capas inferiores que afectan más al carril izquierdo que al derecho y más en el tramo sobre el que posteriormente se había de extender la mezcla templada. Lo que sí se puede concluir es que, en ambos casos (mezcla en caliente y mezcla templada), las deflexiones obtenidas

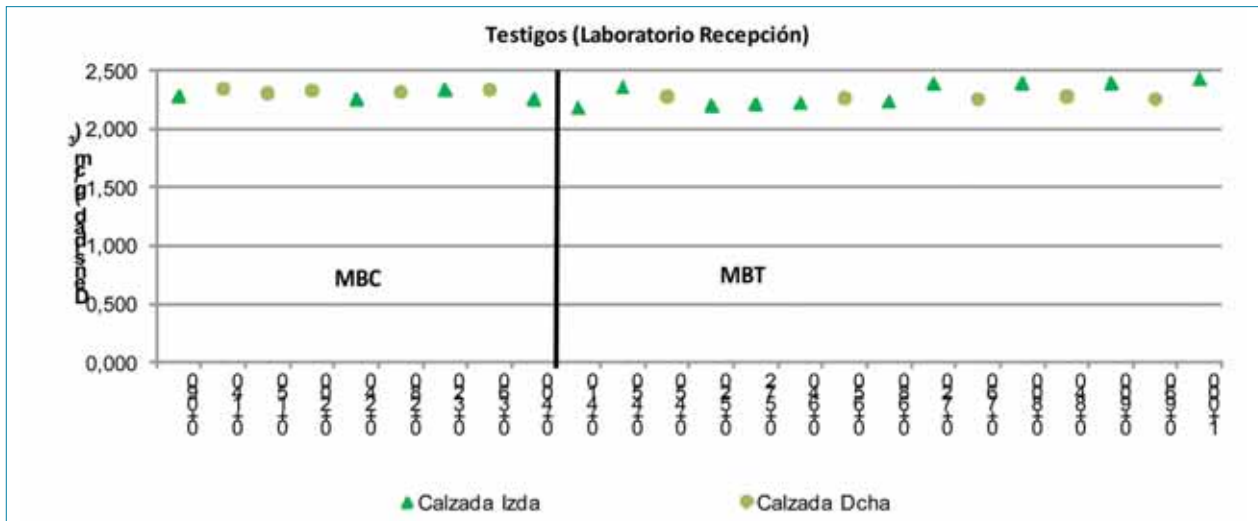


Figura 8. MBT: Termografía de la temperatura de la mezcla durante la compactación con neumáticos.

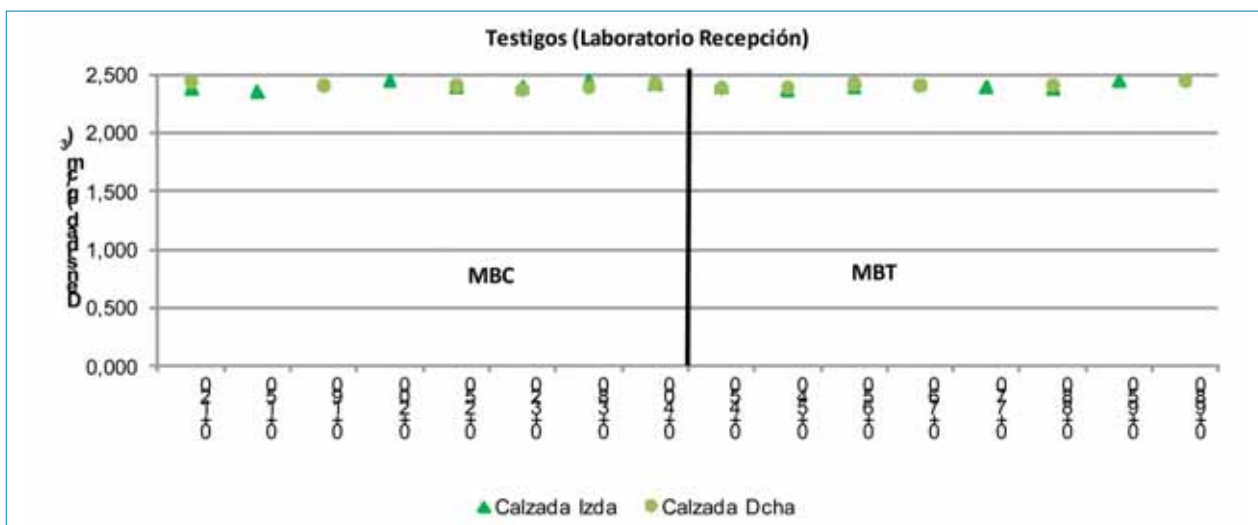
después de un seguimiento de cuatro años se encuentran muy por debajo de la máxima teórica permitida.

También se ha realizado en esta etapa de seguimiento una campaña de extracción de testigos de obra, en julio de 2012, para determinar el módulo de rigidez (UNE-EN 12697-26) a 15 y 20 °C de la mezcla extendida en rodadura y comparar los resultados obtenidos para la mezcla en caliente y para la templada. Los resultados a 20 °C se muestran en la Tabla 6.

A la vista de los resultados sobre testigos, se puede deducir que la mezcla templada es ligeramente más flexible que la mezcla en caliente.



Gráfica 1: AC22 BASE 35/50 G. Densidad de testigos. L. Recepción.



Gráfica 2: AC16 SURF 35/50 D. Densidad de testigos. L. Recepción.

Experiencias con mezclas templadas en Jédula (Cádiz).
Seguimiento del comportamiento estructural en el tiempo y evaluación ambiental con el eco-comparador SEVE

Tabla 2: Control ADAR. Deflexiones en carril derecho. MBC.

Fecha	Carril	pKi	pKf	Mezcla	DFLX media (mm/100)	Desviación típica	Variación (%)	Variación Total (%)
08-05-2009	Dcho.	0+000	0+400	MBC	27	5	-	
28-10-2009					21	4	-22,22	-22,22
12-11-2010					18	4	-14,28	-33,33
09-05-2011					21	2	16,66	-22,22
21-09-2011					22	4	4,76	18,52
16-03-2012					22	2	0,00	-18,52
17-09-2012					21	4	-4,55	-22,22

Tabla 3: Control ADAR. Deflexiones en carril izquierdo. MBC.

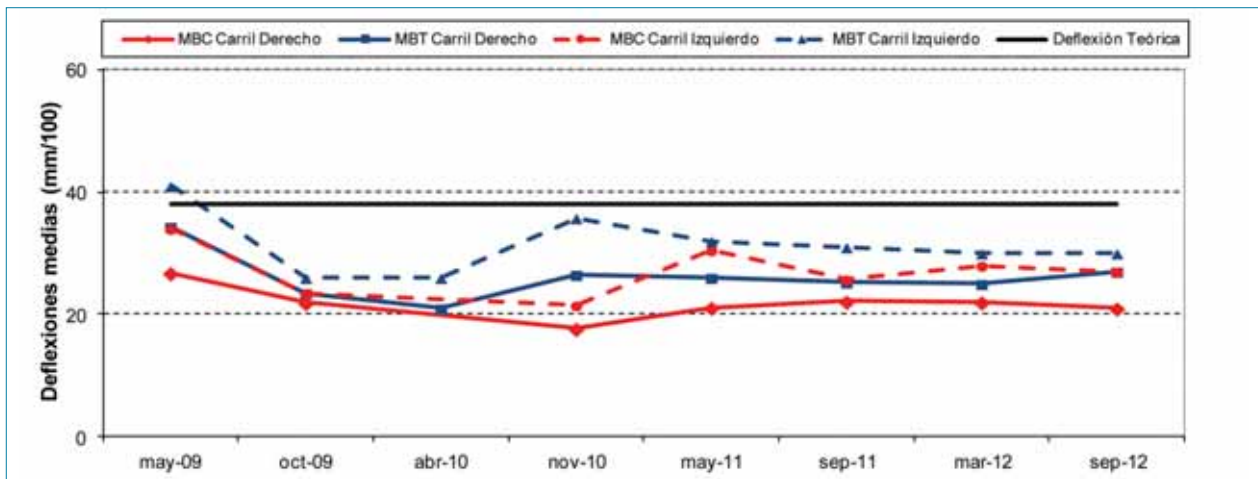
Fecha	Carril	pKi	pKf	Mezcla	DFLX media (mm/100)	Desviación típica	Variación (%)	Variación Total (%)
08-05-2009	Izdo.	0+400	0+000	MBC	34	7	-	
28-10-2009					23	3	-32,35	-32,35
12-11-2010					21	3	-8,69	-38,23
09-05-2011					30	6	42,85	-11,76
21-09-2011					26	5	-13,33	-23,53
16-03-2012					28	7	7,69	-17,56
17-09-2012					27	5	-3,57	-20,56

Tabla 4: Control ADAR. Deflexiones en carril derecho. MBT.

Fecha	Carril	pKi	pKf	Mezcla	DFLX media (mm/100)	Desviación típica	Variación (%)	Variación Total (%)
08-05-2009	Dcho.	0+400	1+000	MBT	34	4	-	
28-10-2009					23	4	-32,35	-32,35
26-04-2010					21	5	-8,69	-38,23
28-10-2010					27	6	28,57	-20,59
09-05-2011					26	4	-3,70	-23,52
21-09-2011					25	5	-3,85	-26,47
16-03-2012					25	4	0,00	-26,47
17-09-2012					27	4	8,00	-20,59

Tabla 5: Control ADAR. Deflexiones en carril izquierdo. MBT.

Fecha	Carril	pKi	pKf	Mezcla	DFLX media (mm/100)	Desviación típica	Variación (%)	Variación Total (%)
08-05-2009	Izdo.	1+000	0+400	MBT	41	13	-	
28-10-2009					26	5	-36,58	-36,58
26-04-2010					26	6	-0,00	-36,58
28-10-2010					36	9	38,46	-12,19
09-05-2011					32	6	-11,11	-21,95
21-09-2011					31	4	-3,12	-24,39
16-03-2012					30	4	-3,23	-26,83
17-09-2012					30	8	0,00	-26,83



Gráfica 3: Evolución de las deflexiones medias en los controles de auscultación dinámica de alto rendimiento (ADAR).

3.4 Evaluación ambiental con el eco-comparador SEVE

El eco-comparador SEVE (*Système d'évaluation des variantes environnementales*) fue desarrollado en el año 2010, en el marco de un acuerdo voluntario entre la Asociación de empresas constructoras de carreteras de Francia (USIRF), el Ministerio de Ecología y la Asamblea de municipios franceses. El objetivo era presentar evaluaciones ambientales en la fase de licitación de ofertas, basadas en un eco-comparador común, utilizado por todas las empresas.

Los indicadores ambientales se seleccionan de los establecidos en la norma francesa NF P 01-010. De todos los posibles, tiene en cuenta cuatro.



Como resultado final, este eco-comparador tiene en cuenta un análisis de ciclo de vida parcial, en el que sólo se considera la fase de construcción y no la de mantenimiento de la infraestructura ni la valorización al final de la vida útil.

El software SEVE está asociado a una base de datos de referencia para materiales, productos, maquinaria, plantas de

Experiencias con mezclas templadas en Jédula (Cádiz). Seguimiento del comportamiento estructural en el tiempo y evaluación ambiental con el eco-comparador SEVE

Tabla 6: AC16 SRUF 35/50 D. Rigidez sobre testigos.

Carril	Mezcla	pK	Rigidez (MPa)	Rigidez media (MPa)	
Dcho	MBC	0+150	11.260	12271	
		13.281	0+300		
	MBT	0+525	10.235	12314	
		0+650	11.728		
		0+800	12.753		
		0+900	14.541		
	Izdo	MBC	0+150	12.859	12675
			0+300	12.490	
MBT		0+525	15.563	12495	
		0+650	10.935		
		0+800	11.289		
		0+900	11.651		

fabricación, fórmulas de fabricación, etc., de acuerdo con los métodos constructivos y pliegos franceses y según las directrices de AFNOR contempladas en el documento FD P01-015, así como bases de datos de ciclo de vida reconocidas inter-

nacionalmente. Su software ha sido certificado por la entidad independiente Price Waterhouse como herramienta cualificada para la evaluación de ACV en la fase de construcción de carreteras.

La Figura 9 y la Figura 10 muestran el resultado obtenido al evaluar el consumo energético en MJ/t de las dos mezclas puestas en obra: AC22 G y AC16 D, tanto templada como en caliente. En el análisis, se han tenido en cuenta los costes ambientales, tanto de la fabricación de las materias primas como del transporte a la planta de aglomerado y de la fabricación en sí de la mezcla. Consideraciones que pueden hacerse de estas comparativas:

- El mayor coste ambiental en la obtención de materias primas, para el caso de la mezcla de rodadura, se debe al uso de cemento como filler de aportación. La mezcla templada tiene menor coste ambiental en esa fase, debido a que se introduce menos filler de aportación, ya que hay que contar con el filler que aporta la arena fría.
- El mayor coste energético y de emisiones de CO₂ en el transporte de materias primas, para el caso de la mezcla



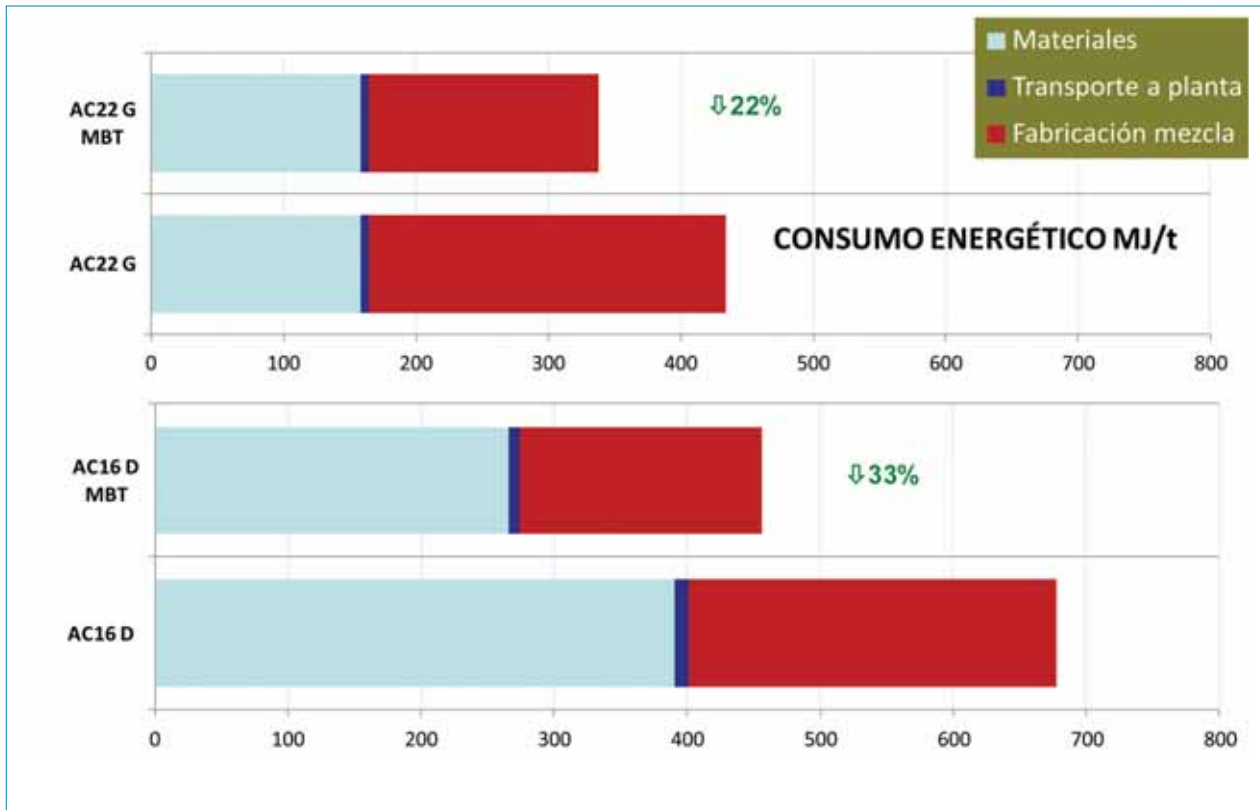


Figura 9: Comparativa entre MBT y MBC. Consumo energético (MJ/t mezcla).

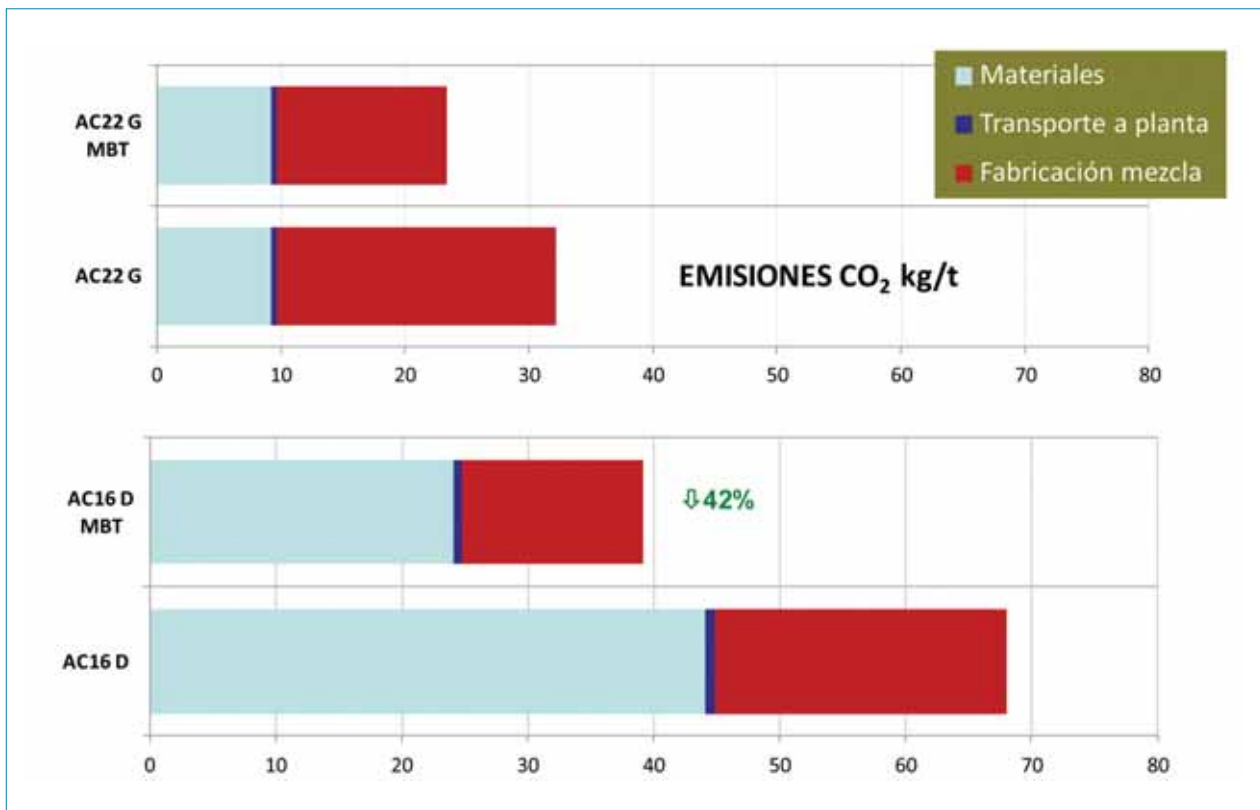


Figura 10: Comparativa entre MBT y MBC. Emisiones de CO₂ (kg/t mezcla).

Experiencias con mezclas templadas en Jédula (Cádiz). Seguimiento del comportamiento estructural en el tiempo y evaluación ambiental con el eco-comparador SEVE

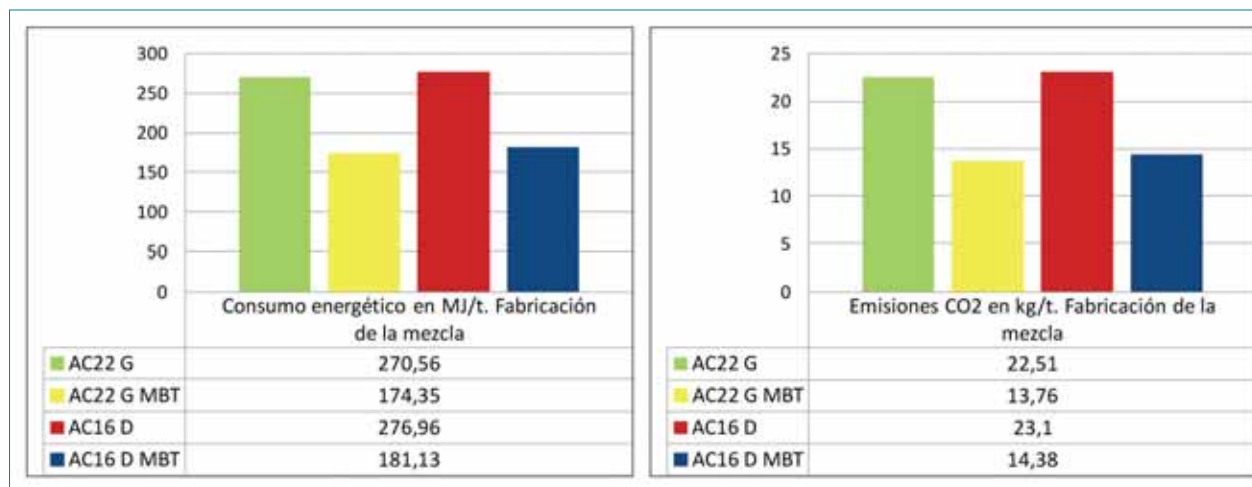


Figura 11: Costes ambientales en la etapa de fabricación (excluido obtención y transporte de materias primas).

de rodadura, se debe a que la planta de fabricación se encuentra en una cantera de caliza, con lo cual, para la mezcla AC22 G, no hay transporte de áridos (únicamente de betún). Sin embargo, en el caso de la mezcla AC16 D, además de contribuir el transporte de cemento, los áridos ofíticos son traídos de una cantera situada a 20 km.

- Por último, el ahorro en la etapa de fabricación de la mezcla se debe al uso de la arena fría.

De manera global, teniendo en cuenta las tres fases, el ahorro energético, en el caso de la mezcla para la capa de base, es de un 22%, mientras que para la capa de rodadura es de un 33%.

En cuanto al indicador ambiental de emisiones de CO₂, la diferencia global (teniendo en cuenta materiales, transporte y fabricación) entre la mezcla templada y la caliente, para el caso de la AC22, es de un 27%, mientras que para la AC16 es de un 42%. Aquí también se ve la importancia, en cuanto a coste ambiental, de utilizar el cemento como filler de aportación. Efecto que es mayor incluso que en el caso del consumo energético visto anteriormente.

En la Figura 11 se representan los costes ambientales en la etapa de fabricación (excluidos la obtención y el transporte de materias primas), los cuales están vinculados directamente al proceso de calentamiento de los materiales. En ese caso, el ahorro energético de las mezclas templadas es de un 35%, lo que está en consonancia con los datos que aparecen en bibliografía. La disminución de gases de efecto invernadero es de un 38%.

4. Conclusiones

Como se ha mostrado en este artículo, a través del proyecto de I+D ha sido posible demostrar la viabilidad para la fabricación de mezclas templadas a una temperatura de 100 °C, empleando betún como ligante y permitiendo la posibilidad de realizar la comparativa con la misma mezcla fabricada en caliente.

Analizando las diferentes fases que se han llevado a cabo dentro del proyecto, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

4.1 Fórmula de trabajo

- Se ha comprobado que la formulación de las mezclas templadas, en cuanto a los materiales y composición, con iguales granulometrías, es semejante al de la mezcla en caliente, con la única consideración en cuanto a la distribución de los porcentajes de arena que se va a introducir, bien como arena seca o húmeda, para conseguir la bajada de la temperatura.
- En la formulación completa de la mezcla templada, es objetivo la obtención de una humedad final de la mezcla de 0,5%, cantidad óptima para asegurar la manejabilidad de la mezcla así como los resultados finales esperados tras su puesta en obra.
- A la hora de la caracterización de las mezclas templadas, se aplican los mismos ensayos que para el caso de las mezclas en caliente, con algunas consideraciones, como son:

- Determinación del grado de humedad para tenerla en cuenta a la hora de la determinación exacta del contenido de ligante final de la mezcla.
- Empleo de la compactación giratoria en laboratorio para conseguir una compactación sobre la mezcla templada, de características semejantes a las mezclas en caliente.

4.2 Fabricación mezcla

- Las mezclas templadas desarrolladas en este proyecto pueden ser fabricadas en las mismas plantas que las empleadas para la fabricación de las mezclas en caliente, con algunas modificaciones, que corresponden a la colocación de una serie de dispositivos necesarios para la incorporación de la arena húmeda, así como para la dosificación de agua adicional que permita conseguir la humedad final establecida. En el caso de que la planta disponga de línea de reciclado, el coste de los dispositivos adicionales es muy bajo, ya que esa misma línea se aprovecha para la introducción y dosificación de la arena húmeda.
- Destacar que el proceso de fabricación se realiza de manera controlada durante todas sus fases, a través del estudio del balance térmico de todos los materiales que intervienen en el composición de la mezcla, y que corresponden a:
 - Temperatura de los áridos gruesos.
 - Temperatura del ligante.
 - Humedad de la arena en continuo durante todo el proceso de fabricación.
 - Granulometría de la arena en seco y en húmedo para el ajuste de los finos en la mezcla final.
 - Dosificación de la cantidad adicional de agua necesaria para conseguir la humedad final.
 - Tiempos de mezclado y secuencia de aporte de constituyentes de la mezcla durante la fabricación.
 - Sobre la mezcla fabricada, destaca la ausencia de humos de la mezcla, que se empieza a detectar desde la carga del camión.

4.3 Transporte y puesta en obra

- Las mezclas templadas presentan como ventaja en el transporte, frente a las mezclas en caliente, una menor pérdida de temperatura con respecto a la temperatura de

fabricación, permitiendo la posibilidad de realizar trayectos o tiempos más prolongados, presentando a su llegada a obra la manejabilidad necesaria para su puesta en obra.

- Otra ventaja que presentan las mezclas templadas es la eliminación del empleo de disolventes sobre la caja del camión, para evitar la adherencia de material, así como para la limpieza de los utensilios utilizados durante la puesta en obra.
- La puesta en obra se realiza con los mismos equipos que para las mezclas en caliente, extendedora y compactación de rodillo y neumáticos, consiguiendo alcanzar la densidad de la mezcla definida en la fórmula de trabajo, permitiendo, con ello, la apertura al tráfico una vez finalizada la puesta en obra.
- Destacar la mejora en la seguridad de los trabajadores, por un lado, por la ausencia de humos, así como al disminuir el riesgo de quemaduras durante el proceso de manipulación de la mezcla.

4.4 Comportamiento de la mezcla bituminosa

- El seguimiento realizado sobre el tramo de ensayo ha permitido comparar el comportamiento del mismo tipo de mezcla bituminosa, pero fabricada a diferentes temperaturas, siendo sometidas a las mismas sollicitaciones del tráfico.
- Los resultados obtenidos y presentados en este artículo han de ser evaluados teniendo en cuenta las condiciones del tramo de ensayo, una travesía, sobre todo en medidas de deflexiones y control ADAR. No obstante, a partir de los mismos, se pueden extraer las siguientes conclusiones:
 - Los valores de densidad determinados sobre testigos extraídos sobre el tramo de ensayo no muestran diferencias entre la mezcla en caliente y la mezcla templada, así como también en el grado de compactación y porcentaje de huecos.
 - En cuanto a la evolución de las deflexiones en el tiempo, se ha comprobado que, en ambos casos (mezcla caliente y templada), los valores obtenidos se encuentran muy por debajo de la máxima teórica permitida.
 - En cuanto a la rigidez de la mezcla, la mezcla templada resulta ser ligeramente más flexible que la mezcla en caliente.

Experiencias con mezclas templadas en Jédula (Cádiz). Seguimiento del comportamiento estructural en el tiempo y evaluación ambiental con el eco-comparador SEVE

4.5 Evaluación ambiental de la mezcla bituminosa

- A partir del eco-comparador SEVE, se ha demostrado la ventaja medioambiental de las mezclas templadas con betún en cuanto a emisiones de gases de efecto invernadero y consumo energético.

5. Agradecimientos

La realización de este Proyecto de I+D ha sido posible gracias a la contribución de las diferentes empresas y organismos públicos que han participado en el Proyecto, y que han sido presentadas en la Tabla 1 de este artículo.

6. Bibliografía

- Junta de Andalucía. Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para los controles de auscultación dinámica de alto rendimiento ADAR. 2004
- Ministerio de Fomento. Norma 6.3-IC. Rehabilitación de firmes. 2003.
- Miranda, L. Las mezclas templadas una respuesta a las necesidades actuales. III Jornada Técnica ASEFMA. Madrid, 2008
- Miranda, L. Comportamiento de las mezclas templadas en obra. Comparativa frente a una mezcla convencional. VIII Congreso Nacional de Firmes. Valladolid, 2008
- Miranda, L. Mezclas con arena húmeda. Jornada Capas Especiales de Rodadura. Madrid, 2008
- Olard, F.; Le Noan, C.; Romier, A. Miranda, L. Las mezclas a baja energía EBE® y baja temperatura EBT®. Revista Carreteras Nº 153. 2007
- USIRF. Presentation Eco-comparateur SEVE. 2010