

El ensayo europeo de sensibilidad al agua y su relación con los ensayos normalizados en España

BALTASAR RUBIO (*), RAFAEL JIMÉNEZ (*), FÉLIX E. PÉREZ (**) y ADRIANA MARTÍNEZ (**)

RESUMEN La entrada en vigor, desde marzo del presente año, de la nueva normativa europea referente a los criterios de especificación y al control del sistema de producción de las mezclas bituminosas en caliente para empleo en obras de carreteras ha obligado, tanto a las Administraciones Públicas como a las empresas productoras y los laboratorios de control, a realizar el necesario proceso de adaptación a dicha normativa.

Los artículos del Pliego General de Prescripciones Técnicas (PG-3) para obras de carreteras del Estado relativos a las mezclas en caliente aún hacían referencia a la normativa NLT hasta ahora seguida. Consciente de ello, la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento encargó en 2006 al Centro de Estudios del Transporte del CEDEX la realización de un estudio para evaluar aquellos métodos de ensayo europeos que mejor se adaptaran a los utilizados en España, estableciendo las necesarias correlaciones que permitiesen obtener nuevos parámetros de especificación de los materiales.

En el presente artículo se resumen los trabajos correspondientes al ensayo europeo de sensibilidad a la acción del agua de las mezclas bituminosas, EN 12697-12.

THE EUROPEAN TEST ON WATER SENSITIVITY OF BITUMINOUS MIXES AND ITS CORRELATION WITH THE NORMALIZED TESTS IN SPAIN

ABSTRACT *The entry into force, since March 2008, of the new European normative concerning the specification criteria and the production system assessment for hot bituminous paving mixtures, have forced public administrations, producers and control laboratories alike, to deal with the necessary process of adaptation to such normative.*

In 2006 the specifications on hot bituminous mixes for road construction issued by the Spanish National Administration were still referring to the NLT testing procedures hitherto followed. Conscious of this problem, the Ministry of Public Works entrusted the Transportation Research Centre of CEDEX to perform a study aimed to identify and evaluate amongst the new European testing methods, those which were more suitable for substituting the NLT ones. By establishing the necessary correlations between testing procedures, new specification parameters for the materials would be finally obtained.

This article focuses on the new European test to determine the water sensitivity of bituminous mixtures (EN 12697-12), describing the work involved in its study.

Palabras clave: Mezcla bituminosa, Sensibilidad al agua, Especificaciones, Ensayo cántabro.

1. ANTECEDENTES

La normativa europea relativa a las mezclas bituminosas en caliente está recogida básicamente en las dos series de normas EN-13108 y EN-12697.

Las normas EN-13108 tienen por objeto definir los criterios de especificación de los distintos tipos de mezclas bituminosas, así como su sistema de producción (el Ensayo Inicial Tipo y el Control de Producción). Estas normas se han elaborado por mandato de la Comisión Europea (Directiva 89/106/CEE sobre productos de construcción) y, en consecuencia, son normas armonizadas de carácter de obligatorio. Una vez transcurrido el periodo de coexistencia con las normas nacionales, su aplicación es obligatoria desde el primero de marzo del 2008.

En la serie de normas EN 13108 se recogen las especificaciones para siete tipos de mezclas bituminosas en caliente. De ellas, las normas relativas a hormigones asfálticos (parte 1), mezclas en capas delgadas (parte 2) y mezclas drenantes (parte 7) son aplicables a las mezclas bituminosas en caliente de empleo generalizado en nuestro país, y se corresponden con las especificaciones recogidas en los artículos 542 y 543 del PG-3.

La necesidad de armonizar las características de las mezclas bituminosas empleadas en todos los países europeos, con sus diferentes orografías, condiciones climáticas, solicitudes impuestas por el tráfico, etc., ha dado lugar a unas especificaciones de carácter amplio y muy abierto, que constituyen un único marco de referencia. Se ha pretendido con ello, que tales especificaciones puedan aplicarse a la tecnología de los diferentes países, si bien éstos necesitan definir cada una de las características especificadas.

En las especificaciones se indica, como es lógico, el correspondiente método de ensayo europeo para evaluar cada

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

(**) ETSECCP Barcelona. UPC.

propiedad, lo que ha exigido la normalización de 43 métodos de ensayo de mezclas bituminosas, que se recogen en la serie de normas EN 12697. Con ella se ha pretendido también recopilar los métodos existentes en los diferentes países, pudiendo en numerosos casos elegirse entre varios procedimientos de compactación y de ensayo.

En consecuencia, España, al igual que el resto de países de la UE, debe revisar sus normativas y adaptarlas para que sean conformes con las normas armonizadas. Ello obliga a cada país a definir y establecer los límites de especificación de las características obligatorias, a seleccionar entre las que se consideran optativas, así como a definir los procedimientos de fabricación de las probetas que deben aplicarse y el método específico de ensayo para determinar dichas características.

A partir del análisis de la normativa europea de mezclas bituminosas, se consideró que era necesaria la adaptación de al menos una parte de la normativa española, tanto en cuanto a procedimientos de ensayo como en las especificaciones correspondientes.

Los procedimientos y especificaciones que se consideraron prioritarios para su puesta a punto y para el establecimiento de los correspondientes límites, fueron los siguientes:

- Sensibilidad a la acción del agua, EN 12697-12.
- Ensayo de pista, EN 12697-22.
- Módulo de rigidez, EN 12697-26.

El objeto del ensayo de sensibilidad al agua es determinar la pérdida de cohesión que se produce por la saturación y acción del agua en las mezclas bituminosas. Aunque este objetivo coincide con el del procedimiento español de inmersión-compresión, ambos métodos presentan características sensiblemente diferentes: Difieren en el procedimiento de compactación de la probeta, en la altura de la probeta, en las condiciones de ensayo y especialmente en el tipo de rotura, ya que con el procedimiento europeo ésta se hace a tracción indirecta, mientras que en el ensayo de inmersión-compresión la rotura es a compresión simple.

El ensayo de Pista de Laboratorio, descrito en la norma EN 12697-22, cuyo objeto es determinar la susceptibilidad de las mezclas bituminosas a la deformación plástica mediante la acción de una rueda cargada, recoge 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 dotada de neumático inflado con aire. El tercer dispositivo, denominado de pequeño tamaño, está equipado con una rueda cuya banda de rodadura es de goma maciza. El procedimiento español de ensayo en pista de laboratorio, recogido en la norma NLT-173, se correspondería en principio con el dispositivo europeo de pequeño tamaño para ensayo realizado al aire. No obstante, la frecuencia del movimiento de vaivén de la rueda, la carga aplicada sobre ella y la duración del ensayo son diferentes.

Respecto al ensayo de módulo de rigidez, cabe señalar que la norma europea EN 12697-26 permite determinar dicho módulo mediante ensayos dinámicos de flexión (con 2, 3 y 4 puntos de fijación y/o apoyo), compresión diametral, tracción y tracción-compresión. Sin embargo, no se contempla ningún procedimiento de compresión simple dinámica con control de carga, tal como se aplica según la norma española NLT-349.

De lo expuesto anteriormente se deduce la necesidad de realizar la puesta a punto y adaptación a las tres normas señaladas, de forma que se establezcan las condiciones específicas para la fabricación de probetas y se disponga de los equipos y la experiencia necesarios para la determinación de las características de la sensibilidad a la acción del agua, de

la resistencia a las deformaciones plásticas, y de la medida de módulos dinámicos según los nuevos procedimientos. Además se deben establecer los límites de especificación que deben cumplir las mezclas bituminosas fabricadas en España con respecto a las propiedades señaladas, puesto que son objeto de requerimiento en los artículos 542 y 543 del Pliego de Prescripciones de nuestra normativa, relativos a las mezclas bituminosas en caliente.

La Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento, consciente de la necesidad de adaptar el PG-3 a la normativa europea, encargó en el año 2006 al Centro de Estudios del Transporte del CEDEX, un estudio para evaluar los métodos de ensayo y seleccionar aquellos que mejor se adaptasen a nuestra tecnología y experiencia. Una vez seleccionados, se procedería a establecer las correspondientes correlaciones entre los métodos españoles y europeos, de forma que se fijasen los parámetros de especificación necesarios para garantizar el buen comportamiento de las mezclas bituminosas de uso generalizado en nuestro país.

En el presente artículo se resume parte de este trabajo, describiéndose los estudios relativos a la puesta a punto y adaptación del método de ensayo denominado "sensibilidad a la acción del agua", correspondiente a la norma EN 12697-12, para establecer tanto las características del ensayo que quedan a la elección de cada estado miembro, según la normativa europea, como la correlación entre este ensayo y el de inmersión-compresión y/o el ensayo cántabro después de inmersión (exigido para las mezclas tipo PA y M). Concretamente se han definido las condiciones de fabricación y compactación de las probetas, así como los límites de resistencia conservada a tracción indirecta a exigir según los diferentes tipos de mezclas bituminosas, para garantizar un buen comportamiento frente a la acción del agua.

El trabajo ha sido realizado en el Laboratorio de Infraestructura Viaria del Centro de Estudios del Transporte del CEDEX, con la colaboración del Departamento de Infraestructuras del Transporte y Territorio de la Universidad Politécnica de Cataluña.

2. EL ENSAYO DE SENSIBILIDAD AL AGUA EN LAS ESPECIFICACIONES EUROPEAS DE LAS MEZCLAS BITUMINOSAS

El ensayo de sensibilidad al agua se especifica como requerimiento general de las mezclas bituminosas recogidas en la norma EN 13108, concretamente en las partes 1, 2 y 7 relativas a hormigones bituminosos, mezclas en capas delgadas y mezclas drenantes, respectivamente. Ello significa que será de aplicación para todos los tipos de mezclas normalizados hasta ahora en España y supondrá un importante cambio para evaluar la resistencia a la acción del agua de nuestras mezclas drenantes y monogranulares (mezclas discontinuas tipo M). Como es sabido, esta característica era valorada mediante el ensayo cántabro después de inmersión, siendo dicho ensayo, por tanto, fundamental para la dosificación de estos tipos de mezclas bituminosas.

La sensibilidad a la acción del agua se evalúa según el método EN 12697-12, en el que se determina la relación entre la resistencia a tracción indirecta de probetas sometidas a un proceso de inmersión en agua y la de probetas mantenidas al aire (*ITSR*, *indirect tensile strength ratio*). Dicho parámetro es equivalente a la resistencia conservada que se obtiene aplicando el ensayo de inmersión-compresión. En base a esta relación o índice se establecen diferentes categorías de resistencia mínima, si bien no son las mismas para todos los tipos de mezclas, tal como se indica en la tabla 1.

| MEZCLAS HORMIGÓN BITUMINOSO | MEZCLAS EN CAPA DELGADA | MEZCLAS DRENANTES | RESISTENCIA CONSERVADA MÍNIMA, % |
|-----------------------------|-------------------------|---------------------|----------------------------------|
| CATEGORÍA | | | |
| - | ITSR ₁₀₀ | ITSR ₁₀₀ | 100 |
| ITSR ₉₀ | ITSR ₉₀ | ITSR ₉₀ | 90 |
| ITSR ₈₀ | - | ITSR ₈₀ | 80 |
| - | ITSR ₇₅ | - | 75 |
| ITSR ₇₀ | - | ITSR ₇₀ | 70 |
| ITSR ₆₀ | - | ITSR ₆₀ | 60 |
| - | - | ITSR ₅₀ | 50 |

TABLA 1. Categorías de sensibilidad al agua.

Por otro lado, en la norma europea de especificaciones de mezclas bituminosas EN 13108, concretamente en el anejo D.3 sobre sensibilidad al agua, incluido en la parte relativa a ensayos de tipo (EN 13108-20), se explicita que la temperatura de ensayo debe ser 15°C. Sin embargo, el método de ensayo (EN 22697-12) indica que la temperatura de ensayo para las probetas puede estar comprendida entre 5 y 25°C, recomendándose como temperatura de ensayo 25°C. Se supone que al ser armonizada la norma de especificaciones, deben prevalecer los criterios establecidos en la misma y por tanto, debe realizarse el ensayo a 15°C, tal como se reseña en dicha norma.

Respecto a la compactación de las probetas, la norma EN 13108 posibilita la utilización de diferentes métodos de compactación, tal como se recoge en la tabla C.1 de la norma EN 13108-20. Dichos métodos son la compactación por impacto, (EN 12697-30), el compactador giratorio (EN 12697-31), el compactador vibratorio (EN 12697-32) y el compactador de placas (EN 12697-33). Así mismo se contempla la posibilidad de emplear testigos de mezcla bituminosa para el ensayo de sensibilidad al agua y se permiten además diferentes energías de compactación. Por otro lado, en el método de ensayo de sensibilidad a la acción del agua (EN 12697-12), se permite la compactación con los métodos indicados, pero se especifica que la energía de compactación se debe seleccionar de forma que se consiga una densidad relativa aparente o un contenido de huecos similares a los que se obtengan en obra.

A título orientativo se indican los siguientes niveles de energía con los que se alcanza la compactación de obra:

- Compactación giratoria con 40 giros (norma EN 12697-3).
- Compactación por impacto con 2 x 25 golpes (norma EN 12697-30).
- Compactación vibratoria con (80 ± 5) segundos (norma EN 12697-32).
- Compactación por placas con 12 pasadas de neumático (norma EN 12697-33 procedimiento con rueda neumática).

A la hora de abordar el trabajo planteado, dadas las diferentes posibilidades de compactación de las probetas para determinar la sensibilidad al agua, ha sido necesario, en primer lugar, elegir el método y la energía de compactación mas adecuados, en una serie de ensayos previos, para obtener una densidad relativa aparente similar a la obtenida con la mezcla bituminosa en obra. Posteriormente se han ensayado todos los tipos de mezclas, aplicando tanto el método europeo de sensibilidad a la acción del agua como el ensayo de inmersión-compresión para las mezclas tipo D, S, G, F y MAM, o el ensayo cántabro después de inmersión en agua para las mezclas tipo PA y M. Con objeto de establecer

mejor las correspondientes correlaciones entre los métodos y poder determinar los umbrales de resistencia conservada a tracción indirecta para todos los tipos de mezclas españolas, se han estudiado mezclas con diferente comportamiento a la acción del agua, mediante el empleo de áridos y *filler* de diferentes naturalezas, betunes de penetración o modificados con polímeros, activantes de adhesividad, etc.

3. MATERIALES

De acuerdo con los objetivos del trabajo, se han seleccionado para la realización de este estudio, los materiales que se indican a continuación:

• Ligantes

Se han utilizado como ligantes un betún de penetración tipo B 60/70, y un betún asfáltico modificado con polímeros tipo BM-3b. Ambos se usan de manera generalizada en nuestro país en la fabricación de mezclas bituminosas.

• Áridos

Los áridos empleados en la realización de este trabajo proceden del machaqueo de roca o grava natural utilizados habitualmente en las Comunidades de Madrid y Cataluña. Como árido grueso se han empleado tres tipos: El primero, de naturaleza silíceo, procede de la gravera de Velilla de San Antonio. El segundo es un pórfido de Aldeavieja (Ávila). El tercero es un granito de Berta (Barcelona).

Como árido fino, además de los anteriores, se han empleado dos áridos cálizos de las canteras de El Hoyón (Madrid) y de Foj (Barcelona).

• Polvo mineral

Como polvo mineral de aportación se han utilizado un cemento CEM II/B-M 32,5, un *filler* calizo comercial y un *filler* arcilloso de carácter hidrofílico.

• Activante

Para mejorar la adhesividad árido-ligante se ha empleado un agente de adhesividad de tipo amínico.

• Mezclas bituminosas

Con los materiales básicos indicados anteriormente se han estudiado distintas composiciones que se ajustan a los husos de mezclas tipo denso D, semidenso S, gruesas G, drenantes PA y discontinuas en capa delgada tipo F y M, todas ellas de empleo habitual en nuestro país.

En las tablas 2 y 3 se relacionan las mezclas fabricadas, indicando los tipos de áridos, *filler* y ligantes utilizados, así

| REFERENCIA | ÁRIDO GRUESO | ÁRIDO FINO | TIPO BETÚN | % BETÚN | FILLER DE APORATACIÓN | ACTIVANTE, % s/ betún |
|------------|--------------|------------|------------|---------|-----------------------|-----------------------|
| D12 | SILÍCEO | CALIZO | B 60/70 | 5 | - | - |
| S12-1 | SILÍCEO | CALIZO | B 60/70 | 4,75 | - | - |
| S12-2 | SILÍCEO | CALIZO | BM-3b | 5 | - | - |
| D20 | SILÍCEO | CALIZO | B 60/70 | 5 | - | 0,3 |
| S20 | SILÍCEO | CALIZO | B 60/70 | 5 | - | 0,3 |
| G20-1 | SILÍCEO | CALIZO | B 60/70 | 4 | - | - |
| G20-2 | SILÍCEO | CALIZO | B 60/70 | 4,5 | - | - |
| F8 | PÓRFIDO | CALIZO | B 60/70 | 5,5 | CEMENTO | - |
| F10-1 | PÓRFIDO | CALIZO | BM-3b | 5,5 | - | - |
| F10-2 | PÓRFIDO | CALIZO | BM-3b | 5,5 | CEMENTO | - |
| F10-3 | PÓRFIDO | CALIZO | BM-3c | 5,5 | CALIZO | - |

TABLA 2. Composición de las mezclas tipo D, S, G y F ensayadas.

| REFERENCIA | ÁRIDO GRUESO | ÁRIDO FINO | TIPO BETÚN | % BETÚN | FILLER DE APORATACIÓN | ACTIVANTE, % s/ betún |
|------------|--------------|------------|------------|---------|-----------------------|-----------------------|
| PA12-1 | SILICEO | CALIZO | B 60/70 | 4,5 | - | - |
| PA12-2 | SILICEO | CALIZO | B 60/70 | 4,5 | CEMENTO | - |
| PA12-3 | SILICEO | CALIZO | BM-3b | 4,5 | CEMENTO | - |
| PA12-4 | SILICEO | CALIZO | BM-3b | 4,5 | CEMENTO | 0,3 |
| PA12-5 | SILICEO | CALIZO | BM-3b | 5 | CEMENTO | - |
| PA12-6 | GRANITO | CALIZO | B 60/70 | 4 | CALIZO | - |
| PA12-7 | GRANITO | CALIZO | B 60/70 | 5 | CALIZO | - |
| PA12-8 | GRANITO | CALIZO | B 60/70 | 6 | CALIZO | - |
| PA12-9 | GRANITO | GRANITO | B 60/70 | 4 | ARCILLOSO | - |
| PA12-10 | GRANITO | GRANITO | B 60/70 | 5 | ARCILLOSO | - |
| PA12-11 | GRANITO | GRANITO | B 60/70 | 6 | ARCILLOSO | - |
| M8-1 | PORFIDO | CALIZO | B 60/70 | 5 | CEMENTO | - |
| M8-2 | PORFIDO | CALIZO | BM-3b | 5,5 | CEMENTO | - |
| M10-1 | PORFIDO | CALIZO | B 60/70 | 5 | CEMENTO | - |
| M10-2 | PORFIDO | CALIZO | BM-3b | 5 | CEMENTO | - |
| M10-3 | GRANITO | CALIZO | B 60/70 | 4 | CALIZO | - |
| M10-4 | GRANITO | CALIZO | B 60/70 | 5 | CALIZO | - |
| M10-5 | GRANITO | CALIZO | B 60/70 | 6 | CALIZO | - |
| M10-6 | GRANITO | GRANITO | B 60/70 | 4 | ARCILLOSO | - |
| M10-7 | GRANITO | GRANITO | B 60/70 | 5 | ARCILLOSO | - |
| M10-8 | GRANITO | GRANITO | B 60/70 | 6 | ARCILLOSO | - |

TABLA 3. Composición de las mezclas tipo PA y M ensayadas.

como el contenido de ligante y el porcentaje de activante. En la tabla 2 figuran las mezclas cuyo comportamiento a la acción del agua se evalúa mediante el ensayo de inmersión-compresión y en la tabla 3, aquellas en las que el efecto del agua se evalúa mediante el ensayo cántabro. Se han ensayado en mayor número las mezclas PA y M, dado que las diferencias entre los ensayos de sensibilidad al agua y cántabro son mucho más acusadas que las existentes entre el primero y el de inmersión-compresión.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. ELECCIÓN DEL MÉTODO DE COMPACTACIÓN

Como se ha indicado anteriormente, en primer lugar se procedió a establecer el método y los niveles de compactación más idóneos para fabricar las probetas empleadas para el ensayo de sensibilidad al agua.

De los cuatro procedimientos de compactación recogidos en la norma EN 12697-12 (giratorio, impacto, vibratorio y placas), se ha elegido la compactación por impacto Marshall debido a dos razones fundamentales: La mucha experiencia que se tiene en nuestro país en la utilización de este método,

y el empleo de la densidad Marshall como referencia para evaluar el grado de compactación obtenido en obra.

Para determinar el nivel de energía que permite obtener una densidad similar a la alcanzada por la mezcla bituminosa en obra, se han fabricado probetas Marshall según la norma EN 12697-30 con diferentes energías. En el caso de las mezclas tipo D, S y G se han fabricado series de probetas con 75, 50 y 25 golpes por cara. Las mezclas en capa delgada tipo F y M y las mezclas drenantes se han compactado con 50 y 25 golpes por cara. Esta diferencia se debe a que en el PG-3 se especifica que las mezclas citadas en primer lugar se compacten con 75 golpes, mientras que para las segundas se haga con 50 golpes.

Las densidades se han determinado mediante la fabricación de series de probetas Marshall según las dosificaciones que figuran en la tabla 2 y las cinco primeras mezclas tipo PA y M referidas en la tabla 3. Los resultados, expresados como porcentaje de compactación obtenido respecto a la densidad Marshall de referencia, se muestran en las figuras 1 y 2. En la figura 1 se han incluido también los datos de la compactación obtenida con las probetas de inmersión-compresión.

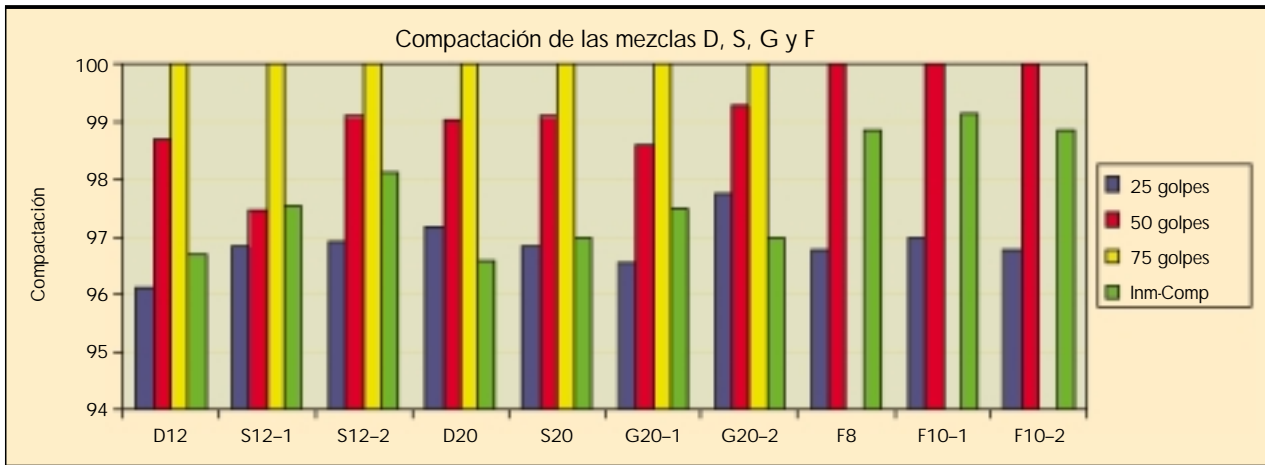


FIGURA 1. Compactación obtenida con las mezclas D, S, G y F.

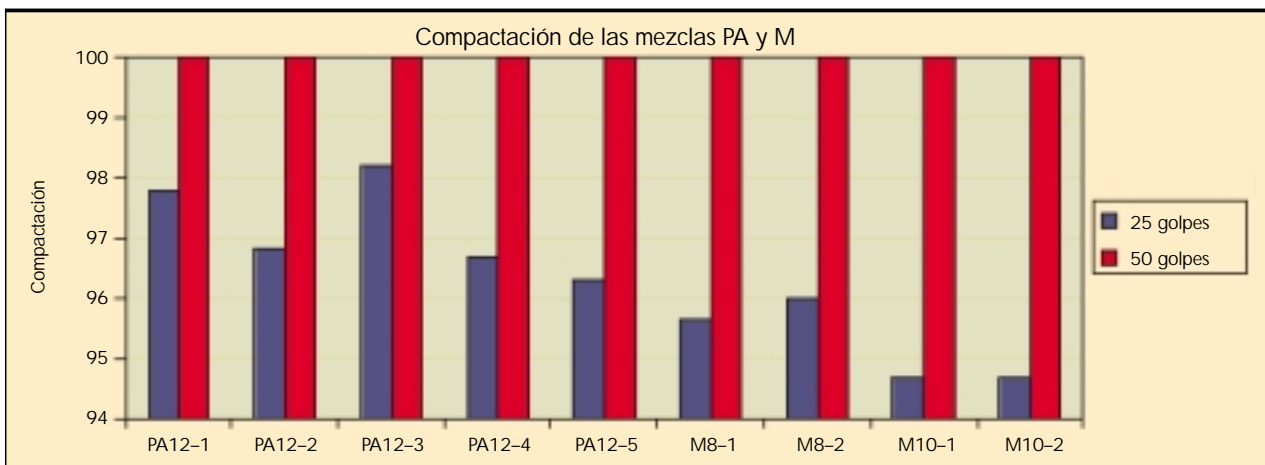


FIGURA 2. Compactación obtenida con las mezclas PA y M.

Se observa que para la mayoría de las mezclas bituminosas densas, semidensas y gruesas ensayadas, no se alcanza con 25 golpes por cara una compactación superior al 97- 98% respecto de la de referencia (probetas Marshall compactadas con 75 golpes), tal como exige el artículo 542 del PG-3.

En todas las mezclas bituminosas tipo F ensayadas, las probetas fabricadas con 25 golpes tienen una densidad inferior al noventa y ocho por ciento (98%) de la densidad de referencia (probetas Marshall compactadas con 50 golpes por cara), exigida en el artículo 543 del PG-3.

Para las mezclas drenantes y monogranulares, el PG-3 exige que el contenido de huecos de la mezcla no podrá diferir en más de dos (± 2) puntos porcentuales respecto del porcentaje obtenido en la fórmula de trabajo. Ello equivale, para este tipo de mezclas M y PA, a un 97- 98% de compac-

tación sobre las probetas Marshall fabricadas con 50 golpes por cara. Como se deduce de la figura 2, el grado de compactación de la mayoría de las mezclas ensayadas cuando se aplican 25 golpes, no alcanza el porcentaje requerido.

En consecuencia, a partir de los resultados experimentales se deduce que es necesario fabricar y compactar las probetas de este tipo de mezclas mediante el método Marshall aplicando 50 golpes por cara para obtener una densidad similar a la obtenida después de su puesta en obra.

Con objeto de evaluar la influencia que el grado de compactación tiene sobre el resultado del ensayo de sensibilidad al agua, se hicieron ensayos comparativos de probetas compactadas con 25 y 50 golpes por cara. Los resultados obtenidos con algunas de estas mezclas se han representado en las figuras 3 a 8. En ellas se han incluido también los resulta-

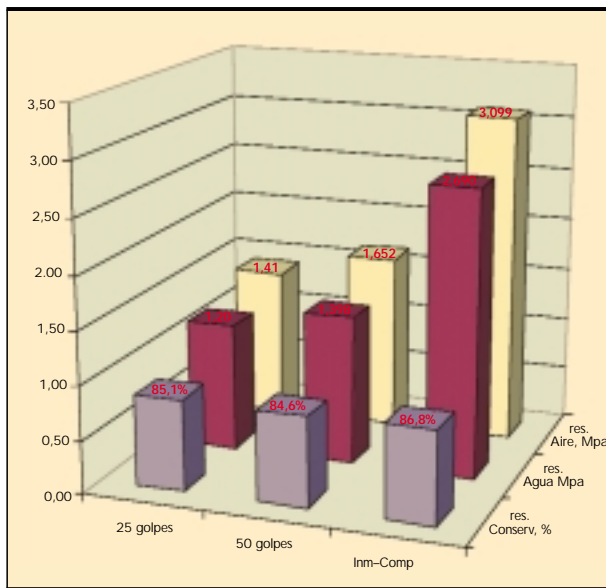


FIGURA 3. Resultados de la mezcla D20.

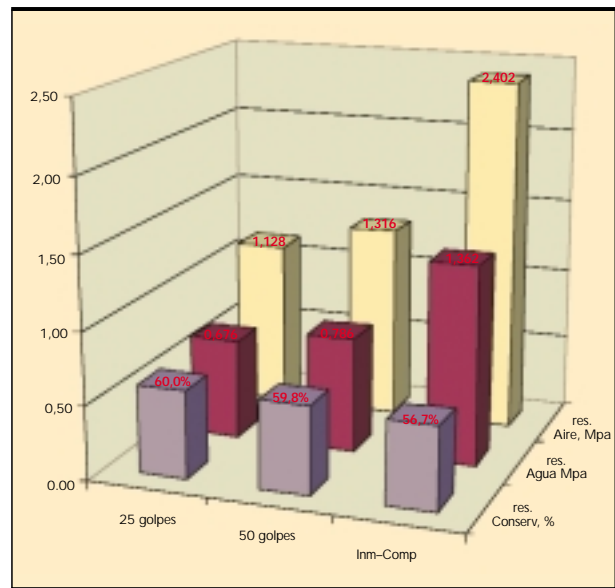


FIGURA 5. Resultados de la mezcla G20-2.

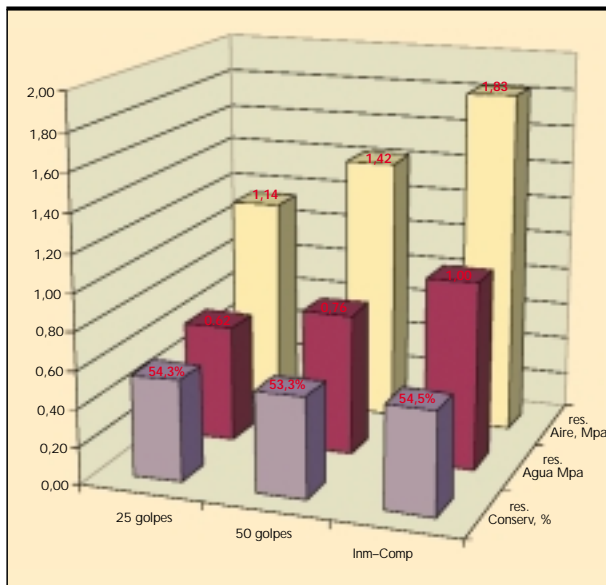


FIGURA 4. Resultados de la mezcla S12-1.

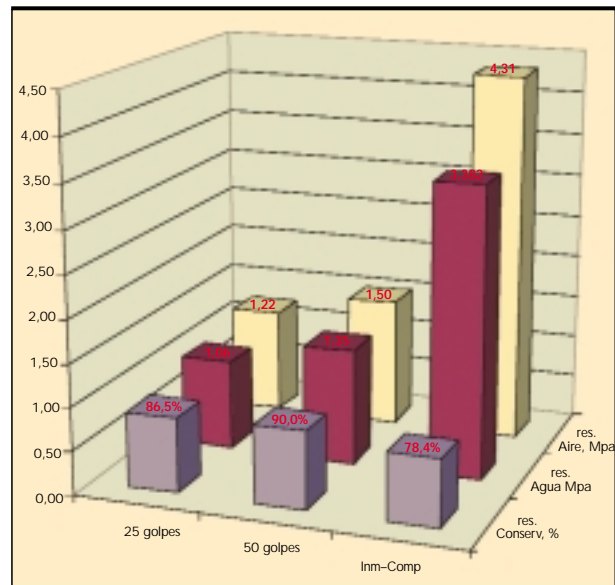


FIGURA 6. Resultados de la mezcla F10-2.

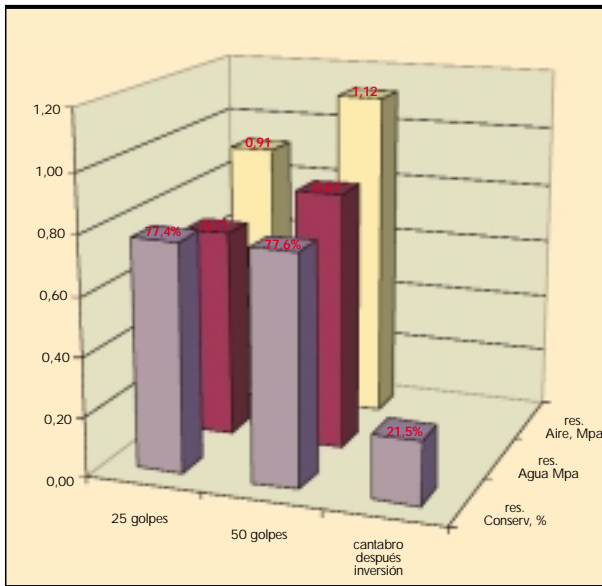


FIGURA 7. Resultados de la mezcla PA12-5.

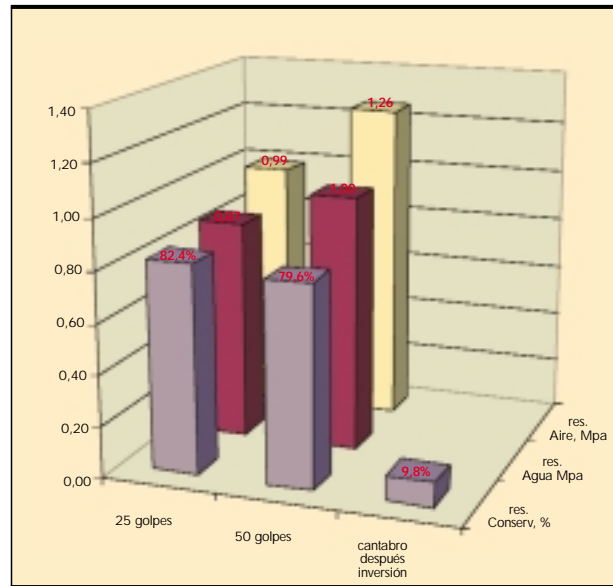


FIGURA 8. Resultados de la mezcla M8-2.

dos del ensayo de inmersión compresión, o de cántabro después de inmersión si se trata de mezclas tipo PA o M.

De estos resultados se deduce que en los ensayos de sensibilidad al agua, la resistencia a tracción indirecta aumenta con el grado de compactación, tanto en las probetas en seco como después de su inmersión en agua. Las resistencias a tracción indirecta de las mezclas D, S y G son superiores a las de las mezclas tipo PA y M, éstas últimas con menor proporción de árido fino y por tanto con una menor cohesión; sin embargo no se observa una tendencia clara a aumentar el porcentaje de resistencia conservada a tracción indirecta con el grado de compactación.

En consecuencia, teniendo en cuenta que en el ensayo de sensibilidad al agua el resultado se expresa como el porcen-

taje de resistencia conservada, la propuesta de fabricar las probetas con 50 golpes por cara para cualquier tipo de mezcla es válida, ya que el nivel de compactación no afecta de forma significativa al resultado del ensayo.

4.2 CORRELACIÓN ENTRE LOS ENSAYOS DE SENSIBILIDAD AL AGUA Y DE INMERSIÓN-COMPRESIÓN

Una vez determinado el método y las condiciones de fabricación y compactación de las probetas que es necesario aplicar para el ensayo de sensibilidad al agua, se realizaron con las mezclas relacionadas en la tabla 2, diversos ensayos de sensibilidad al agua y de inmersión-compresión. Los resultados obtenidos en dichos ensayos se indican en la tabla 4.

| REFERENCIA | TIPO BETÓN | % BETÓN | FILLER DE APORTACIÓN | ACTIVANTE, % s/ betún | ITSR % | RESISTENCIA CONSERVADA, % |
|------------|------------|---------|----------------------|-----------------------|--------|---------------------------|
| D12 | B 60/70 | 5 | - | - | 44,7 | 43,4 |
| S12-1 | B 60/70 | 4,75 | - | - | 53,3 | 54,5 |
| S12-2 | BM-3b | 5 | - | - | 74,2 | 82 |
| D20 | B 60/70 | 5 | - | 0,3 | 84,6 | 86,8 |
| S20 | B 60/70 | 5 | - | 0,3 | 86,7 | 89,6 |
| G20-1 | B 60/70 | 4 | - | - | 79 | 61,5 |
| G20-2 | B 60/70 | 4,5 | - | - | 59,8 | 56,7 |
| F8 | B 60/70 | 5,5 | - | - | 79,5 | 69,1 |
| F10-1 | BM-3b | 5,5 | - | - | 91,2 | 76,4 |
| F10-2 | BM-3b | 5,5 | CEMENTO | - | 90 | 78,4 |
| F10-3 | BM-3c | 5,5 | CALIZO | - | 89,6 | 82,5 |

TABLA 4. Resultados de los ensayos realizados sobre mezclas D, S, G y F.

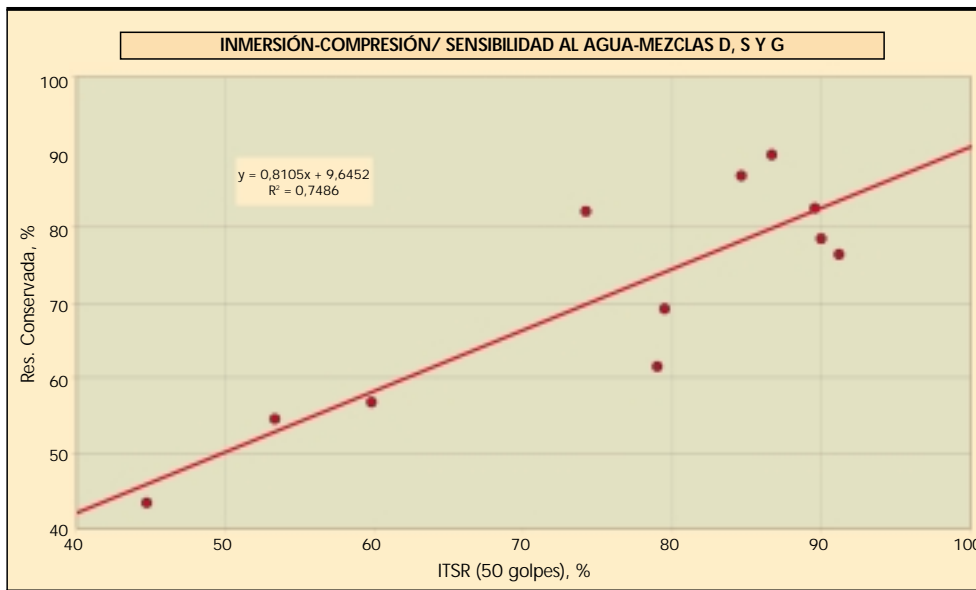


FIGURA 9. Correlación entre los ensayos de sensibilidad al agua e inmersión-compresión.

Para tratar de establecer una correlación entre los resultados de las resistencias conservadas obtenidas en los ensayos de inmersión-compresión y los de sensibilidad al agua, se representan en la figura 9 los porcentajes de resistencia a compresión simple conservada resultantes del ensayo de inmersión-compresión frente a los porcentajes de resistencia conservada a tracción indirecta para estas mismas mezclas D, S, G y F.

El coeficiente de correlación obtenido ha sido 0,75, lo que denota una correlación de moderada a alta entre las variables analizadas.

En base a esta recta de regresión, se establece que el valor mínimo de 75% de resistencia conservada, obtenido a partir del ensayo de inmersión-compresión, equivale aproximadamente a un 80% de resistencia conservada a tracción indirecta.

Con la aplicación de este límite del 80% y analizando todos los datos disponibles, solamente en el caso de la mezcla G20-1, fabricada con un 4% de betún B60/70, se habría producido discrepancia entre los resultados de uno y otro ensayo en cuanto a la correspondencia de límites obtenida, alcanzándose el 80% mínimo según el ensayo de sensibilidad al agua, pero no así el límite inferior de resistencia conservada según el ensayo de inmersión compresión, que ha dado un valor de 61,5%.

En consecuencia se recomienda que en principio, y teniendo en cuenta los resultados obtenidos, se exija como mínimo en el ensayo europeo de sensibilidad al agua un 80-85% de resistencia conservada a tracción indirecta para las mezclas densas, semidensas, gruesas y de alto módulo.

Las mezclas discontinuas tipo F, por su elevado contenido de *filler* y ligante, deben tener una mayor resistencia a la acción del agua, y así se pone de manifiesto al obtenerse valores de ITSR en el entorno del 90%. No obstante, la mezcla F8 presenta un valor de ITSR del 80%, pero no cumple sin embargo con el mínimo del 75% exigido en el ensayo de inmersión compresión. Por tanto es razonable fijar el umbral en un 90%, teniendo en cuenta que estas mezclas deben fabricarse con contenidos relativamente elevados de betunes modificados con polímeros y *filler* de aportación, lo que supone una mejora de

la resistencia a la acción del agua respecto a la de las mezclas D, S y G.

En cuanto a las mezclas drenantes y monogranulares, en las cuales se evalúa su comportamiento a la acción del agua mediante el ensayo cántabro después de inmersión en agua, los resultados de los ensayos realizados se indican en la tabla 5.

Se ha representado la pérdida por desgaste de las probetas de dichas mezclas, después de su inmersión en agua durante 24 horas a 60°C, frente a las resistencias conservadas a tracción indirecta obtenidas en el ensayo de sensibilidad al agua, tal como se recoge en la figura 10.

De estos resultados se deduce que existe una correlación relativamente elevada (coeficiente de correlación: 0,77) entre las pérdidas de partículas determinadas mediante el ensayo cántabro después de inmersión y las resistencias conservadas a tracción indirecta, aunque las primeras varían en un amplio margen, del 10% al 100%, haciéndolo la resistencia conservada en un rango menor, del 45% al 90%.

Los valores máximos de pérdida en el ensayo cántabro después de inmersión, exigidos en el PG-3 para evaluar la resistencia a la acción del agua de las mezclas monogranulares y drenantes, son de 25% y 35%, respectivamente. De acuerdo con la recta de regresión, estos límites de especificación equivalen aproximadamente al 82% y 77% de porcentaje de resistencia conservada a tracción indirecta.

Teniendo en cuenta que las mezclas M y PA son las que se emplean de forma más generalizada en las capas de rodadura de las carreteras de elevada intensidad de tráfico pesado (T00 a T2), y que poseen un elevado contenido de huecos, se propone establecer un mínimo de 90% de resistencia conservada para las mezclas tipo M y un 85% para la PA. Se hace necesario establecer este umbral para asegurar un buen comportamiento a la acción del agua, si bien ello supondría que, en algunos casos, se requiera el empleo de activantes de adhesividad para conseguir la resistencia conservada exigida. El coste adicional de incorporar entre 1 y 3 kilogramos de activante por tonelada de ligante no supone apenas aumento en el precio de una mezcla bituminosa que está fabricada con betún modificado con polímeros.

| REFERENCIA | TIPO BETÚN | % BETÚN | FILLER DE APORTACIÓN | ACTIVANTE, % s/ betún | ITSR % | CÁNTABRO HÚMEDO, % |
|------------|------------|---------|----------------------|-----------------------|--------|--------------------|
| PA12-1 | B 60/70 | 4,5 | - | | 58,5 | 90 |
| PA12-2 | B 60/70 | 4,5 | CEMENTO | - | 65,9 | 65,1 |
| PA12-3 | BM-3b | 4,5 | CEMENTO | - | 77,6 | 21,8 |
| PA12-4 | BM-3b | 4,5 | CEMENTO | 0,3 | 81,8 | 18,2 |
| PA12-5 | BM-3b | 5 | CEMENTO | - | 77,6 | 21,5 |
| PA12-6 | B 60/70 | 4 | CALIZO | - | 60,6 | 82 |
| PA12-7 | B 60/70 | 5 | CALIZO | - | 75,2 | 45,8 |
| PA12-8 | B 60/70 | 6 | CALIZO | - | 89,1 | 21,2 |
| PA12-9 | B 60/70 | 4 | ARCILLOSO | - | 48,7 | 96,6 |
| PA12-10 | B 60/70 | 5 | ARCILLOSO | - | 66,7 | 72,4 |
| PA12-11 | B 60/70 | 6 | ARCILLOSO | - | 80,7 | 28,5 |
| M8-1 | B 60/70 | 5 | CEMENTO | - | 66,7 | 24 |
| M8-2 | BM-3b | 5,5 | CEMENTO | - | 79,6 | 9,8 |
| M10-1 | B 60/70 | 5 | CEMENTO | | 68,1 | 52,6 |
| M10-2 | BM-3b | 5 | CEMENTO | - | 71,2 | 21,8 |
| M10-3 | B 60/70 | 4 | CALIZO | - | 60,4 | 49,5 |
| M10-4 | B 60/70 | 5 | CALIZO | - | 86,9 | 22,3 |
| M10-5 | B 60/70 | 6 | CALIZO | - | 87,6 | 10,9 |
| M10-6 | B 60/70 | 4 | ARCILLOSO | - | 43,3 | 95,8 |
| M10-7 | B 60/70 | 5 | ARCILLOSO | - | 58,3 | 55,4 |
| M10-8 | B 60/70 | 6 | ARCILLOSO | - | 87 | 16,5 |

TABLA 5. Resultados de los ensayos realizados sobre mezclas PA y M.

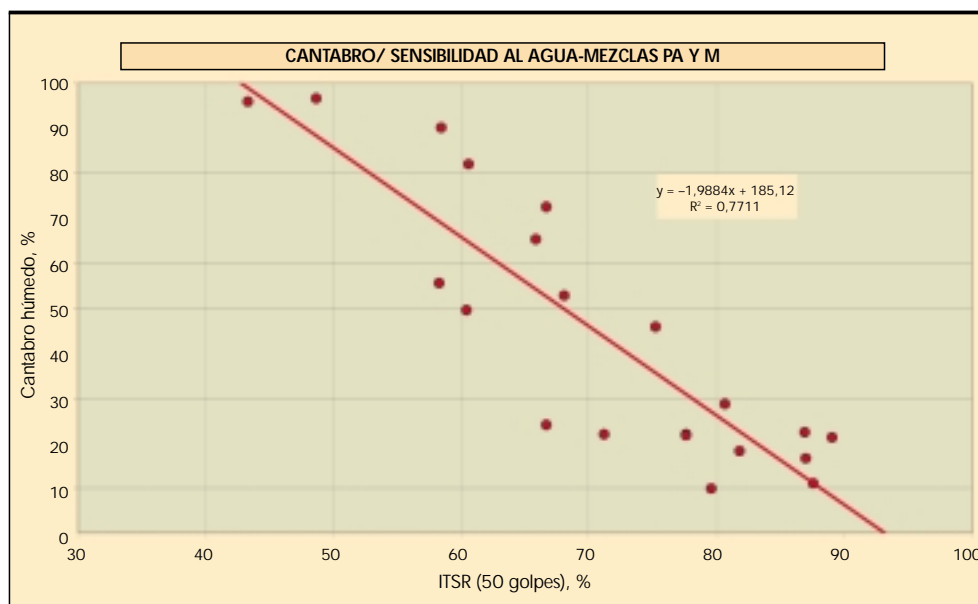


FIGURA 10. Correlación entre los ensayos de sensibilidad y cántabro.

5. CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados del estudio realizado para adaptar el ensayo de sensibilidad a la acción del agua a la normativa de nuestro país, pueden establecerse las siguientes conclusiones:

1. Dada la gran experiencia que existe en nuestro país en el empleo del método Marshall, se ha considerado que el procedimiento de compactación más adecuado para fabricar las probetas de sensibilidad al agua, es el compactador Marshall para las mezclas de tamaño máximo inferior a 22 mm.
2. Respecto a la energía de compactación, aunque la norma europea recomienda 25 golpes por cara para alcanzar la densidad de obra, se ha comprobado que esta energía es insuficiente para alcanzar, en las mezclas tipo D, S, G y F, el porcentaje de compactación del 97-98% respecto a la densidad de referencia. En las mezclas tipo PA y M tampoco se alcanza, con una compactación de 25 golpes por cara, el 97-98%, lo cual equivale aproximadamente al 2% de diferencia de huecos en mezcla respecto al establecido en la fórmula de trabajo, exigido en estos tipos de mezclas. Por tanto se recomienda que las probetas de los diferentes tipos de mezclas se compacten con 50 golpes por cara para realizar el ensayo de sensibilidad al agua.
3. Los resultados experimentales obtenidos en el ensayo de sensibilidad al agua indican que, tanto la resistencia a tracción indirecta de las probetas en seco, como después de su inmersión en agua, aumentan con el grado de compactación. Las resistencias a tracción indirecta de las mezclas D, S y G son ligeramente superiores a las de las mezclas tipo PA y M con menor proporción de árido fino y, por tanto, con una menor cohesión. Sin embargo no se observa una tendencia clara a aumentar el porcentaje de resistencia conservada a tracción indirecta al hacerlo el grado de compactación, tal como ocurre con las resistencias a tracción indirecta antes y después de inmersión en agua.
4. En las mezclas densas, semidensas y gruesas se ha comprobado que existe una relación significativa entre las resistencias conservadas determinadas por los métodos de inmersión-compresión y de sensibilidad al agua.
5. Respecto a las mezclas drenantes y monogranulares, en las cuales se evalúa su comportamiento a la acción del agua mediante el ensayo cántabro después de inmersión en agua, se ha comprobado que también existe una relación entre el resultado de dicho ensayo y la resistencia conservada a tracción indirecta.
6. En base a las rectas de regresión obtenidas y a las características específicas de cada uno de los tipos de mezclas, se establece como propuesta de resistencia conservada a tracción indirecta para las mezclas bituminosas tipo hormigón asfáltico D, S, G y MAM un valor mínimo comprendido entre 80-85%; para las mezclas bituminosas discontinuas F y M, un 90% y para las mezclas drenantes, un 85%.
7. Los límites de especificación propuestos deberían confirmarse con los obtenidos por las empresas al realizar el marcado CE de sus mezclas, si bien estos valores se deberían considerar como definitivos una vez evaluado el comportamiento a escala real de las mezclas bituminosas.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su gratitud a la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento por el apoyo prestado para la realización del estudio descrito en el presente artículo.

Asimismo se agradece a los señores A. Viñuales, H. Muñoz y E. Corrochano su colaboración en la parte experimental de los trabajos.