

Ensayo español interlaboratorios de pista

JOSÉ O. MARRÓN FERNÁNDEZ (*), BALTASAR RUBIO GUZMÁN (*) y FRANCISCO J. PÉREZ AYUSO (*)

RESUMEN La modificación de los artículos 542 y 543 relativos a mezclas bituminosas en caliente del PG-3, mediante la Orden Circular 24/2008, introduce una serie de novedades para adaptar la normativa española a la serie de normas armonizadas europeas EN 13108. Entre las diversas modificaciones se incluye nuevos ensayos, y entre ellos el método para evaluar la susceptibilidad a las deformaciones plásticas. El dispositivo de ensayo establecido en nuestro país es el denominado procedimiento B en aire con dispositivo pequeño, indicándose que la compactación de las placas de ensayo debe realizarse con el dispositivo de rodillo de acero.

En este artículo, en primer lugar se revisan los métodos de compactación de las probetas de ensayo recogidos en la norma UNE-EN 12697-33, así como los métodos de ensayo europeos de resistencia a la deformación plástica recogidos en la norma UNE-EN 12697-22, justificando su elección e inclusión en nuestra normativa. Posteriormente se exponen y analizan los resultados de una serie de ensayos interlaboratorios, con objeto de armonizar los posibles sistemas de compactación de las probetas de ensayo y evaluar la precisión del método de ensayo de pista establecido en España.

SPANISH INTERLABORATORY TEST ON WHEEL TRACKING

ABSTRACT *The amendment of Articles 542 and 543 on the hot asphalt mixtures in PG-3, by Order Circular 24/2008, introduced a new series of modifications to adapt Spanish regulations to European standards series EN 13108. Among the various amendments there are new tests, including the method for assessing the susceptibility to plastic deformations. The test established in our country is the so-called B in air with a small device, indicating that compaction slabs must be done with the steel roller device.*

First of all, in this article has been reviewed the specimens compaction methods showed on the UNE-EN 12697-33 and the test methods for resistance to permanent deformation indicated in the UNE-EN 12697-22, justifying their choice and inclusion in our regulation. Following have been described and analyzed the results of a series of tests in order to harmonize the compaction systems and evaluate the accuracy of the wheel tracking test established in Spain.

Palabras clave: Mezcla bituminosa, Compactador de placas, Pista de laboratorio, Especificaciones, Ensayo interlaboratorios.

Keywords: Bituminous mixture, Roller compactor, Wheel tracking, Specification parameters, Interlaboratory test.

1. ANTECEDENTES

El 30 de Julio de 2008, la Orden Circular 24/2008 modifica los artículos 542 y 543 relativos a las mezclas bituminosas en caliente del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para obras de carreteras y puentes (PG-3) para adaptarlos a la nueva normativa europea, que había entrado en vigor en abril de ese mismo año.

Las novedades más destacables incluidas en esta revisión son las siguientes:

- Nueva nomenclatura de las mezclas para adaptarlas a la normativa europea, si bien se mantienen las mismas mezclas y sus características fundamentales.
- Nuevos métodos de compactación de probetas y nuevos métodos de ensayo para evaluar la sensibilidad al agua

y la resistencia a las deformaciones plásticas; así como los módulos y fatiga para las mezclas de alto módulo.

- Mejora de la calidad de los áridos para capas de rodadura y tráfico pesados.
- Inclusión de los betunes con adición de polvo de caucho.
- Considerar las mezclas drenantes en el artículo 543, que se denomina "Mezclas bituminosas para capas de rodadura. Mezclas drenantes y discontinuas".
- La posibilidad de mejoras económicas en capas de rodadura por el empleo de áridos con CPA superior al exigido o mejorar la regularidad superficial respecto a la especificada.

De estas novedades, una de las que ha supuesto un mayor esfuerzo, por parte de la Administración y Empresas fabricantes de mezclas bituminosas, ha sido sin duda el empleo de nuevos métodos de ensayo para caracterizar y controlar la calidad de las mezclas bituminosas, lo que lleva implícito el empleo de nuevos procedimientos de fabricación y compactación de las

(*) Centro de Estudios del Transporte (CEDEX).

probetas de ensayo. Entre estos métodos, la resistencia a las deformaciones plásticas es uno de los ensayos más importantes por nuestras condiciones climáticas y por nuestras especiales características orográficas y así lo recoge el PG-3 ya que este ensayo es obligatorio para el proyecto y establecimiento de fórmula de trabajo de todos los tipos de mezclas bituminosas aplicadas en cualquier posición (rodadura, intermedia o base), excepto en el caso de mezclas drenantes.

El PG-3 establece como método para la realización de este ensayo el dispositivo pequeño, procedimiento B en aire de la norma UNE-EN 12697-22 y una temperatura de ensayo de las probetas de 60°C. Respecto a la compactación de las probetas indica que debe realizarse de acuerdo a lo establecido en la norma UNE-EN 12697-33 con el dispositivo de rodillo de acero y la densidad obtenida será superior a 98% de la densidad de las probetas fabricadas por impacto según el método UNE-EN 12697-30 aplicando 75 golpes por cara en las mezclas tipo hormigón bituminoso y con 50 golpes por cara en las mezclas discontinuas. En el caso de que las mezclas tengan un tamaño nominal superior a 22 mm, las probetas serán fabricadas mediante compactación vibratoria según el método UNE-EN 12697-32 aplicando vibración durante 120 segundos por cara.

El PG-3 establece para evaluar la resistencia a las deformaciones plásticas la pendiente media de la deformación en el intervalo de 5000 a 1000 ciclos expresada en mm para 1000 ciclos de carga. Los umbrales de especificación se han establecido según la zona térmica estival y la categoría de tráfico pesado; además en las mezclas tipo hormigón bituminoso se establecen diferencias según la posición en el firme, existiendo diferentes umbrales para las mezclas empleadas como capa intermedia y rodadura o bien como capa base.

En este artículo, en primer lugar se revisan los métodos de compactación recogidos en la norma UNE-EN 12697-33 para la compactación de las probetas de ensayo, así como los métodos de ensayo europeos de resistencia a la deformación plástica recogidos en la norma UNE-EN 12697-22, indicando brevemente las características del ensayo y los procedimientos de compactación seleccionados, justificando su elección e inclusión en nuestra normativa. Posteriormente se exponen y analizan una serie de ensayos interlaboratorios, organizados por el Centro de Estudios del Transporte del CEDEX en colaboración con ASEFMA, que han tenido por objeto armonizar los posibles sistemas de compactación de las probetas de ensayo, evaluar la precisión del método de ensayo de pista establecido en España y determinar la repetibilidad y reproducibilidad de dicho método.

2. EL ENSAYO DE PISTA DE LABORATORIO EN LA NORMATIVA EUROPEA, UNE- EN 12697-22

El método de ensayo de pista descrito en la norma UNE-EN 12697-22 recoge el procedimiento de ensayo que debe seguirse para determinar la resistencia a la deformación plástica, mediante la acción de una rueda cargada, de una mezcla bituminosa fabricada en el laboratorio o procedente del pavimento.

En esta norma se contempla la posibilidad de utilizar tres dispositivos de ensayo para evaluar esta característica. Tanto el primero, denominado de gran tamaño, como el segundo extra grande emplean una rueda con neumático con aire, mientras que el tercero denominado de pequeño tamaño está equipado de una rueda con banda de rodadura de goma maciza, si bien en este último existe a su vez una subdivisión según que se ensayen las probetas al aire o sumergidas en agua. Además este método permite diferentes condiciones operativas de ensayo como la elección de la temperatura y la duración del ensayo.

El dispositivo de ensayo de tamaño pequeño (procedimiento B) en aire es el que se exige en el PG-3 para la realización del ensayo de pista de laboratorio, porque es muy similar al usado con anterioridad en la norma NLT-173, ya que tanto la máquina de ensayo (carretón con movimiento alternativo horizontal de vaivén) como el diámetro de la rueda de ensayo, la anchura, el espesor y la dureza de la goma de la banda de rodadura, el recorrido de la rueda sobre la probeta, etc. son iguales en ambos métodos; pero sin embargo difieren en la magnitud de la carga aplicada y en la frecuencia del movimiento de vaivén, lo que afecta al resultado del ensayo. Como la norma europea relativa a ensayos de tipo (UNE-EN 13108-20) en el anejo D.6 explicita que para el procedimiento de dispositivo pequeño (procedimiento B) en aire, la temperatura de ensayo puede ser 45°C, 50°C ó 60°C, lógicamente se ha seleccionado la temperatura de 60°C por nuestro clima y por concordancia con la temperatura utilizada en el método anterior. El ensayo finaliza a los 10.000 ciclos de carga (aproximadamente 370 min) o cuando la deformación total alcance los 20 mm.

A continuación se indican las características fundamentales de dicho ensayo:

- Dispositivo: pequeño, procedimiento B ensayo en aire.
- Dimensiones de las probetas: 260 mm x 320 mm; espesor variable.
- Carga aplicada: 700 N.
- Frecuencia rodada: 26,5 ciclos/min.
- Temperatura: 60°C.
- Duración: 10.000 ciclos.

En la Figura 1 se muestra una fotografía del dispositivo de ensayo.

Como resultado del ensayo se determina, a partir de la curva de deformación-tiempo, la pendiente media del ensayo en pista (WTS_{air}) entre los ciclos 5.000 y 10.000, y se expresa en mm por 1000 ciclos de carga. También se determina la deformación de la rodadura, en mm, así como el porcentaje de deformación de la rodadura (PRD_{air}), expresada como porcentaje de deformación total respecto al espesor de la probeta. En el PG-3 para evaluar la resistencia a la deformación plástica se exige la pendiente media de deformación (mm/1000 ciclos) por considerarse que este parámetro es el que mejor define esta característica.

3. ELABORACIÓN DE PROBETAS MEDIANTE COMPACTADOR DE PLACA, UNE-EN 12697-33

La compactación de las probetas en forma de paralelepípedo (placas) de mezcla bituminosa se debe realizar aplicando una carga mediante un rodillo de acero o por ruedas neumáticas, haciendo pasadas a velocidad constante paralelamente al eje de la placa. Este procedimiento es aplicable a mezclas bituminosas fabricadas en laboratorio o en central de fabricación, para ensayarlas directamente en el ensayo de pista o bien para cortar probetas para otros ensayos como es el de fatiga.

En este método se recogen a su vez tres procedimientos posibles de compactación: con una o dos ruedas neumáticas, con rodillo de acero, o con placas verticales deslizantes. El método con rodillo de acero tiene a su vez una variante cuando se equipa con neumático, y además cada uno tiene dos posibilidades de compactación, bien con energía controlada o hasta que se alcance un volumen determinado y por consiguiente un determinado porcentaje de huecos. Para compactar con energía especificada se aplica una carga constante y se compacta hasta alcanzar el número requerido de pasadas; mientras que para compactar con energía controlada, según un plan de compactación, se aplican una precarga y una carga progresiva que au-



FIGURA 1. Dispositivo pequeño para ensayo en pista.



FIGURA 2. Dispositivo de compactación mediante rodillo de acero.

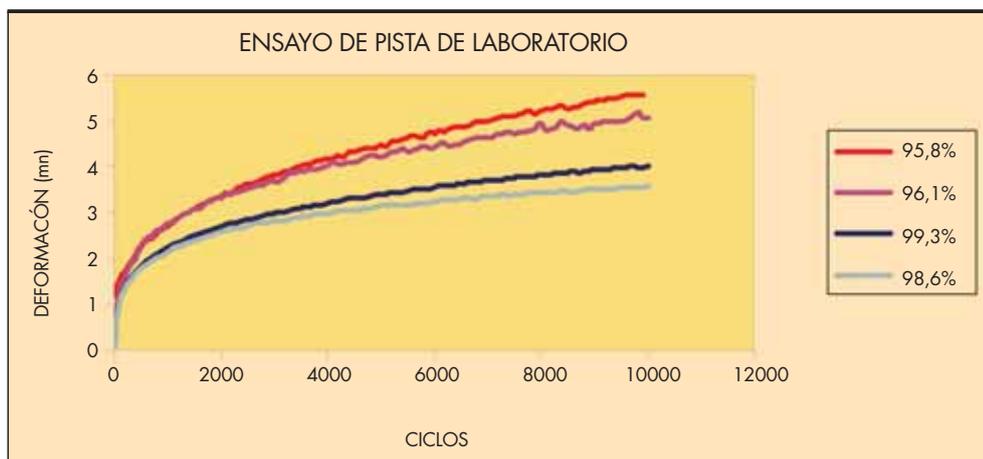


FIGURA 3. Influencia del grado de compactación en el ensayo de pista.

menta después de cada pasada. Para obtener un contenido de huecos o porcentaje de compactación deseada se pueden emplear los dos métodos anteriores, es decir energía constante mediante aplicación de una carga fija o energía controlada aplicando cargas progresivas hasta que se alcance el espesor deseado de la probeta.

Dado el tamaño de las probetas del dispositivo en aire de la norma europea de pista, UNE-EN 12697-22, que es el método especificado en el PG-3, el dispositivo con ruedas neumáticas no es adecuado y por la posible dificultad de ejecución se debería descartar el rodillo con placas verticales deslizantes. En consecuencia la compactación en España se debe realizar con un compactador de placas de rodillo de acero.

En el mercado se dispone de diferentes compactadoras de placas conformes a la norma UNE-EN 12697-33, que trabajan aplicando escalones de carga o bien con programas que permiten controlar tanto la carga ejercida por el sector como su posición o altura de la probeta. En la figura 2 se muestran unas fotografías de uno de los compactadores existentes en el mercado.

El método permite dos posibilidades de compactación, bien con energía controlada o hasta que se alcance un volumen determinado y por consiguiente un determinado porcentaje de huecos. Para la primera opción se necesitaba experiencia para establecer las cargas que debe aplicar el sector y el número de pasadas, y al no disponer de ella se consideró que era mejor compactar hasta que se alcanzase un grado de compactación determinado mediante aplicación de una carga fija o energía controlada aplicando cargas progresivas hasta que se alcance el espesor deseado de la probeta.

Se ensayaron probetas con diferentes grados de compactación, y se observó que el resultado del ensayo de pista no variaba significativamente cuando se alcanzaba una densidad similar a la obtenida para la misma mezcla por impacto, tal como se muestra en la Figura 3.

En consecuencia se estableció que las probetas de ensayo se debían fabricar mediante el compactador de placas con el dispositivo de rodillo de acero, descrito en la norma UNE-EN 12697-33, obteniéndose una densidad de las probetas superior al 98% de la densidad obtenida con la misma mezcla fabricada según el método UNE-EN 12697-30, aplicando 75 golpes por cara, si el tamaño nominal de la mezcla D es igual o inferior a 22mm. Si las mezclas tienen un tamaño nominal D superior a 22 mm se deberá obtener una densidad superior al 98% de la densidad que se alcanza siguiendo el método de compactación vibratoria UNE-EN 12697-32, aplicando un tiempo total de compactación de 120 segundos por cara.

4. MATERIALES

Para la realización de este estudio, se han utilizado 6 mezclas bituminosas comerciales de uso habitual en España fabricadas en plantas asfálticas. Cinco de ellas son mezclas tipo hormigón bituminoso AC tanto densas como semidensas y la restante es una mezcla discontinua tipo BBTM A. Los ligantes empleados en la fabricación de estas mezclas fueron betunes B 50/70, excepto la mezcla BBTM A que se fabricó con betún modificado BM-3c.

5. ENSAYOS PREVIOS. PUESTA A PUNTO DEL MÉTODO DE COMPACTACIÓN

Como fase previa e imprescindible para realizar el ensayo interlaboratorios de pista de laboratorio, fue necesario tratar de definir las condiciones de compactación de las probetas para su ensayo.

En la actualidad existen diferentes compactadoras de placas para fabricar probetas prismáticas según la norma UNE-EN 12697-33. Todas disponen de un sector de rodillo que permite aplicar fuerzas de magnitud variables sobre la mezcla bituminosa, dispuesta en un molde metálico que tiene un movimiento de vaivén. Aunque los sistemas de compactación de estos equipos son diferentes, podrían establecerse dos tipos. El primero, que denominaremos A, se corresponde a sistemas que aplican escalones de carga (posibilidad de aplicar 4 cargas con determinadas pasadas hasta máximo de 38 kN), pudiéndose controlar el proceso de compactación mediante la energía de compactación, estableciendo un número determinado de diferentes niveles de carga o bien estableciendo niveles de carga hasta que se alcance una altura predefinida en la probeta. En el segundo tipo de compactadores, que denominaremos B, se pueden controlar, mediante un sistema de control carga-desplazamiento accionado electrónicamente, tanto la posición del sector y de forma indirecta el espesor de la probeta como la carga ejercida, pudiéndose establecerse diferentes programas variando la carga (hasta un máximo 30 kN) o bien el desplazamiento del sector, y finalizar la compactación bien cuando se aplique un determinado número de pasadas o cuando se alcance una altura final predefinida y por tanto la densidad requerida.

Teniendo en cuenta los compactadores de placas existentes y la exigencia de la normativa española, que establece que las densidades de las probetas a ensayar tengan como mínimo un 98% de la densidad de referencia, se propusieron dos procedimientos de compactación para cada tipo de compactadores.

PROCEDIMIENTO PARA LOS COMPACTADORES TIPO A:

Con este tipo de compactadores se seleccionó el procedimiento basado en la experiencia británica y recomendado por el fabricante, si bien se decidió que actuase el limitador de espesor de la probeta por si se alcanzaba el porcentaje de densidad requerida antes de finalizar el programa de compactación:

1. Realizar 4 pasadas a 10 kN.
2. Realizar 4 pasadas a 20 kN.
3. Realizar 4 pasadas a 30 kN.
4. Realizar 4 pasadas a 35 kN.

PROCEDIMIENTO PARA LOS COMPACTADORES TIPO B:

Con estos compactadores es importante realizar primero un alisado de la mezcla mediante una ligera precompactación, así como el precalentamiento tanto del sector como del molde (mínimo a 120°C) y una vez finalizado el paso de compactación realizar una descarga progresiva. El procedimiento aplicado consta de tres etapas:

- Precompactación: El sector se posiciona sobre la probeta bajando a una velocidad de 2 mm/s hasta alcanzar una carga de 0,5 kN. Continúa bajando a 0,5 mm por pasada con una velocidad de 2 mm/s hasta que alcanza 2,6 kN de carga. Realiza 7 pasadas de rodillo en esta posición; descarga elevando el rodillo a 0,5 mm por pasada; a continuación baja nuevamente el rodillo y realiza 15 pasadas con una carga constante de 0,5 kN.

- Compactación: Se realiza la compactación con deformación controlada hasta que la probeta tenga la altura deseada. La bajada del sector se realiza a una velocidad de 1 mm/s y descendiendo 0,4 mm por pasada, de forma que la compactación se detenga cuando se alcance el espesor requerido. El número de pasadas se limitó a 50 y el límite de carga se estableció en 30 kN. Si con 0,4 mm por pasada no se pudiera compactar (se alcanzase 30 kN que es la carga máxima de la máquina) deberá reducirse la velocidad de descenso (mm por pasada) del sector.
- Descarga: Se produce la descarga con control de carga disminuyendo progresivamente dicha carga a razón de 1,3 kN/pasada.

Para la realización de los ensayos de compactación se suministraron mezclas bituminosas tipo denso AC 16D y semidenso AC 22S procedentes de central de fabricación a cada uno de los 7 laboratorios participantes (CAMPEZO, ELSAN, SORIGUÉ, EIFFAGE, INTROMAC, CEMOSA y CEDEX). La empresa EIFFAGE suministró las muestras de planta de fabricación. Las muestras de mezcla bituminosa se calentaron en estufa a 155°C durante 120 minutos y la cantidad de muestra a compactar se determinó en función del volumen del molde y de la densidad de referencia que fue suministrada por el fabricante de la mezcla. Al día siguiente se determinó la densidad de las probetas por el método de la superficie saturada seca y posteriormente, dos días después de compactar, se procedió a su ensayo de acuerdo con el método UNE-EN 12697-22.

Los resultados obtenidos se indican en la tabla 1.

Mezcla AC 16D Densidad referencia=2367 kg/m ³									
	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	Media	Desv. Típ.
Mét. Compactación	B	B	B	B	A		B		
Densidad, kg/m ³	2357	2356	2338	2333	2373	2381	2382	2360	18
Grado compactación, %	99.6	99.5	98.8	98.6	100.2	100.6	100.6	99.7	
Altura, mm	4.1	4	4.2	4.2	4	4	4	4.1	0.1
Ensayo									
RD, mm	5.4	4.6	8.1	5.4	4.5	5.3		5.5	1.2
WTS _{AIR} , mm/10 ³ ciclos	0.224	0.199	0.527	0.328	0.195	0.253		0.288	0.116
PRD _{AIR} , %	13.2	11.4	19.3	12.9	11.3	13.4		13.6	2.7
Mezcla AC 22S Densidad referencia=2366 kg/m ³									
	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	Media	Desv. Típ.
Mét. Compactación	B	B	B	B	A		B		
Densidad, kg/m ³	2342	2319	2327	2326	2385	2382	2362	2349	25
Grado compactación, %	99	98	98.4	98.3	100.8	100.7	99.8	99.3	
Altura, mm	6.2	6.3	6.3	6.3	6	6	6	6.2	0.1
Ensayo									
RD, mm	3.6	6.1	6.7	5.7	5.0	4.7		5.3	1.0
WTS _{AIR} , mm/10 ³ ciclos	0.103	0.285	0.263	0.251	0.178	0.208		0.215	0.061
PRD _{AIR} , %	5.9	9.8	10.6	9.1	8.3	7.9		8.6	1.5

TABLA 1. Resultados obtenidos en primer ensayo previo.

El laboratorio L7 no pudo ensayar las probetas por no disponer de la máquina de ensayo en pista y el L6 no siguió el método de compactación propuesto en el protocolo.

Durante la compactación de las mezclas algunos laboratorios tuvieron problemas con el método de compactación B, porque se alcanzaba el límite de carga de la compactadora y tuvieron que modificar el procedimiento para compactar las probetas.

En todos los casos se consiguió alcanzar un grado de compactación superior al 98% de la densidad de referencia y en general se constata que la velocidad de deformación WTS disminuye a medida que aumenta el grado de compactación alcanzado.

Los resultados del ensayo en pista de las dos mezclas denotan una resistencia a las deformaciones plásticas mediocre, que fue atribuida a falta de compactación por un error en la densidad de referencia, ya que a posteriori se remoldaron y compactaron probetas de las dos mezclas bituminosas mediante 75 impactos por cara y se comprobó que las densidades de referencia utilizadas eran inferiores a las reales. Esta hipótesis fue corroborada al verificar que el número de pasadas del sector y la carga alcanzada en el proceso de compactación era inferior al de mezclas del mismo tipo con características similares.

Para soslayar los problemas de exceso de carga acaecidos en este primer ensayo con el método B, se decidió cambiar la compactación de este procedimiento y que la bajada del sector se produjera con control de carga, aumentándola de forma progresiva sin llegar al límite establecido por la compactadora y finalizando la compactación cuando se alcanzase la altura deseada. En consecuencia en este segundo ensayo previo se empleó el mismo procedimiento para los compactadores tipo A y se modificó el procedimiento para los compactadores tipo B en la etapa de compactación. La precompactación y la descarga no se modificaron. A continuación se indica la etapa de compactación:

- Compactación. Se realiza con control de la carga, aumentando la carga 1,5 kN por pasada hasta alcanzar

22,5 kN en 15 pasadas y a continuación se mantiene dicha carga hasta que se alcanza el espesor deseado de la probeta.

En la figura 4 se representan las cargas aplicadas para compactar con ambos procedimientos.

Con estos procedimientos y con dos mezclas del mismo tipo se compactaron probetas y se ensayaron de forma similar a como se hizo con el anterior ensayo.

Intervinieron 10 laboratorios, los 7 anteriores y además los laboratorios de la JUNTA DE CASTILLA Y LEÓN, CIESM y ORSA. La empresa SORIGUÉ suministró las muestras, que también procedían de una planta industrial de fabricación.

Los resultados obtenidos se recogen a continuación en la tabla 2.

De estos resultados se deduce que los tres parámetros del ensayo en pista (WTS, RD y PRD) de estas mezclas son sensiblemente inferiores a las obtenidas en el ensayo anterior pese a ser muy similares, lo que denota una mejor resistencia a las deformaciones plásticas y parece confirmar la falta de una compactación adecuada de las mezclas del primer ensayo.

Con estos procedimientos de compactación con control de carga no hubo ningún problema, si bien en el caso de L6 no se alcanzó el grado de compactación requerido, posiblemente por algún error en la determinación de densidades, ya que los espesores de las probetas fabricadas son los menores valores obtenidos para ambas mezclas. Como consecuencia no se mejoró la dispersión en las densidades.

Aunque sólo uno de los participantes empleó el procedimiento A, los valores de WTS de este laboratorio son similares a la media y no parece que haya diferencias muy significativas entre ambos métodos de compactación. Este ensayo contribuyó, además, a la puesta a punto de los compactadores y de los equipos de ensayo de determinación de la resistencia a las deformaciones plásticas y a la mejora del adiestramiento de los técnicos con los citados equipos.

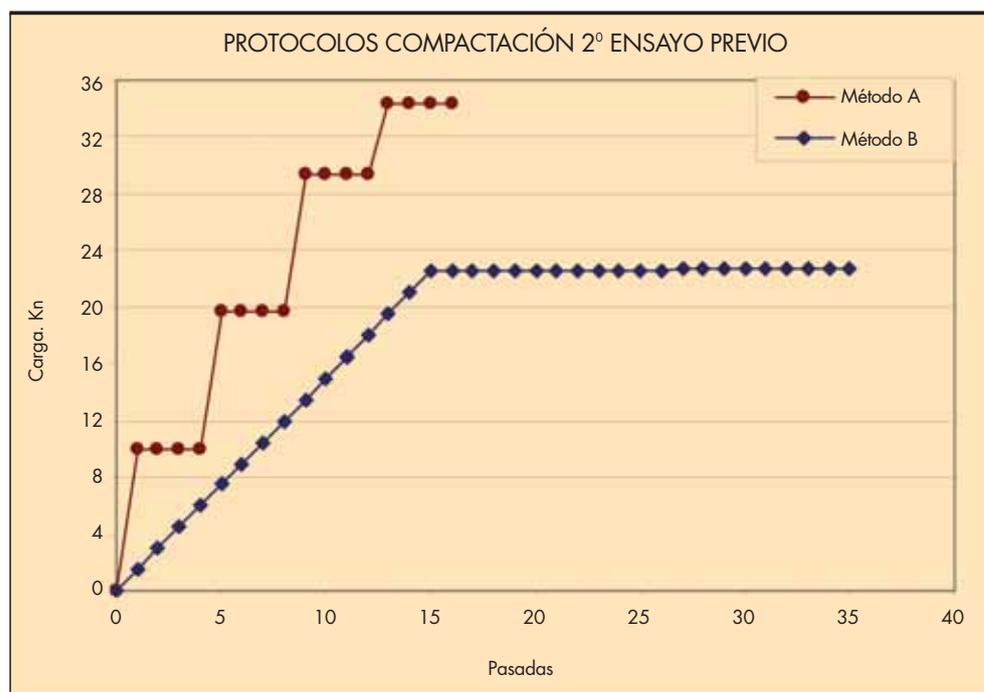


FIGURA 4. Métodos de compactación propuestos en el segundo ensayo previo.

Mezcla AC 16D Densidad referencia=2427 kg/m ³												
	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	L10	Media	Desv. Tip.
Mét. Compactación	B	B		B	B	B	B		A	B		
Densidad, kg/m ³	2434	2436	2404	2403	2404	2345	2424	2410	2441	2397	2410	26
Grado compactación, %	100.3	100.4	99.0	99.0	99.1	96.6	99.9	99.3	100.6	98.7	99.3	
Altura, mm	4.1	4.1	4.1	4.2	4.2	3.9	4.0	4.1	4.1	4.1	4.1	0.1
Ensayo												
RD, mm	1.3	1.9	2.7	2.2	2.6	1.6	2.0	1.8	3.1	2.3	2.1	0.5
WTS _{AIR} , mm/10 ³ ciclos	0.030	0.035	0.131	0.096	0.114	0.064	0.062	0.120	0.096	0.069	0.082	0.033
PRD _{AIR} , %	3.1	4.6	6.6	5.4	6.1	4.2	4.9	4.4	7.8	5.8	5.3	1.3
Mezcla AC 22S Densidad referencia=2444 kg/m ³												
	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	L10	Media	Desv. Tip.
Mét. Compactación	B	B		B	B	B	B		A	B		
Densidad, kg/m ³	2445	2441	2411	2414	2430	2367	2454	2449	2439	2378	2423	29
Grado compactación, %	100.0	99.9	98.6	98.8	99.4	96.8	100.4	100.2	99.8	97.3	99.1	
Altura, mm	6.1	6.1	6.2	6.3	6.2	5.9	6.0	6.0	6.0	6.2	6.1	0.1
Ensayo												
RD, mm	1.4	2.6	2.3	3.0	2.1	3.5	2.7	4.6	3.9	1.9	2.8	0.9
WTS _{AIR} , mm/10 ³ ciclos	0.077	0.040	0.113	0.086	0.053	0.125	0.083	0.070	0.072	0.094	0.081	0.024
PRD _{AIR} , %	2.3	4.2	3.7	4.7	3.4	5.9	4.5	7.7	6.5	3.1	4.6	1.6

TABLA 2. Resultados obtenidos en segundo ensayo previo.

6. ENSAYO INTERLABORATORIOS DE PISTA

Una vez realizados los ensayos reseñados, se consideró conveniente realizar un ensayo interlaboratorios para determinar la precisión del ensayo de pista. Intervinieron 14 laboratorios, los 10 anteriores y además los laboratorios de la DIPUTACIÓN DE ÁLAVA, EUROCONSULT, REPSOL y LUBASA. CAMPEZO fue la empresa encargada de suministrar muestras de mezcla bituminosa tipo AC 22S y BBTM 11A, fabricadas en sus instalaciones industriales.

Para ello se realizó un protocolo de ensayo en el que se definieron las variables para el calentamiento, compactación de las probetas y ensayo de las mismas. Las muestras de mezcla bituminosa se calentaron en estufa de aire forzado a 155°C durante 120 minutos y la cantidad de muestra a compactar se determinó en función del volumen del molde y de la densidad de referencia que fue suministrada por el fabricante de la mezcla. Al día siguiente se determinó la altura y la densidad aparente de las probetas por el método de la superficie saturada seca. Posteriormente, dos días después de compactar, se procedió a aclimatar las probetas a 60°C durante 4 horas y realizar el ensayo de acuerdo con el procedimiento pequeño al aire del método UNE-EN 12697-22.

Respecto a la compactación, como el procedimiento para los compactadores tipo A aplicaban niveles de carga superiores a las establecidas para los compactadores tipo B, se definieron dos nuevos procedimientos de compactación que proporcionasen niveles de carga semejantes, tal como que se indican a continuación:

PROCEDIMIENTO PARA LOS COMPACTADORES TIPO A:

Similar al utilizado en los ensayos previos; pero aumentando el número de pasadas y reduciendo los niveles de carga de la tercera y cuarta etapa.

- Realizar 9 pasadas a 10 kN.
- Realizar 10 pasadas a 20 kN.
- Realizar 10 pasadas a 25 kN.
- Realizar 5 pasadas a 30 kN.

Cuando se alcanza el espesor deseado de la probeta se termina el proceso de compactación.

PROCEDIMIENTO PARA LOS COMPACTADORES TIPO B:

Los pasos de precompactación y descarga no se modificaron respecto a los ensayos previos.

- Compactación: Se realiza con control de la carga, aumentando la carga 1,5 kN por pasada hasta alcanzar 10,5 kN y una vez alcanzada esta carga se dan 4 pasadas más. A continuación se continúa aumentando la carga 1,5 kN por pasada hasta alcanzar 19,5 kN y se dan 9 pasadas con esta carga. Finalmente se continúa aumentando la carga 1,5 kN por pasada hasta alcanzar 25,5 kN y se dan 9 pasadas con esta carga.

Durante este proceso cuando se alcanza el espesor deseado de la probeta se interrumpe la compactación y comienza la descarga.

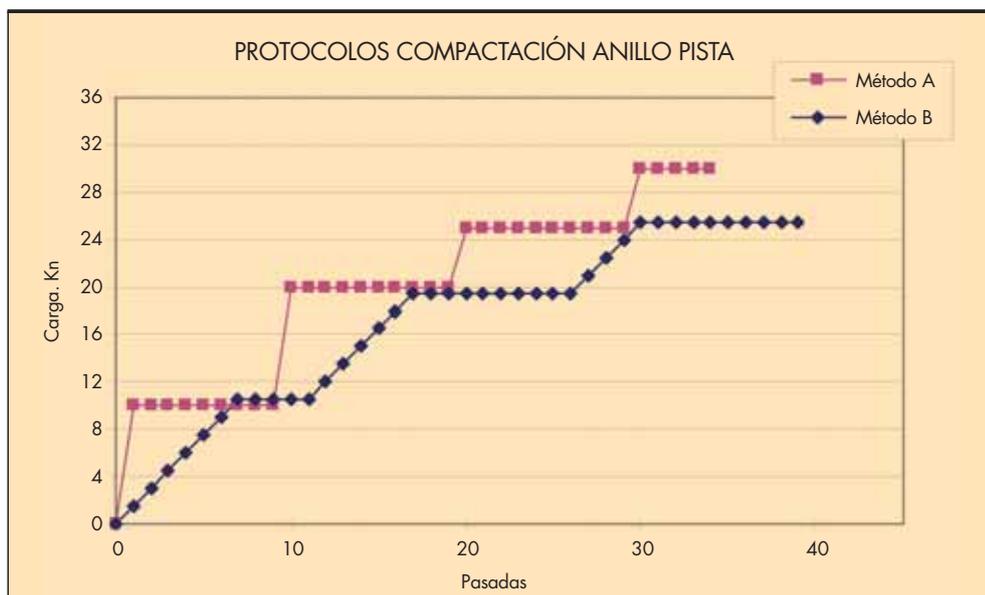


FIGURA 5. Métodos de compactación propuestos en el análisis de anillo.

En la figura 5 se representan las cargas aplicadas para compactar con cada uno de los procedimientos. Los resultados individuales de los ensayos de pista obteni-

dos por cada laboratorio con las mezclas bituminosas indicadas anteriormente se recogen a continuación en las tablas 3 y 4, y los valores medios en la tabla 5.

	Lab 2		Lab 3		Lab 4		Lab 5		Lab 6		Lab 7	
Densidad, kg/m ³	2420	2424	2451	2441	2461	2456	2451	2454	2419	2418	2417	2405
RD, mm	1.5	1.4	1.3	1.2	1.8	2.0	1.1	1.2	1.4	1.2	1.5	1.6
WTS _{AIRv} , mm/10 ³ ciclos	0.028	0.024	0.037	0.035	0.035	0.036	0.018	0.020	0.016	0.014	0.060	0.055
PRD, %	3.7	3.5	3.1	3.0	4.6	5.1	2.7	3.0	3.6	3.1	3.8	4.0
	Lab 10		Lab 11		Lab 12		Lab 13		Lab 14			
Densidad, kg/m ³	2458	2457	2337	2332	2425	2420	2410	2413	2465	2469		
RD, mm	1.4	1.5	2,4*	3,0*	1.3	1.6	1.8	1.7	1.3	1.3		
WTS _{AIRv} , mm/10 ³ ciclos	0.028	0.022	0.149	0.140	0.032	0.039	0.047	0.033	0.030	0.023		
PRD, %	3.5	3.7	6,0*	7,5*	3.3	4.0	4.6	4.2	3.3	3.3		

TABLA 3. Datos individuales de mezcla BBTM 11A.

	Lab 1		Lab 2		Lab 3		Lab 4		Lab 5		Lab 7	
Densidad, kg/m ³	2457	2464	2435	2467	2464	2476	2484	2489	2489	2476	2474	2480
RD, mm	3.1	3.4	2.4	2.1	2.0	2.1	2.8	2.6	2.0	0.7	2.0	2.6
WTS _{AIRv} , mm/10 ³ ciclos	0.087	0.093	0.055	0.040	0.061	0.068	0.065	0.047	0.030	0.029	0.111	0.111
PRD, %	5.0	5.5	3.9	3.4	3.4	3.6	4.6	4.3	3.3	1.1	3.3	4.3
	Lab 10		Lab 11		Lab 12		Lab 13		Lab 14			
Densidad, kg/m ³	2498	2503	2432	2449	2480	2475	2458	2453	2493	2499		
RD, mm	2.5	2.4	2.0	2.2	2.0	1.7	2.7	1.9	2.7	2.8		
WTS _{AIRv} , mm/10 ³ ciclos	0.073	0.043	0.066	0.059	0.036	0.034	0.057	0.036	0.081	0.054		
PRD, %	4.2	3.9	3.3	3.7	3.3	2.9	4.5	3.1	4.5	4.6		

TABLA 4. Datos individuales de mezcla AC 22S.

Mezcla BBTM11A		dens. refer. =2414 kg/m ³													
	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	L10	L11	L12	L13	L14	Media
Mét. Compactación		B	B	B	B	B	B	A	A		A	A		B	
Densidad, kg/m ³	2394	2422	2446	2459	2453	2419	2411	2388	2410	2458	2335	2423	2412	2467	2421
Grado compactación, %	99.2	100.3	101.3	101.8	101.6	100.2	99.9	98.9	99.8	101.8	96.7	100.4	99.9	102.2	100.3
Altura, mm	37.3	40.7	40.0	39.9	40.6	40.3	40.0	40.0	39.8	40.1	40.5	40.0	40.1	39.3	39.9
Ensayo															
RD, mm	2.2	1.5	1.2	1.9	1.2	1.3	1.5	1.8	2.4	1.4	2.7	1.5	1.8	1.3	1.7
WTS _{AIR} , mm/10 ³ ciclos	0.030	0.026	0.036	0.036	0.019	0.015	0.058	0.046	0.077	0.025	0.145**	0.036	0.040	0.027	0.036
PRD _{AIR} , %	5.8	3.6	3.1	4.8	2.8	3.4	3.9	4.4	5.9	3.6	6.8	3.7	4.4	3.3	4.2

** Se ha eliminado el dato de WTS de L11 por resultar aberrante en el análisis estadístico.

Mezcla AC 22S		dens. refer. =2479 kg/m ³													
	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	L10	L11	L12	L13	L14	Media
Mét. Compactación		B	B	B	B	B	B	A	A		A	A		B	
Densidad, kg/m ³	2461	2451	2470	2487	2483	2480	2477	2463	2481	2501	2441	2478	2456	2496	2473
Grado compactación, %	99.3	98.9	99.6	100.3	100.1	100.0	99.9	99.4	100.1	103.6	98.4	99.9	99.1	100.7	99.9
Altura, mm	61.6	61.5	60.1	60.5	60.6	60.5	60.5	60.0	60.8	61.0	60.7	60.0	60.5	60.1	60.6
Ensayo															
RD, mm	3.3	2.3	2.1	2.7	1.3	2.4	2.3	2.1	2.5	2.5	2.1	1.9	2.3	2.7	2.3
WTS _{AIR} , mm/10 ³ ciclos	0.090*	0.048	0.065	0.056	0.030	0.053	0.111*	0.044	0.050	0.058	0.063	0.035	0.047	0.068	0.051
PRD _{AIR} , %	5.3	3.7	3.5	4.4	2.2	4.1	3.8	3.6	4.1	4.0	3.5	3.1	3.8	4.5	3.8

TABLA 5. Valores medios obtenidos en ensayo de anillo de pista.

El análisis estadístico de resultados se ha realizado según la norma UNE 82009 en su parte 2, equivalente a la ISO 5725-2, referente al método básico para la determinación de repetibilidad y la reproducibilidad de un método de medición normalizado. Con este procedimiento, a partir de todos los resultados de ensayo se realiza un examen de consistencia e incompatibilidad de los resultados, bien mediante técnicas gráficas de consistencia (estadísticos h y k de Mandel) o por técnicas para detección de resultados numéricos aberrantes. En este trabajo se ha empleado las técnicas numéricas, basadas en el ensayo de Cochran para detectar la variabilidad intra-laboratorios (a partir de las réplicas de cada laboratorio) y después el ensayo de Grubbs para la inter-laboratorios (con los valores medios).

En ambos ensayos se aplican los siguientes criterios para identificar resultados anómalos y aberrantes:

- si el estadístico del ensayo es menor o igual al 5% del valor crítico, el dato es correcto.
- si el resultado es mayor del 5% y menor al 1% del valor crítico, el dato es anómalo y se indica por medio de un asterisco sencillo.
- si el estadístico es mayor que el 1% del valor crítico, el resultado es estadísticamente incompatible (aberrante) y se indica por un doble asterisco.

En el ensayo de Grubbs si no se determina la presencia de valores aberrantes, debe aplicarse entonces el ensayo doble de Grubbs.

La aplicación del ensayo de Cochran conduce a los valores que se indican en la tabla 6.

	Mezcla BBTM 11A				Mezcla AC 22S			
	Dens.	RD	WTS	PRD	Dens.	RD	WTS	PRD
C	0.388	0,583*	0.422	0,593*	0.554	0.548	0.326	0.543
Valores críticos para p=11 y n=2								
5%	0.57							
1%	0.684							

* Son resultados anómalos en el ensayo estadístico pero no son eliminados.

TABLA 6. Valores del estadístico de Cochran, C.

		Simple inferior	Simple superior	Doble inferior	Doble superior
BBTM11A	Dens	1.308	2.458	0.397	0.745
	RD	2.214	1.157	0.819	0.361
	WTS	3,041 **	0.870		
	PRD	2.123	1.177	0.786	0.416
AC 22S	Dens	1.607	1.894	0.533	0.607
	RD	2.118	2.233	0.473	0.530
	WTS	2.487	1.353	0.729	0,250*
	PRD	2.000	2.296	0.449	0.560
Valores críticos para p=14					
		Superior 1%	Superior 5%	Inferior 1%	Inferior 5%
		2.755	2.507	0.228	0.3112

* Son resultados anómalos en el ensayo estadístico pero no son eliminados

** Es resultado aberrante en el ensayo estadístico y debe ser por tanto eliminado.

TABLA 7. Valores de estadísticos del ensayo de Grubbs.

La aplicación del ensayo de Grubbs a las celdas de valores medios conduce a los valores que se indican en la tabla 7.

Hay que señalar que el único valor eliminado L11 se corresponde con el laboratorio que ha obtenido un porcentaje de compactación inferior al 98% de la densidad de referencia.

Los cálculos de los valores medios y desviaciones típicas de repetibilidad (σ_r) y reproducibilidad (σ_R) se calculan mediante las expresiones indicadas en los apartados 7.4.4 y 7.4.5 de la norma UNE 82009-2. Los valores obtenidos para ambas mezclas se presentan en la tabla 8. También se incluyen en esta tabla los límites de repetibilidad (r) y reproducibilidad (R) con un nivel de probabilidad del 95%, según apartado 4.1.2 de la norma UNE 82009-6, así como los coeficientes de variación.

La mezcla BBTM 11A presenta coeficientes de variación de todos los parámetros ensayados superiores a los de la mezcla AC 22S, lo que significa mayores dispersiones, que podían ser atribuibles a la elevada proporción de árido grueso y menor proporción de mortero de la primera, lo que dificulta la homogeneidad de la mezcla.

Con objeto de comparar los resultados de reproducibilidad de este nuevo ensayo europeo UNE-EN 12697-22 con el anteriormente vigente en nuestro país NLT-173, se han comparado los resultados de la mezcla AC 22S con los obtenidos en el año 2002 en un análisis de anillo para estudiar la influencia de los betunes en las deformaciones plásticas, en una mezcla bituminosa tipo S12 fabricada con betún 60/70. En la tabla 9 se recogen los resultados de los coeficientes de variación, calculados a partir de la desviación típica de la reproducibilidad y el valor medio, obtenidos para la mezcla S12 fabricada con 5,2% de ligante y ensayada según el método NLT-173 y los obtenidos con la mezcla AC 22S según el método de ensayo UNE-EN 12697-22.

De estos resultados se deduce que los coeficientes de variación del método europeo son inferiores a los del método NLT, lo que indica una mayor precisión del nuevo método.

En cualquier caso parece conveniente estudiar los valores de precisión con más muestras de forma que sea posible determinar la repetibilidad y reproducibilidad en mezclas con diferentes niveles de comportamiento.

		Repetibilidad				Reproducibilidad		
		P	Media	σ_r	r	σ_R	R	Coef. var.
BBTM11A	Densidad, kg/m ³	14	2421	3.6	10	35.3	99	1.5
	RD, mm	14	1.7	0.14	0.4	0.47	1.3	27.9
	WTS _{AIR} , mm/10 ³ ciclos	13	0.036	0.0038	0.011	0.0169	0.047	46.8
	PRD, %	14	4.2	0.36	1.0	1.21	3.4	28.6
AC 22S	Densidad, kg/m ³	14	2473	8.1	23	18.1	51	0.7
	RD, mm	14	2.3	0.34	0.9	0.50	1.4	21.7
	WTS _{AIR} , mm/10 ³ ciclos	14	0.058	0.0099	0.028	0.0224	0.063	38.4
	PRD, %	14	3.8	0.56	1.6	0.81	2.3	21.3

TABLA 8. Valores calculados de medias, desviaciones típicas y límites de repetibilidad y reproducibilidad para ambas mezclas.

		Media	σ_R	Coefficiente variación, %
NLT-173	Densidad, kg/m ³	2366	40	1.7
	Deformación, mm	3.9	0.9	23.3
	V _{105/120} , mm/min	0.021	0.014	64.9
UNE-EN 12697-22	Densidad, kg/m ³	2473	18.1	0.7
	RD, mm	2.3	0.5	21.7
	WTS _{AIR} , mm/10 ³ ciclos	0.058	0.022	38.4

TABLA 9. Valores medios y coeficientes de variación obtenidos en ensayo de pista de laboratorio según NLT-173 y UNE-EN 12697-22.

Para estudiar la influencia del método de compactación en el resultado del ensayo se utilizó la aplicación informática SPSS, realizando un análisis estadístico de la varianza ANOVA de un factor para tratar de determinar si los dos procedimientos de compactación tienen influencia en el grado de compactación y en el resultado del ensayo de pista. Los laboratorios que no siguieron ningún método de compactación trabajan con la misma máquina que el procedimiento B y por tanto se han asimilado ambos métodos.

La hipótesis que se pone a prueba en el ANOVA de un factor es que las medias poblacionales de la densidad y de WTS obtenidas con diferente método de compactación, son iguales.

Las hipótesis empleadas para el análisis fueron:

Hipótesis nula: **H0:** Todas las medias son iguales.

Hipótesis alternativa: **H1:** Las medias no son iguales y por tanto el método de compactación influye.

Para Sig < 0,05 → Se rechaza la hipótesis nula.

Para Sig > 0,05 → No se rechaza la hipótesis nula.

En el caso de la mezcla BBTM 11A, los resultados obtenidos para densidad y WTS figuran en las tablas 10 y 11.

Como Sig=0,001 en ambos parámetros y <0,05 se rechaza la hipótesis de igualdad de medias y por lo tanto se puede decir que el método de compactación influye en los resultados de densidad y de WTS en ensayo de pista para la mezcla BBTM 11A.

En el caso de la mezcla AC 22 S, el análisis de varianzas para resultados de densidad y WTS figuran en tablas 12 y 13.

TABLA 10. Resultado ANOVA para densidad de BBTM 11A según el método de compactación.

ANOVA					
Densidad					
	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Inter-grupos	11681,719	1	11681,719	14,481	,001
Intra-grupos	18554,281	23	806,708		
Total	30236,000	24			

ANOVA					
WTS					
	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Inter-grupos	,011	1	,011	15,701	,001
Intra-grupos	,016	23	,011		
Total	,027	24			

TABLA 11. Resultado ANOVA para WTS de BBTM11A según el método de compactación.

TABLA 12. Resultado ANOVA para densidad de AC22S según el método de compactación.

ANOVA					
Densidad					
	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Inter-grupos	701,542	1	701,542	2,111	,160
Intra-grupos	7645,018	23	332,392		
Total	8346,560	24			

ANOVA					
WTS					
	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Inter-grupos	,001	1	,001	1,917	,180
Intra-grupos	,012	23	,001		
Total	,013	24			

TABLA 13. Resultado ANOVA para WTS de AC22S según el método de compactación.

Como Sig es superior en ambos a 0,16 y >0,05 no se rechaza la hipótesis de igualdad de medias, lo que equivale a decir que el método de compactación no influye en los resultados de densidad y de WTS en el ensayo de pista para la mezcla AC 22S.

Por tanto con los datos disponibles no se puede afirmar que el método de compactación no influya en los resultados de densidad y de WTS del ensayo de pista de laboratorio.

7. CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados de los ensayos previos realizados y del estudio interlaboratorios para evaluar la precisión del ensayo de pista de laboratorio exigido en la nueva normativa de mezclas bituminosas, pueden establecerse las siguientes conclusiones:

1. Las probetas para el ensayo de pista de laboratorio exigido en España deben fabricarse con el compactador de placa con el dispositivo de rodillo de acero definido en la norma UNE-EN 12697-33 de forma que se obtenga una densidad superior al 98% de la densidad de referencia. En este trabajo se han puesto a punto dos procedimientos, adaptados a los dos tipos de compactadores comercializados en España.
2. El grado de compactación alcanzado en las probetas afecta al resultado del ensayo en pista. El grado de compactación del 98% exigido en el PG-3 es conforme con los datos experimentales de este trabajo. Hay que señalar que el único valor aberrante en el análisis estadístico y eliminado del ensayo interlaboratorios se corresponde con el laboratorio que obtuvo un porcentaje de compactación inferior al 98% de la densidad de referencia.
3. La densidad de referencia es un parámetro fundamental para la compactación de las probetas. La escasa resistencia a las deformaciones plástica obtenida con las mezclas ensayadas en el primer ensayo previo se debieron a una falta de compactación provocada por partir de una densidad de referencia errónea.
4. Los resultados obtenidos en la velocidad de deformación WTS del ensayo interlaboratorios, tabla 8, dentro del intervalo estudiado se aprecia que la precisión disminuye con el valor medio, aunque para poder determinar la relación funcional existente son necesarios un mayor número de datos. Esta relación parece confirmarse en los ensayos previos donde el valor medio es mayor y también lo es la desviación típica de la reproducibilidad. La mezcla BBTM 11A presenta mayores dispersiones que la mezcla AC 22S, que podían ser atribuibles a la elevada proporción de árido grueso y menor proporción de mortero de la primera lo que dificulta la homogeneidad de la mezcla.
5. La precisión del ensayo de pista con el dispositivo pequeño y el procedimiento B al aire, recogido en la norma UNE-EN 12697-22 es mayor que la obtenida con el anterior ensayo, NLT-173, como se ha puesto de manifiesto

al comparar los coeficientes de variación de una mezcla similar ensayada con ambos métodos.

6. Con los resultados disponibles no se ha podido confirmar si el método de compactación de las probetas tiene una influencia significativa en el resultado del ensayo de pista. Es necesario realizar nuevos ensayos para confirmar si realmente tiene influencia el método de compactación.

8. BIBLIOGRAFÍA

- Rubio B. Compactación de probetas y determinaciones de densidad. Jornada técnica Mezclas Bituminosas, Madrid febrero 2009.
- Rubio B. Las nuevas normas de ensayo de mezclas UNE-EN 12697. Jornada Mezclas bituminosas el Mercado CE, Zaragoza octubre 2007.
- UNE-EN 12697-22. Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 22: Rodadura.
- UNE-EN 12697-33. Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 33: Elaboración de probetas con compactador de placa.
- Orden Circular 24/2008 sobre el Pliegos de Prescripciones Técnicas Generales para obras de carreteras y puentes: Artículo 542 Mezclas bituminosas en caliente tipo hormigón bituminoso y Artículo 543 Mezclas bituminosas para capas de rodadura, mezclas drenantes y discontinuas. Ministerio de Fomento, 2008.
- UNE-EN 13108-1. Mezclas bituminosas. Especificaciones de materiales. Parte 1: Hormigón asfáltico.
- UNE-EN 13108-2. Mezclas bituminosas. Especificaciones de materiales. Parte 2: Mezclas bituminosas para capas delgadas.
- UNE-EN 13108-20. Mezclas bituminosas. Especificaciones de materiales. Parte 20: Ensayos de tipo.
- Influencia de los betunes en las deformaciones plásticas de las mezclas bituminosas. Monografía CEDEX, 2002.
- UNE 82009. Exactitud (veracidad y precisión) de resultados y métodos de medición. Parte 2: Método básico para la determinación de la repetibilidad y reproducibilidad de un método de medición normalizado. Parte 6: Utilización en la práctica de los valores de exactitud.

9. AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su gratitud a las empresas participantes: CAMPEZO, SORIGUÉ, ELSAN, EIFFAGE, CEMOSA, INTROMAC, CIESM, ORSA, JUNTA CASTILLA y LEÓN, LUBASA, DIPUTACIÓN ÁLAVA, EUROCONSULT y REPSOL.

Así mismo se agradece a los señores S. Muñoz, F. González y J. Jiménez su colaboración en la parte experimental de los trabajos.