

COMPACTACIÓN DE PROBETAS Y DETERMINACIONES DE DENSIDAD

Baltasar Rubio Guzmán

Doctor en Ciencias Químicas. Centro de Estudios del Transporte.
CEDEX. Ministerio de Fomento.

Introducción

Las mezclas bituminosas que se emplearon inicialmente en nuestro país fueron las mezclas tipo hormigón bituminoso, que están constituidas por un esqueleto mineral de granulometría continua, donde las partículas menores van rellenando los huecos dejados por las partículas de mayor tamaño produciendo una estructura compacta con un contenido de huecos pequeño; por otra parte, el ligante bituminoso recubre las partículas de los áridos contribuyendo, también, a llenar los huecos existentes en el esqueleto mineral.

Las propiedades mecánicas de este tipo de mezclas son buenas, como consecuencia, por una parte, del rozamiento interno entre las partículas del esqueleto mineral y, por otra, de la cohesión entre las mismas debida al sistema formado por el ligante bituminoso y las partículas más finas de polvo mineral dispersas en él. El porcentaje de huecos de la mezcla compactada está comprendido entre 3 y 9 %, para permitir la dilatación térmica del ligante sin producir inestabilidad en la mezcla.

Estas mezclas se empezaron a fabricar en la década de los 50 con las granulometrías y los criterios de proyecto establecidos por el Instituto del Asfalto, pero posteriormente se han ido adaptando a las especiales características orográficas y condiciones climáticas de nuestro país. En el año 1.972 la Dirección General de Carreteras en el documento “Recomendaciones para el proyecto y ejecución de mezclas bituminosas altamente resistentes a la deformación”, eliminó las mezclas finas y aumentó la resistencia y rigidez de la mezclas mediante el empleo de mayores porcentajes de árido de machaqueo, betunes más duros y mayores relaciones polvo mineral/betún.

En el año 1.975 estas recomendaciones se actualizaron con la experiencia adquirida y se recogieron en el artículo 542 sobre “mezclas bituminosas en caliente” del Pliego General de Prescripciones para Obras de Carreteras PG-3 (Reglamentación técnica obligatoria en las carreteras del Estado) y en la Norma 6.1 IC de Proyecto de firmes flexibles.

Como novedades más importantes de esta normativa hay que destacar la inclusión de los ensayos de inmersión-compresión para evaluar la pérdida de cohesión por la acción del agua y del

MEZCLAS BITUMINOSAS

coeficiente de pulimento acelerado de los áridos para evitar el deslizamiento, así como la división del territorio español en zonas climáticas para establecer, en función de ella y de la intensidad del tráfico, los tipos de betún y polvo mineral, así como la relación polvo mineral/betún.

La preocupación creciente en la Dirección General de Carreteras por el confort y la seguridad vial se materializó, en lo que respecta a mezclas bituminosas para capas de rodadura, en la construcción en el año 1.980 de los primeros tramos experimentales de mezcla drenante.

Los resultados satisfactorios obtenidos en cuanto a la resistencia para soportar la acción del tráfico y las ventajas de este tipo de mezclas en cuanto a capacidad de evacuación de agua, bajo nivel sonoro, disminución de las proyecciones de agua, elevada macrotextura, etc.. provocó un rápido crecimiento del empleo de mezclas drenantes como capa de rodadura. Ante este crecimiento se elaboró en el año 1.987 una nota técnica con unas recomendaciones para regular su proyecto y aplicación.

Todas estas circunstancias motivaron la revisión y puesta al día de la normativa existente para mezclas bituminosas en caliente, que se hizo en la Orden Circular 299/89T aprobada el 23 de febrero de 1.989. En esta normativa, las novedades más destacables, son la inclusión de las mezclas drenantes, y el establecimiento del control de calidad. También se especificó el ensayo de pista de laboratorio para evaluar la resistencia a las deformaciones plásticas y se recomendó el empleo de betunes ligeramente más blandos y relaciones polvo mineral/betún algo inferiores para mejorar la resistencia a la fatiga.

Las mezclas discontinuas en capas delgadas se comenzaron a utilizar en España a mediados de los años 80 tanto en autopistas y carreteras de alta intensidad de tráfico, como en vías urbanas rápidas para mejorar la seguridad y confort de nuestros pavimentos. La textura superficial necesaria para mejorar la adherencia del neumático al pavimento se consigue con el empleo de áridos con elevada resistencia al pulimento y una granulometría discontinua con elevada proporción de gravilla 6/12. La resistencia mecánica de estas mezclas con reducida proporción de mortero se obtiene mediante el empleo de áridos duros y totalmente de machaqueo, una proporción elevada de polvo mineral, y un ligante con elevada cohesión, generalmente un betún modificado con polímeros. Su empleo se fue generalizando y en el 1997 la experiencia acumulada hizo que se recogieran en el artículo 543, “mezclas bituminosas discontinuas en caliente para capas de rodadura de pequeño espesor”, aprobado por la Orden Circular 322/97.

Las mezclas de alto módulo se comenzaron a emplear como capas de base en nuestro país después de su normalización en Francia en el año 1991. Estas mezclas se caracterizan por tener un elevado módulo de rigidez, al estar fabricados con un betún duro especial, y por una resistencia a la fatiga similar a la de una mezcla convencional. Las mezclas de alto módulo se diseñaron para evitar los fenómenos de fisuración provocados por las bases hidráulicas de grava-cemento en los denominados firmes semirrígidos, así como para el refuerzo de firmes. Aunque su uso no se ha generalizado en España, la experiencia adquirida hizo que la Dirección General de Carreteras

COMPACTACIÓN DE PROBETAS Y DETERMINACIONES DE DENSIDAD

normalizase su empleo al incluirlas en el artículo 542 de mezclas bituminosas en caliente al actualizar algunos artículos del PG-3 en la Orden Circular 5/2001 y en las normas 61-IC y 63-IC relativas a las secciones y rehabilitación de firmes publicadas en las ordenes FOM/3460/2003 y FOM/3459/2003, el 28 de noviembre del 2003.

Posteriormente, y tal como se indica en la propia orden FOM/891/2004, la evolución tecnológica en la construcción de capas de firmes y pavimentos, la experiencia acumulada en la aplicación de nuevos materiales y unidades de obra, así como la necesidad de aprovechamiento y/o reutilización de residuos, subproductos, materiales de demolición de firmes, pavimentos y hormigones, etc., tendente al ahorro de recursos naturales y a la minimización de los impactos ambientales, aconsejaron una revisión de los artículos correspondientes a capas de firmes y pavimentos de carretera y entre ellos se revisaron los artículos relativos a las mezclas bituminosas en caliente, que han estado en vigor hasta Julio del 2008.

La entrada en vigor, en abril de 2008, de la serie de normas europeas armonizadas EN 13108 relativas a las mezclas bituminosas en caliente, ha motivado la revisión de los artículos correspondientes del PG-3 para adaptarlos a la norma europea. En la normativa europea de mezclas bituminosas se establecen en las normas EN 12697, ensayos diferentes a los que se venían utilizando en España para determinar algunas propiedades, como es el caso, entre otros, de la resistencia a las deformaciones plásticas, la medida de los módulos, las resistencias a la fatiga y a la acción del agua. La Orden Circular 24/2008, de 30 de Julio de 2008, revisa nuevamente los artículos de mezclas bituminosas en caliente para adaptarlos a las normas europeas que entraron en vigor en marzo del 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 prescripciones sobre sensibilidad al agua, y 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.

MEZCLAS BITUMINOSAS

Estas novedades se van a discutir durante esta Jornada Técnica y en esta comunicación nos referiremos únicamente a las novedades relativas a la fabricación y compactación de probetas, así como a la determinación de densidades. El empleo de nuevos métodos de ensayo para caracterizar y controlar la calidad de las mezclas bituminosas, lleva implícito el empleo de nuevos procedimientos de fabricación y compactación de las probetas, y la determinación de las densidades también ha experimentado algunas variaciones, lo que justifica la conveniencia de tratarlos en esta Jornada.

En esta exposición se revisan los métodos generales de compactación recogidos en las normas europeas para la fabricación de las diferentes probetas, así como los métodos de ensayo europeos recogidos en el PG-3/2008 para proyectar y controlar las mezclas bituminosas, indicando brevemente las características del ensayo y los procedimientos de compactación seleccionados para la fabricación de probetas, justificando la selección de los métodos de compactación establecidos en nuestra normativa.

Para ello, en primer lugar se revisan los métodos de compactación y a continuación las determinaciones de densidades, porque son la base de los análisis volumétricos empleados en el estudio del proyecto de la mezcla, en el establecimiento de la densidad de referencia para establecer el sistema de compactación en el tramo de prueba, y para realizar el control de calidad de la puesta en obra de la mezcla bituminosa. Finalmente se resumen cada uno de los ensayos de caracterización y/o control exigidos en los artículos 542 y 543 del PG-3.

Compactación de las Probetas de Ensayo. Métodos Europeos

La compactación es un proceso importante en la puesta en obra de las mezclas bituminosas que permite aumentar la densidad de la mezclas y disminuir el contenido de huecos. La compactación tiene una notable influencia sobre las propiedades mecánicas y el comportamiento de las mezclas bituminosas; ya que al compactar se aumenta el contacto entre las partículas de los áridos envueltos con el ligante, aumentando el rozamiento interno, con el consiguiente aumento de la estabilidad y resistencia a la deformación de la mezcla bituminosa.

En el laboratorio se realiza la fabricación y compactación de las probetas de ensayo tanto para el proyecto y dosificación de las mezclas bituminosas, como para evaluar sus propiedades y su probable comportamiento en obra; pero también se preparan probetas con mezclas bituminosas procedentes de centrales de fabricación (plantas asfálticas) para realizar el control de calidad de la fabricación y puesta en obra, así como para establecer algunos de los criterios de aceptación y rechazo de la correspondiente unidad de obra.

La revisión de los artículos 542 y 543 de nuestro PG-3, mediante Orden Circular 24/2008 de 30 de Julio de 2008, ha recogido los cambios necesarios para adaptar nuestra normativa y especificaciones a la normativa europea de mezclas bituminosas en caliente. Ello ha

COMPACTACIÓN DE PROBETAS Y DETERMINACIONES DE DENSIDAD

obligado a la inclusión de nuevos ensayos recogidos en la serie de normas europeas EN 12697. Estos métodos de ensayo, en algunos casos englobaron los de los diferentes países, pudiendo elegirse entre varias posibilidades o procedimientos de ensayo, así como de procedimientos de preparación de las probetas de ensayo, lo que ha obligado a cada país a establecer las condiciones de fabricación de las probetas y el procedimiento de ensayo. Además de estas normas de ensayo (EN 12697), ha habido que tener en cuenta las normas de especificaciones (EN 13108) y en especial la parte 20 de esta norma denominada “ensayos de tipo” en la que se especifican los métodos de fabricación y compactación de las probetas de ensayo.

A continuación exponemos brevemente los métodos generales de compactación recogidos en las normas europeas para la fabricación de las diferentes probetas de mezclas bituminosas.

En la serie de normas UNE-EN 12697 se recogen cuatro métodos de compactación para las probetas de ensayo que son los siguientes:

Preparación de la muestra mediante compactador de impactos, UNE-EN 12697-30

Este procedimiento es aplicable a mezclas bituminosas fabricadas en laboratorio como en central de fabricación siempre que el tamaño del árido no sea mayor de 22,4 mm.

El método de compactación es similar al descrito en la norma española NLT-159 denominada “Resistencia a la deformación plástica de mezclas bituminosas empleando el aparato Marshall”, si bien existen algunas diferencias.

Para mezclas fabricadas con betún de penetración, la temperatura de compactación está establecida en la norma UNE-EN 12697-35; para mezclas producidas con betunes modificados con polímeros, la temperatura de compactación vendrá definida por el suministrador. En la norma NLT, las temperaturas de mezcla y compactación serán las necesarias para que su viscosidad sea de (170 ± 20) cSt en el proceso de mezcla y (280 ± 30) cSt en el proceso de compactación. Ello puede dar lugar en algunos casos a pequeñas diferencias; sin embargo es necesario señalar que hay una propuesta para que se incorpore la posibilidad de utilizar las viscosidades para determinar las temperaturas en la norma EN-12697-35.

La norma EN define las características y dimensiones para dos tipos de compactadores de impacto: uno de “yunque de acero” y otro de “pedestal de madera”, mientras que la NTL solo especifica el último.

La norma UNE-EN 12697-30 exige que haya un dispositivo para contar y registrar los golpes, y como opcional, se puede añadir un dispositivo automático de medida del espesor y altura de la probeta durante el proceso de compactación.

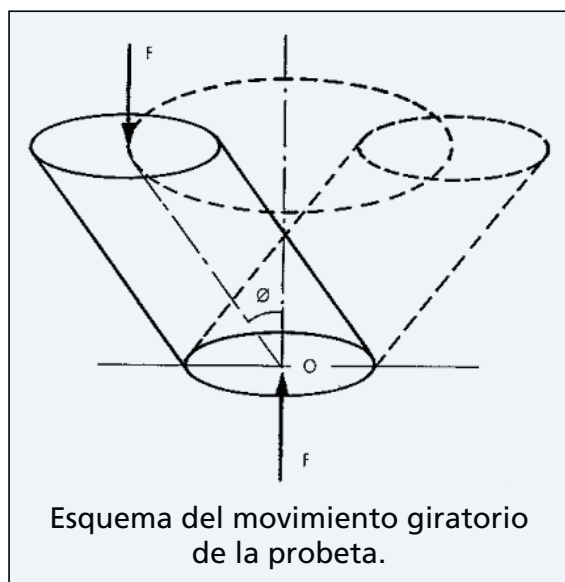
MEZCLAS BITUMINOSAS

En esta norma se especifica que el número de golpes para fabricar las probetas sea de 50 por cara; sin embargo la norma UNE-EN 13108-20 en el anexo C (normativo) se especifican, en la tabla C1, diferentes energías de compactación, pudiendo emplearse cuatro niveles correspondientes a 25, 50, 75 y 100 golpes por cara.

En definitiva el método es similar al utilizado anteriormente en nuestro país y permite compactar con diferentes energías, tal como se aplica en España con las mezclas tipo hormigón bituminoso y con las drenantes o discontinuas en capa delgada. La gran experiencia existente en nuestro país aconseja que la compactación por impacto se continúe empleando como método básico de fabricación de probetas, tanto para la dosificación como para el control de las mezclas bituminosas.

Preparación de la muestra mediante compactador giratorio, UNE-EN 12697-31

Este procedimiento es aplicable a mezclas bituminosas fabricadas en laboratorio como en central de fabricación. La compactación de probetas se efectúa mediante las acciones combinadas de un esfuerzo cortante producido por el movimiento del eje de la probeta que describe un movimiento cónico y una fuerza resultante axial aplicada por un cabezal mecánico, tal como se indica a continuación:



Este procedimiento es aplicable a mezclas bituminosas siempre que el tamaño del árido no sea mayor de 31,5 mm y se puede utilizar para determinar la evolución de la densidad o del contenido de huecos con el número de giros o para fabricar probetas para ensayo de propiedades mecánicas. Para determinar el contenido de huecos se mide la altura de la probeta para distintos números de giros y para fabricar probetas de ensayo se detiene la compactación cuando se alcance la altura deseada a una densidad prefijada. En ambos casos la presión aplicada es de 0,6MPa, el ángulo giratorio interno efectivo debe ser de $0,82^\circ$ y la velocidad de giro de 30 rpm.

En este método de ensayo no se especifica el número de giros para compactar las probetas para los ensayos mecánicos, pero la norma UNE-EN 13108-20 en el anexo C (normativo) especifica en la tabla C1 diez diferentes energías de compactación, aplicando entre 10 y 240 giros.

Este procedimiento fue desarrollado en Francia y es de uso habitual en este país, así como en los Estados Unidos al incorporarse como sistema de compactación del sistema SUPERPAVE. En

COMPACTACIÓN DE PROBETAS Y DETERMINACIONES DE DENSIDAD

España las experiencias con este compactador son escasas, aunque el CEDEX y la escuela de Caminos de la Universidad de Madrid realizaron experiencias con la máquina giratoria de ensayo del Departamento del Transporte de Tejas (se fijaba la tensión y el ángulo giratorio inicial y se seguía el crecimiento del ángulo giratorio y la evolución de la tensión) para evaluar la resistencia a las deformaciones plásticas.

Compactación en laboratorio de mezclas bituminosas mediante compactador vibratorio, UNE-EN 12697-32

Este procedimiento es aplicable a mezclas bituminosas fabricadas en laboratorio o en central de fabricación, así como para remoldear testigos con objeto de determinar la densidad de rechazo.

La compactación vibratoria se realiza mediante un martillo vibratorio eléctrico provisto de dos pisones metálicos de 102 y 146 mm de diámetro, tal como se muestra a continuación:



La compactación vibratoria se realiza con el pisón pequeño en distintas posiciones del molde aplicando 10 segundos de vibración en cada posición hasta totalizar 120 segundos. A continuación se acopla el pisón grande y se acciona el martillo unos segundos para eliminar las irregularidades existentes en la superficie de la probeta. La compactación se realiza por ambas caras de la probeta.

En nuestro país no se tenía experiencia con este método de compactación para mezclas bituminosas; pero si con un método similar de compactación con martillo vibrante de materiales granulares tratados, descrito en la norma NLT-310. En cualquier caso es un método sencillo que se puede realizar en el laboratorio de la propia planta de fabricación de mezcla bituminosa.

MEZCLAS BITUMINOSAS

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.



Dispositivo de compactación mediante rodillo de acero.

COMPACTACIÓN DE PROBETAS Y DETERMINACIONES DE DENSIDAD

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 aumenta 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. A continuación se muestran unas fotografías de uno de los compactadores existentes en el mercado.

En nuestro país no se tenía experiencia con este método de compactación para mezclas bituminosas; pero hubo que adquirirla por ser en la práctica el único método que permitía compactar probetas para el ensayo de pista UNE-EN 12697-22 (método B al aire).

Determinaciones de densidad

En la normativa europea UNE-EN 12697 en la que se recogen los métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente, hay cuatro métodos para determinar las densidades, que se indican a continuación:

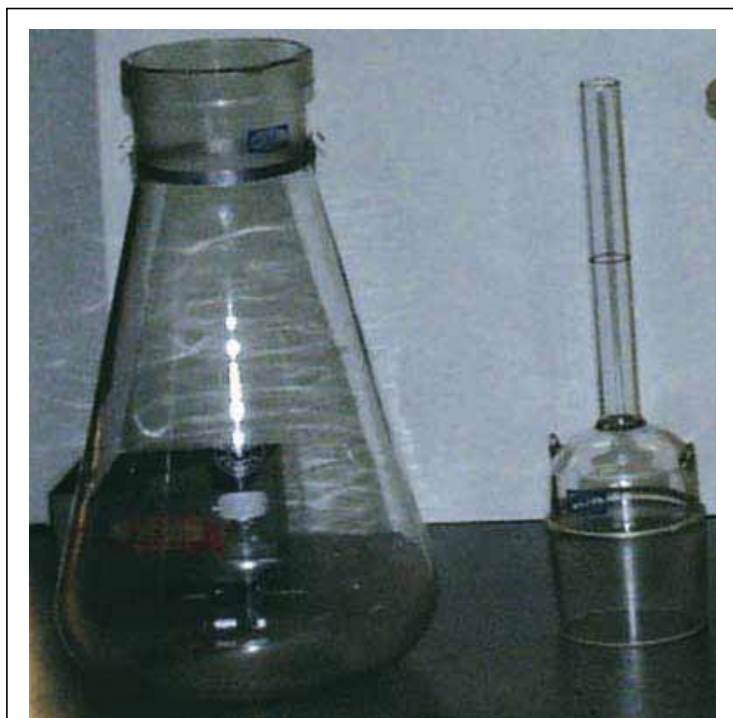
- UNE-EN 12697-5.- Determinación de la densidad máxima.
- UNE-EN 12697-6.- Determinación de la densidad aparente de probetas por el método hidrostático.
- UNE-EN 12697-7.- Determinación de la densidad aparente de probetas mediante rayos gamma.
- UNE-EN 12697-9.- Determinación de la densidad de referencia.

Teniendo en cuenta que la determinación de la densidad mediante rayos gamma no se utiliza en España y que el método de determinación de la densidad de referencia se refiere a los métodos de compactación posibles para determinar estas densidades, nos referiremos únicamente a los dos primeros.

Determinación de la densidad máxima, UNE-EN 12697-5

Este procedimiento de ensayo no se especifica explícitamente en los artículos 542 y 543 del PG-3; pero su determinación es necesaria para determinar las propiedades volumétricas de la mezcla y más concretamente para calcular los contenidos de huecos en mezcla y en áridos que se exigen en los citados artículos. Esta norma recoge tres procedimientos de ensayo para la determinación de la densidad máxima de una mezcla bituminosa disgregada. Cuando no se disponga de mezcla disgregada, como es el caso de probetas o testigos, hay que calentar y disgregar la mezcla en sus partículas individuales, permitiéndose aglomeraciones de mortero inferiores a 6 mm.

El primero, denominado A, es un procedimiento volumétrico similar a la determinación de la densidad relativa de los áridos en aceite de parafina (NLT-167); pero utilizando agua o disolvente en lugar del aceite de parafina. Para eliminar el aire se puede utilizar un agente dispersante y la aplicación de vacío de hasta 4 KPa durante 15 minutos. El volumen de la muestra se mide como el desplazamiento de agua efectuado por la muestra en un picnómetro tarado y a temperatura constante, tal como se muestra a continuación.



Picnómetro para la determinación de la densidad máxima de una mezcla.

El segundo, denominado B, es un procedimiento hidrostático similar al método para determinar la densidad aparente de los áridos, es decir calculando el volumen de la muestra determinando la masa de la muestra sumergida en agua.

El último, denominado C, es un procedimiento matemático basado en las densidades de cada una de las fracciones de los áridos y del betún y en las composiciones relativas de cada uno de ellos en la mezcla. Este método es el que estaba vigente en nuestro país para determinar lo que se denominaba densidad máxima teórica.

Aunque en el anexo de la norma UNE-EN 12697-5 se recogen unas directrices generales para seleccionar el procedimiento de ensayo más idó-

neo, la norma UNE-EN 13108-20, sobre ensayos de tipo, en el anexo D.2 indica explícitamente que se debe de emplear el procedimiento A, que se corresponde con el método volumétrico. En consecuencia, este es el método que debe aplicarse para determinar la densidad máxima de la mezcla y que debe utilizarse para determinar los huecos en mezcla y en áridos que se exigen en los artículos 542 y 543.

Determinación de la densidad aparente por el método hidrostático, UNE-EN 12697-6

Esta norma describe los métodos de ensayo para la determinación de la densidad aparente de una probeta bituminosa compactada fabricada en laboratorio o con probetas procedentes de testigos extraídos del propio pavimento.

En ella se describen cuatro procedimientos de ensayo: densidad aparente en seco, densidad con superficie saturada seca, densidad aparente con probeta impermeabilizada, densidad aparente por dimensiones.

Aunque en el anexo A de esta norma se indican unas directrices generales para seleccionar el procedimiento de ensayo más idóneo, la norma UNE-EN 13108-20, sobre ensayos de tipo, en los anexos B.1 y B.2 indica que la densidad aparente de las probetas se determine mediante el procedimiento B del método EN 12697-6 (procedimiento de la superficie saturada seca) si el contenido de huecos en mezcla es menor del 7%, con el procedimiento C (probeta impermeabilizada con parafina) si los huecos están comprendidos entre el 7% y el 10% , y con el procedimiento D (densidad aparente por dimensiones) si el contenido de huecos en mezcla es mayor o igual al 10%.

Ello significa que en las mezclas tipo hormigón bituminoso se determinará generalmente la densidad aparente por el procedimiento de la superficie saturada seca, como se ha realizado hasta ahora, pero en algunas de las mezclas tipo G utilizadas en capas de base podría ser necesario utilizar la densidad aparente de probetas impermeabilizadas con parafina. En las mezclas discontinuas en capas delgadas BBTM B y mezclas drenantes PA se debe utilizar la densidad aparente por dimensiones, mientras que las discontinuas tipo BBTM A se utilizará normalmente densidad aparente por el procedimiento de la superficie saturada seca, salvo que el contenido de huecos sea mayor del 7%.

La densidad es un parámetro muy importante tanto en la fabricación como en la puesta en obra de las mezclas bituminosas y a ella hacen referencia repetidas veces los artículos 542 y 543, que recogemos a continuación:

- Se exige una densidad mínima a alcanzar en la fórmula de trabajo (apartado 5.1 de los artículos 542 y 543).
- Las probetas de pista preparadas mediante compactador de placa deberán tener una densidad superior a las probetas preparadas por impacto con 75 golpes por cara o a las preparadas por compactación vibratoria con 120 s por cara (apartado 5.1.3 de los artículos 542 y 543).
- Se exige en especificaciones de la unidad terminada que la densidad no será inferior al 97 ó 98 % de la densidad de referencia (apartado 7.1 de los artículos 542 y 543).

MEZCLAS BITUMINOSAS

- En el control de puesta en obra se toman muestras de mezcla bituminosa y se fabrican probetas por impacto con 75 golpes por cara, o por compactación vibratoria con 120 s por cara, determinándose la densidad aparente. En el caso de las mezclas drenantes y discontinuas las probetas se compactan por impacto con 50 golpes por cara. El valor medio de los cuatro últimos valores de cada lote es la “*densidad de referencia*” (apartado 9.3.2.1 de los artículos 542 y 543).
- En el control de recepción de la unidad terminada se extraerán testigos, en número no inferior a 5, y se determinará su densidad (apartado 9.4 de los artículos 542 y 543).
- En los criterios de aceptación se exige que la densidad media no sea inferior a la de referencia y que no más de tres individuos presenten valores individuales que bajen en más de dos puntos de la de referencia (apartado 10.1 de los artículos 542 y 543).

Además de estas referencias, la densidad se necesita para el cálculo de huecos de la mezcla bituminosa, lo que acrecienta la importancia de este parámetro en la fabricación y puesta en obra de las mezclas bituminosas.

Ensayos de caracterización y/o control de las mezclas bituminosas

Como se ha indicado anteriormente, las revisiones de los artículos 542 y 543 relativos a las mezclas bituminosas en caliente han tenido por objeto adaptar las especificaciones españolas a la nueva normativa europea, lo que ha obligado a especificar nuevos ensayos para la evaluación y caracterización de las mezclas bituminosas. En este apartado se describen brevemente cada uno de los ensayos de caracterización y/o control exigidos en los citados artículos, indicando los procedimientos de compactación seleccionados para la fabricación de probetas, y la justificación de su elección.

Determinación del contenido de huecos, UNE-EN 12697-8

La norma UNE-EN 12697-8, en el apartado 1, indica que el procedimiento tiene por objeto calcular dos características volumétricas de una probeta bituminosa compactada, el contenido de huecos de aire (V_m) y el contenido de huecos rellenos con ligante existentes en el árido mineral (VFB). No hace referencia explícita a los huecos en áridos si bien aparece definidos en el cálculo.

El método es adecuado para probetas que sean compactadas en laboratorio, o para probetas que procedan de testigos extraídos del pavimento. En este método hay que reseñar que la densidad máxima que se debe emplear es la obtenida con el procedimiento A, que se corresponde con el método volumétrico de la norma UNE-EN 12697-5.

COMPACTACIÓN DE PROBETAS Y DETERMINACIONES DE DENSIDAD

Estas características volumétricas se utilizan para establecer criterios de diseño de mezclas bituminosas en caliente (artículos 542 y 543 de PG-3), o como parámetros para evaluar la mezcla después de ser colocada y compactada en la carretera.

El contenido de huecos en mezcla se especifica en los apartados 5.1.2 de los artículos 542 y 543 como criterio básico para dosificar el contenido de ligante y establecer la correspondiente fórmula de trabajo. En el apartado 5.1.1 se especifica el contenido de huecos a alcanzar en la fórmula de trabajo para las mezclas PA y BBTM B. En el artículo 543 para las mezclas PA y BBTM B, se exige en el apartado 7.1, como control de recepción el porcentaje de huecos, en el apartado 9.4 se especifica un contenido de huecos de referencia para la unidad terminada y en el apartado 10.1 se establece el contenido de huecos como criterio de aceptación o rechazo.

La compactación de las probetas para el cálculo de huecos se especifica que se hagan mediante el compactador de impactos (UNE-EN 12697-30) con 75 golpes por cara para las mezclas tipo hormigón bituminoso (densas AC D, semidensas AC S, gruesas AC G y de alto módulo AC MAM) y con 50 golpes por cara para las mezclas drenantes PA, y discontinuas BBTM A y BBTM B. De esta manera no se ha modificado prácticamente el criterio existente para la fabricación y compactación de las probetas.

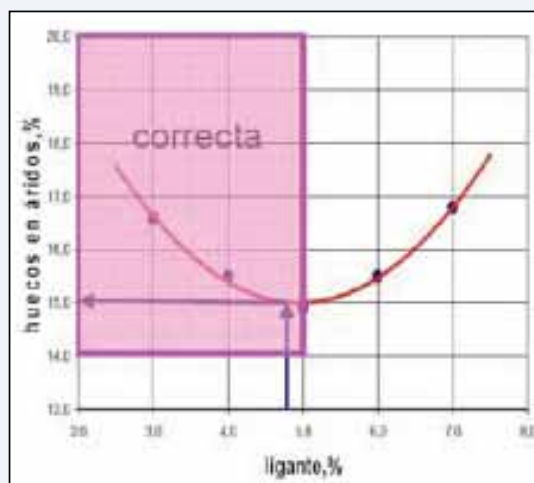
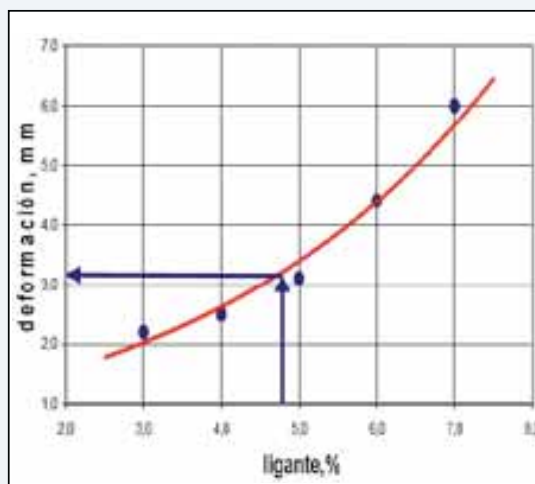
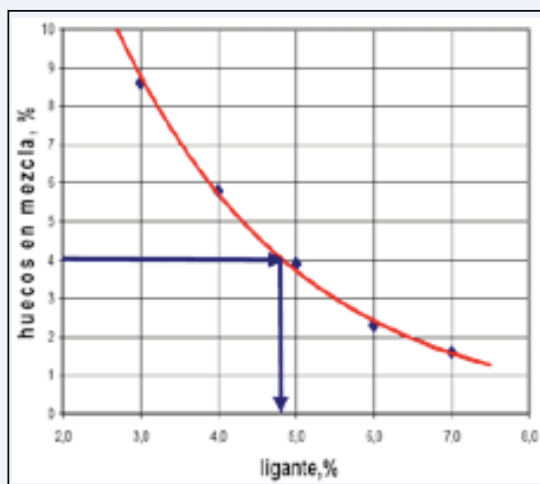
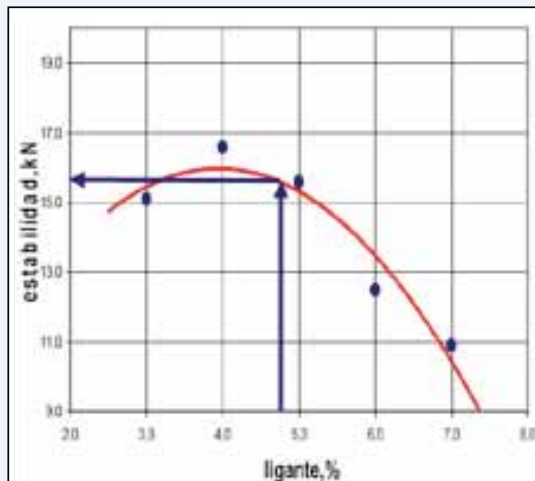
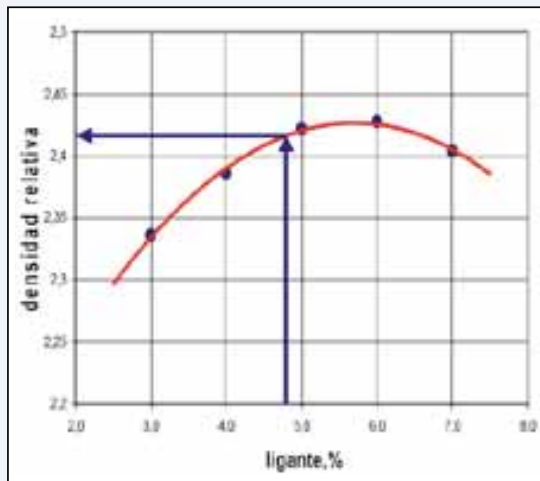
Cuando el tamaño nominal D de las mezclas bituminosas es superior a 22mm, caso de las mezclas AC32 S y AC32 G, no permite la citada norma compactar las probetas. Entonces había dos opciones: compactador vibratorio o giratorio y se eligió el primero porque la propia norma de ensayo establece el tiempo total de compactación en 120 segundos por cara y por la similitud con martillo el martillo vibrante para compactar materiales granulares tratados, con el cual teníamos experiencia.

El contenido de huecos en áridos no se exige en PPTG; pero se deja abierta la posibilidad de incluirlo en el PPTP o a juicio del Director de las Obras, porque según la norma UNE-EN 13108-1 apartado 5.3.6, no se puede exigir junto con la resistencia a las deformaciones plásticas por que considera que ello supone una sobreespecificación. En nuestra opinión este es un parámetro fundamental en las mezclas tipo hormigón bituminoso y debería exigirse un mínimo para evitar problemas de falta de estabilidad en este tipo de mezclas que son muy sensibles al contenido de ligante.

En relación a la dosificación de ligante de las mezclas tipo hormigón bituminoso, hay que señalar que estas mezclas se dosificaban mediante el análisis de huecos y la resistencia a las deformaciones plásticas empleando el método Marshall, pero con la entrada en vigor de la normativa europea y el marcado CE se han eliminado tanto la estabilidad como la deformación Marshall en las mezclas bituminosas para carreteras, y por ello en el nuevo artículo se han eliminado ambos parámetros. Entendemos que aunque no se exija la estabilidad y deformación Marshall el procedimiento sigue siendo aplicable sin estos dos parámetros y en cualquier caso recomendamos que, puesto que es necesario fabricar las probetas, se continúen determinando la estabilidad y la deformación.

MEZCLAS BITUMINOSAS

A continuación se expone un ejemplo práctico y se describe dicho procedimiento:



Ejemplo de dosificación de ligante mediante el método Marshall.

COMPACTACIÓN DE PROBETAS Y DETERMINACIONES DE DENSIDAD

- 1º) En primer lugar se analiza la curva de huecos en áridos frente al contenido de ligante. Se consideran inadecuadas las curvas que presentan grandes pendientes, por ser muy susceptible la mezcla a las variaciones del contenido de ligante, y las que siendo planas se encuentran en el límite del valor especificado. En estos casos es necesario desechar la granulometría ensayada y estudiar una nueva curva granulométrica.

El contenido de huecos en áridos puede aumentarse alejando la curva granulométrica de la línea de máxima densidad, disminuyendo el porcentaje de polvo mineral y/o empleando áridos de textura más rugosa y con mejor forma.

- 2º) Una vez que la curva de huecos en áridos se considera aceptable, se toma como dato de partida el valor de huecos en mezcla más adecuado para las condiciones de proyecto, y mediante la curva huecos en mezcla frente al contenido de ligante se determina un contenido de ligante.
- 3º) Con este contenido de ligante se comprobará si el valor de la deformación está comprendido dentro de los límites establecidos y si el contenido de huecos en áridos corresponde a la rama descendente de la curva para evitar problemas de inestabilidad de la mezcla.
- 4º) Comprobar que con este contenido de ligante se obtiene la estabilidad requerida y que la relación polvo mineral betún está dentro de los límites establecidos.
- 5º) Si todos los parámetros cumplen las especificaciones, este contenido de ligante se considera como el óptimo.

Finalmente se comprueba que con este contenido óptimo la mezcla tiene una buena resistencia a las deformaciones plásticas y a la acción del agua, mediante los ensayos de Pista de Laboratorio (UNE-EN 12697-22) y de sensibilidad al agua (UNE-EN 12697-12).

Las mezclas discontinuas en capa delgada BBTM A y BBTM B se dosifican también con este método, si bien son menos sensibles al contenido de ligante, obteniéndose curvas mas planas y generalmente no presentan problemas con los huecos en áridos.

Ensayo de pista de laboratorio, 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

MEZCLAS BITUMINOSAS

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 optativas 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 muestra una fotografía del dispositivo de ensayo.



Dispositivo de ensayo en pista de laboratorio.

COMPACTACIÓN DE PROBETAS Y DETERMINACIONES DE DENSIDAD

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: 700N

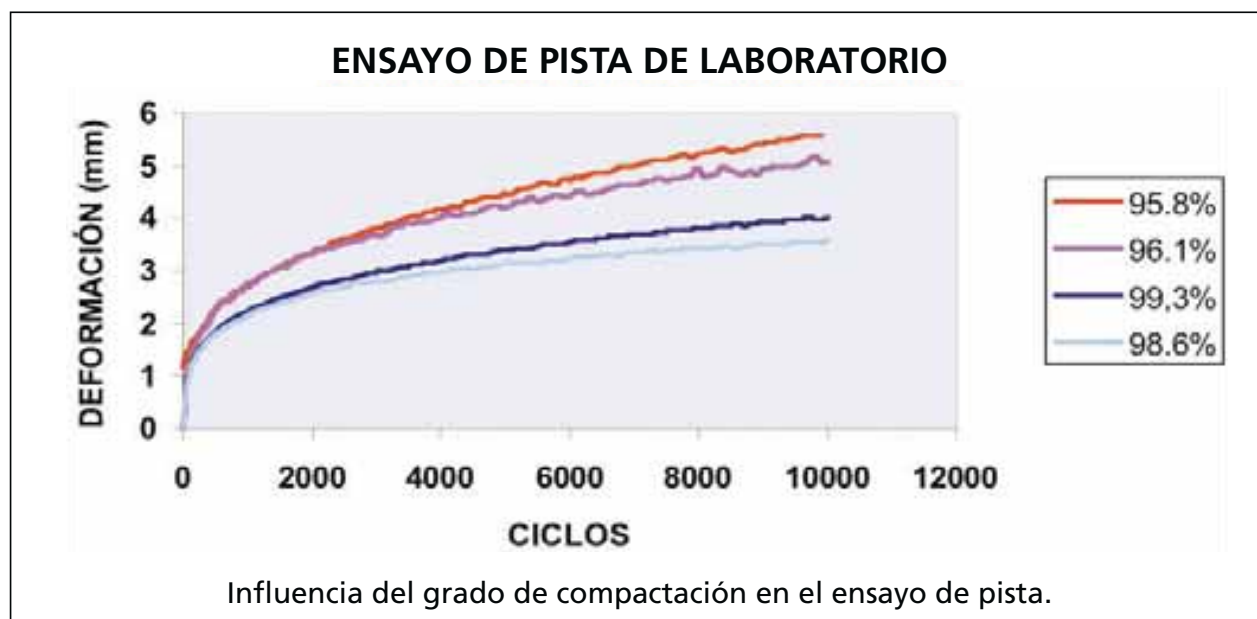
Frecuencia rodada: 26,5 ciclos/min

Temperatura: 60 °C

Duración: 10.000 ciclos.

Como resultado del ensayo se determina, a partir de la curva de deformación-tiempo, la pendiente media del ensayo en pista (WTSAIR) 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 rodera, en mm, así como el porcentaje de deformación de la rodera (PRDAIR), 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.

Respecto a la compactación existen en el mercado 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. El método 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 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.



MEZCLAS BITUMINOSAS

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 el gráfico anterior.

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.

La norma EN, para este dispositivo, establece que el espesor de la probeta sea igual al espesor de la mezcla que se vaya a extender en la carretera y si se aplicara la mezcla en varios espesores se haga en función del tamaño máximo del árido, estableciendo para las mezclas bituminosas de tamaño máximo entre 8 y 16 mm el espesor de la probeta en 40 mm, para las mezclas entre 16 y 22 mm (ambos incluidos) el espesor debe ser de 60 mm y 80 mm de espesor de la probeta para las mezclas con tamaño máximo superior a 22 mm. Se exige un periodo de acondicionamiento mínimo de 4 horas si el espesor es menor o igual a 60 mm y de 6 horas si dicho espesor es superior a este valor.

El ensayo de resistencia a la deformación permanente se especifica como requerimiento general de las mezclas bituminosas recogidas en la norma EN 13108-1 relativa a los hormigones asfálticos, pero no es un requisito mandado para las mezclas bituminosas discontinuas en capas delgadas. En el apartado 5.1.3 del artículo 542 se especifica la pendiente media de deformación en pista como criterio básico para dosificar el contenido de ligante y establecer la correspondiente fórmula de trabajo, mientras que para las mezclas discontinuas se indica en el apartado 5.1.3 del artículo 543 que es el PPTP o el Director de las Obras quien podrá exigir esta característica, ya que es el único ensayo de estabilidad mecánica para este tipo de mezclas.

En el apartado 9.3.1 de los artículos 542 y 543 sobre control de calidad de la fabricación se especifica que si las mezclas no disponen de marcado CE se realicen ensayos de pista de laboratorio.

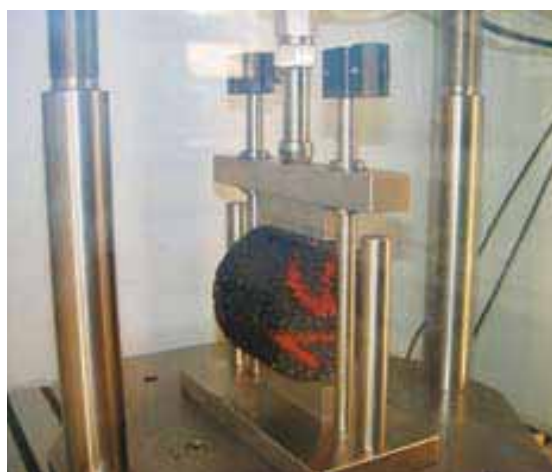
Sensibilidad al agua, UNE-EN 12697-12

El método de ensayo de determinación de la sensibilidad al agua de las mezclas bituminosas (UNE-EN 12697-12), tiene por objeto determinar la pérdida de cohesión que se produce por la saturación y acción del agua en las mezclas bituminosas. Se evalúa mediante 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.

COMPACTACIÓN DE PROBETAS Y DETERMINACIONES DE DENSIDAD

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

A continuación se muestran unas fotografías del dispositivo de saturación y de la rotura a tracción indirecta de las probetas.



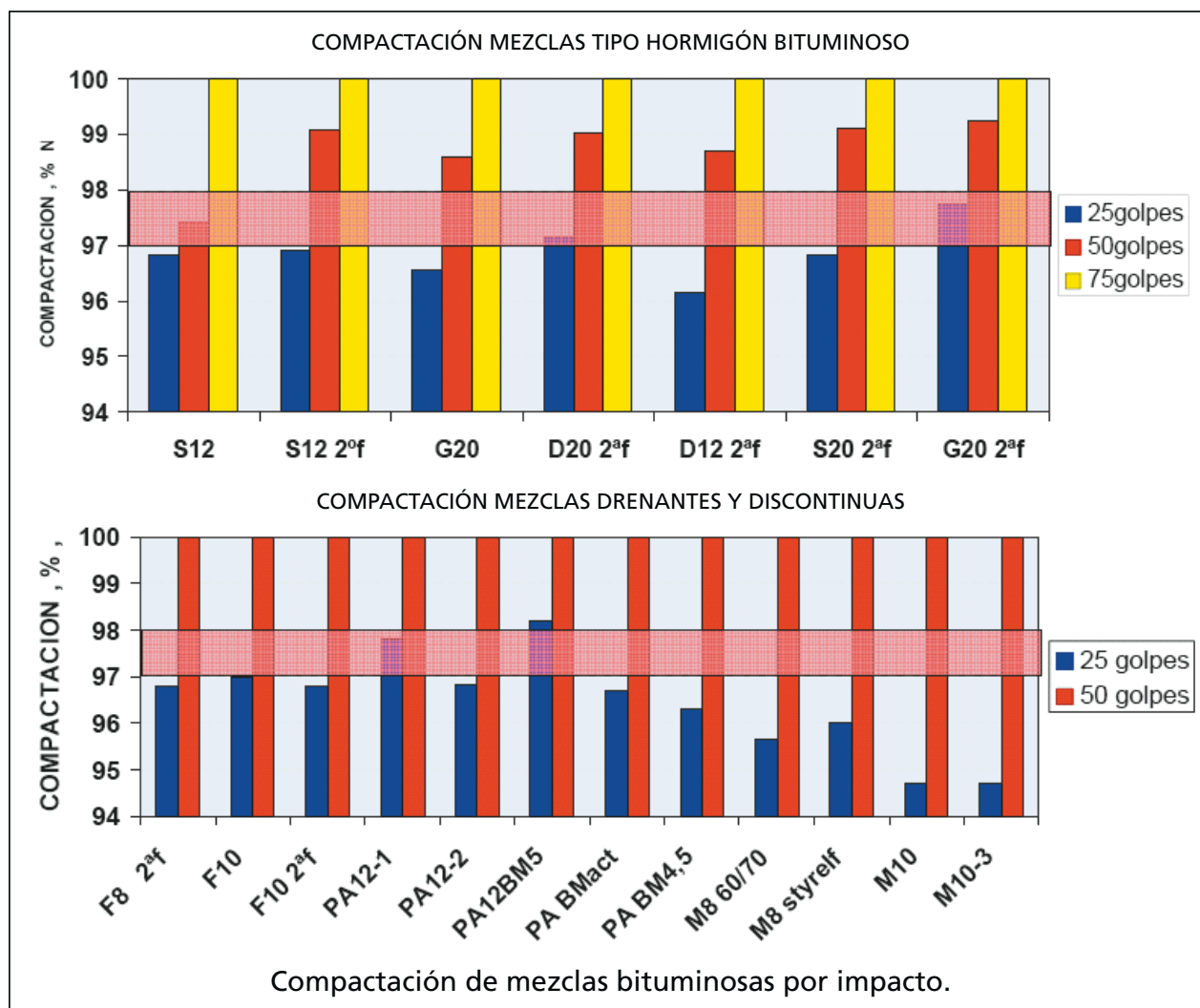
Dispositivos de saturación y rotura de las probetas.

Respecto a la compactación de las probetas, se permite la compactación con los métodos de impacto, giratorio, vibratorio y de placas, 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.

De estos cuatro procedimientos de compactación recogidos en esta norma, se ha elegido la compactación por impacto, debido a dos razones fundamentales; la primera porque en nuestro país tenemos una gran experiencia con este método y la segunda por emplearse dicha densidad como referencia para evaluar el grado de compactación obtenido en obra.

Para determinar el nivel de energía para obtener una densidad similar a la alcanzada por la mezcla bituminosa en obra se han fabricado probetas por impacto según la norma UNE-EN 12697-30 con diferentes energías. En el caso de las mezclas tipo hormigón bituminoso se han fabricado series de probetas con 75, 50 y 25 golpes, mientras que las mezclas discontinuas en capa delgada y las mezclas drenantes se han compactado con 50 y 25 golpes por cara. A continuación en las gráficas se muestran los resultados:

MEZCLAS BITUMINOSAS



De estos resultados se observa que para la mayoría de las mezclas bituminosas ensayadas, no se alcanza, con 25 golpes por cara, una compactación superior al 97-98% de la de referencia, por lo que se elige como energía de compactación 50 golpes por cara. En el caso de las mezclas que tienen un tamaño nominal D superior a 22 mm se deberán compactar siguiendo el método de compactación vibratoria descrito en UNE-EN 12697-32, tal como se hace para determinar la densidad de referencia pero aplicando un tiempo total de compactación de 80 segundos por cara.

El ensayo de sensibilidad al agua se especifica como requerimiento para todos los tipos de mezclas bituminosas. En España en el apartado 5.1.4 de los artículos 542 y 543 se especifica igualmente la resistencia conservada de tracción indirecta después de inmersión como criterio básico para dosificar el contenido de ligante y establecer la correspondiente fórmula de trabajo.

El índice de resistencia conservada a tracción indirecta (ITSR) de las probetas mantenidas al aire y después de inmersión en agua, para las mezclas tipo hormigón bituminoso será su-

COMPACTACIÓN DE PROBETAS Y DETERMINACIONES DE DENSIDAD

perior al 80% para las capas de base e intermedia y del 85% para las de rodadura. Para las mezclas discontinuas y drenantes se exigirán índices del 90 y 85%, respectivamente.

Módulos y fatiga, UNE-EN 12697-26 y UNE-EN 12697-24

El módulo dinámico y la fatiga son dos características funcionales de las mezclas bituminosas recogidas en la norma europea UNE-EN 13108-1 como propiedades fundamentales.

Módulo de rigidez

El módulo de rigidez se puede determinar mediante ensayos dinámicos de flexión (con 2, 3 y 4 puntos de fijación), compresión diametral y tracción indirecta uniaxial (tracción-compresión y tracción), tal como se indica en la norma europea UNE-EN 12697-26; pero no contempla ningún procedimiento de compresión simple dinámica con control de carga, tal como se recoge en nuestra norma NLT-349.

Por tanto, España tenía que seleccionar uno de los ocho procedimientos reseñados en la norma europea para incluirlo en sus especificaciones. Del análisis de las ventajas e inconvenientes de cada uno de ellos, uno de los procedimientos que parece más práctico es el de medida del módulo por compresión diametral (anexo C), porque permite el empleo de probetas cilíndricas de 100 mm de diámetro compactadas por impacto, como las utilizadas para el cálculo de huecos y de sensibilidad al agua, y además se podrían utilizar también testigos de poco espesor. Como por otro lado la norma UNE-EN 13108-20 en la tabla D.3 de su apartado D.8 establece que para la temperatura de 20°C solo se pueden utilizar los métodos de tracción indirecta y de flexión con cuatro puntos de apoyo, resulta evidente que por las ventajas señaladas, el procedimiento de tracción indirecta parece el más idóneo.

Por tanto, este es el procedimiento que se exige para determinar el módulo a 20°C en el nuevo artículo 542 en el apartado 5.1.5 para establecer la fórmula de trabajo de las mezclas de alto módulo; así como en el apartado 9.3.1 para realizar el control de calidad de la fabricación de las mezclas que no dispongan de marcado CE. Las probetas se deben de preparar mediante compactación por impacto con 75 golpes por cara, estableciéndose



Módulo a compresión diametral.

MEZCLAS BITUMINOSAS

que debe ser superior a 11.000 MPa. Sin embargo, entendemos que para el cálculo de dimensionamiento analítico de firmes el módulo debe ser el calculado con probetas prismáticas con cuatro puntos de fijación tal como se establece en la norma UNE-EN 12697-26 anejo B.

Resistencia a la fatiga

Respecto a la fatiga de las mezclas bituminosas, el método de ensayo europeo UNE-EN 12697-24 establece cinco procedimientos de ensayo de fatiga mediante flexión (con 2, 3 y 4 puntos de fijación) y mediante compresión diametral. El ensayo con dos puntos de fijación se puede realizar a su vez con probetas prismáticas o trapezoidales.

De estos procedimientos, el procedimiento de ensayo a flexión con 3 puntos de fijación (anejo C) de la norma europea es idéntico a la norma NLT-350. Sin embargo, la norma EN 13108-20 sobre Ensayos de tipo, en la tabla D.4 del apartado D.9 solo admite el empleo de los procedimientos a flexión con dos y cuatro puntos de fijación. Teniendo en cuenta que el procedimiento de flexión de probetas prismáticas con cuatro puntos de fijación, es el único que permite determinar la fatiga a una temperatura de 20°C, que es la utilizada habitualmente en España, es evi-



Ensayo de fatiga de probetas prismáticas con cuatro puntos de fijación.

COMPACTACIÓN DE PROBETAS Y DETERMINACIONES DE DENSIDAD

dente que este debe ser el procedimiento de fatiga que permite especificar la resistencia a la fatiga. Hay que señalar que la frecuencia que se establece para este procedimiento es de 30 Hz, que es superior a la empleada anteriormente en nuestras leyes de fatiga.

En España en el apartado 5.1.5 del artículo 542 se exige la resistencia a la fatiga de las mezclas de alto módulo determinada a una temperatura de 20°C aplicando una frecuencia de 30Hz, como criterio básico para dosificar el contenido de ligante y establecer la correspondiente fórmula de trabajo en las mezclas de alto módulo, exigiéndose que el valor de la deformación para un millón de ciclos sea mayor a 100 microdeformaciones ($\geq 100 \mu\text{m/m}$)

Ensayo de pérdida de partículas de una probeta de mezcla bituminosa drenante, UNE-EN 12697-17

El procedimiento para la realización del ensayo de pérdida de partículas viene descrito en la norma UNE-EN 12697-17. El ensayo consiste en determinar la pérdida de masa que se produce en una probeta después de someterse a 300 volteos en la máquina de desgaste de Los Angeles.

El método es similar al procedimiento recogido en la NLT-352, aunque según la norma europea las dimensiones de las probetas son 100 ± 3 mm de diámetro y la altura $63,5 \pm 5$ mm, mientras que en la norma española se indicaba que la probeta tuviese 1000 gramos de áridos.

Respecto a la compactación las probetas se pueden fabricar mediante un compactador por impacto con 50 golpes por cara o con un compactador giratorio con 40 giros. Lógicamente en el artículo 543 se ha elegido el método de compactación por impacto.

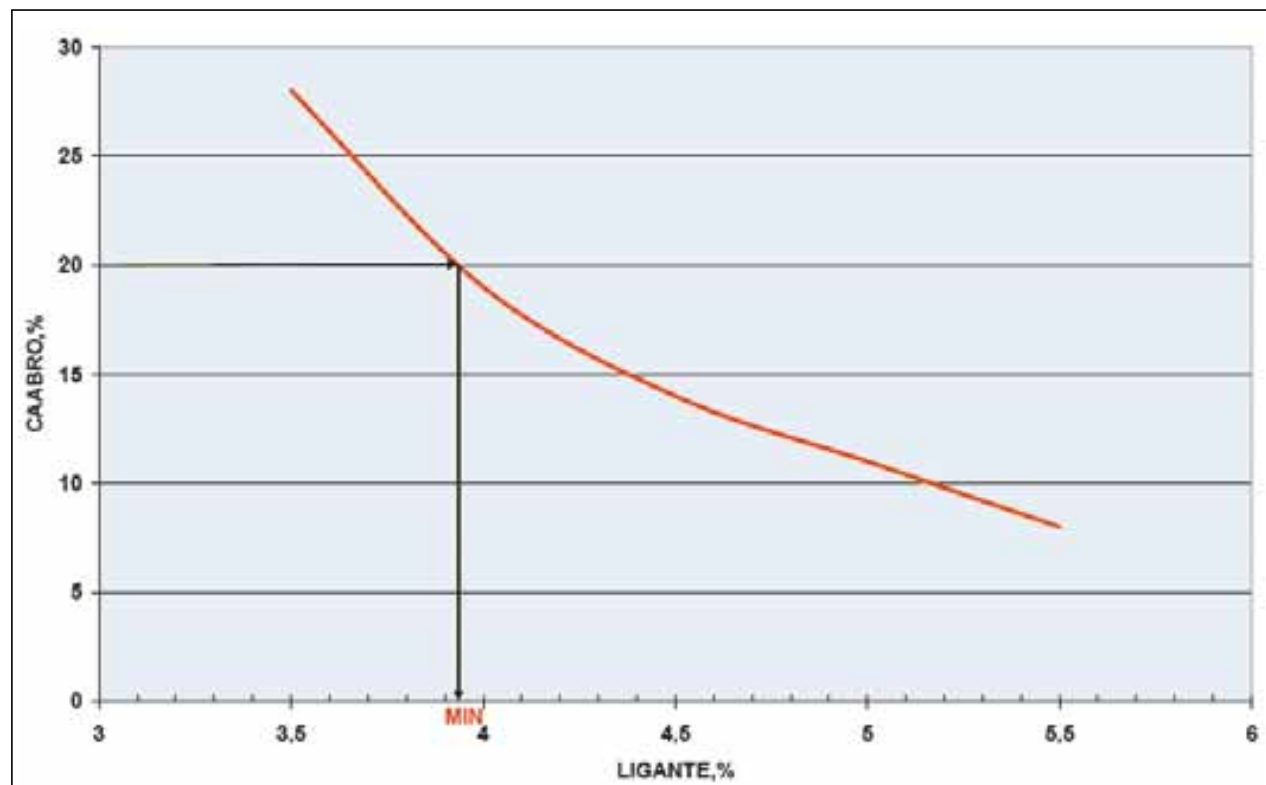
Este ensayo se especifica para el diseño de mezclas en caliente drenantes (Apartado 5.1.5 del Art. 543 del PG-3), exigiéndose un 20% para las carreteras con tráfico T00 a T2 y 25% para el resto. También se exige en el control de fabricación de la mezcla bituminosa siempre que la mezcla drenante no disponga de marcado CE.

Finalmente reseñar que el ensayo de pérdida de partículas después de la acción del agua no se contempla en la normativa europea y ha tenido que sustituirse por el ensayo de sensibilidad al agua.

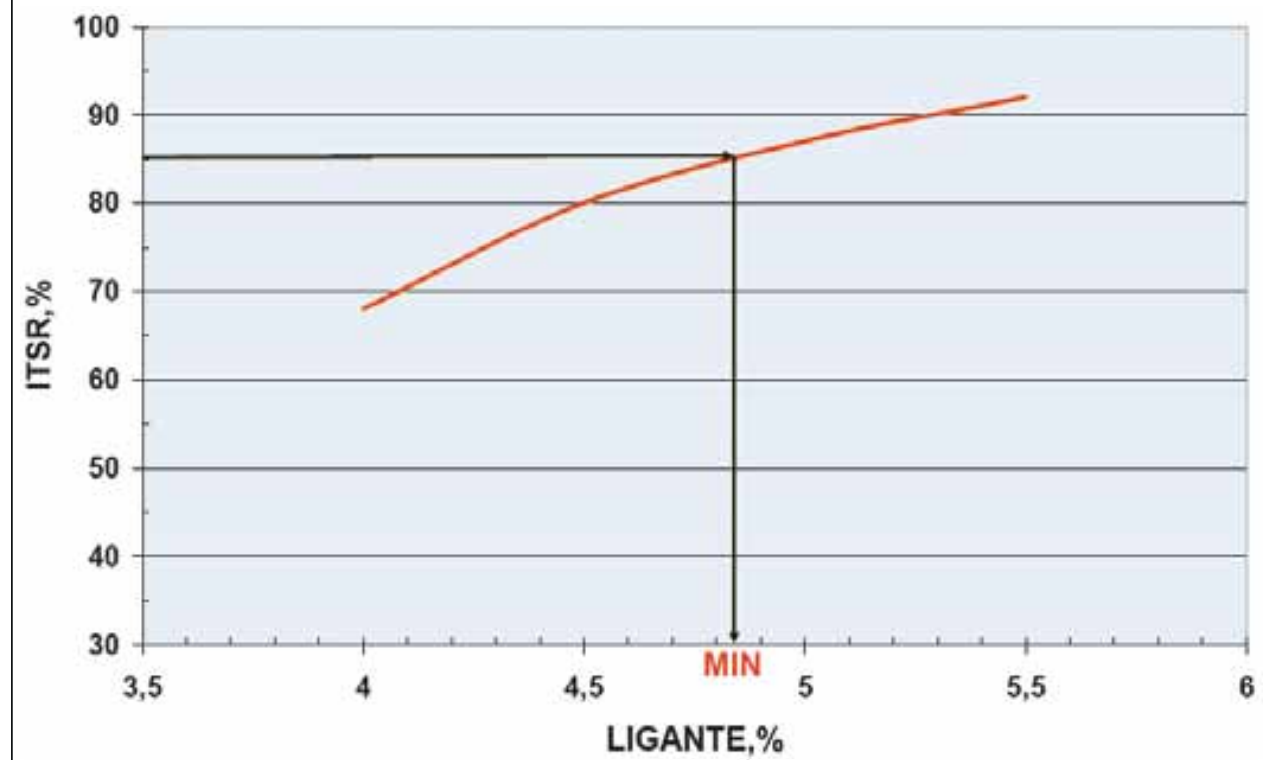
La dosificación de ligante de una mezcla drenante se realiza con los datos de laboratorio relativos al contenido de huecos, la pérdida de desgaste Cántabro y la sensibilidad al agua de mezclas drenantes fabricadas con diferentes contenidos de ligante.

El contenido óptimo de ligante es un valor que debe estar comprendido entre el mínimo que corresponda al mayor de los valores correspondientes al límite especificado (20 ó 25%) de desgaste Cántabro o al 85% de sensibilidad al agua, y el máximo correspondiente al 20 % de huecos en mezcla. A continuación, a título de ejemplo, se muestran las curvas de desgaste y contenido de huecos de una mezcla drenante para una carretera con tráfico T2.

MEZCLAS BITUMINOSAS

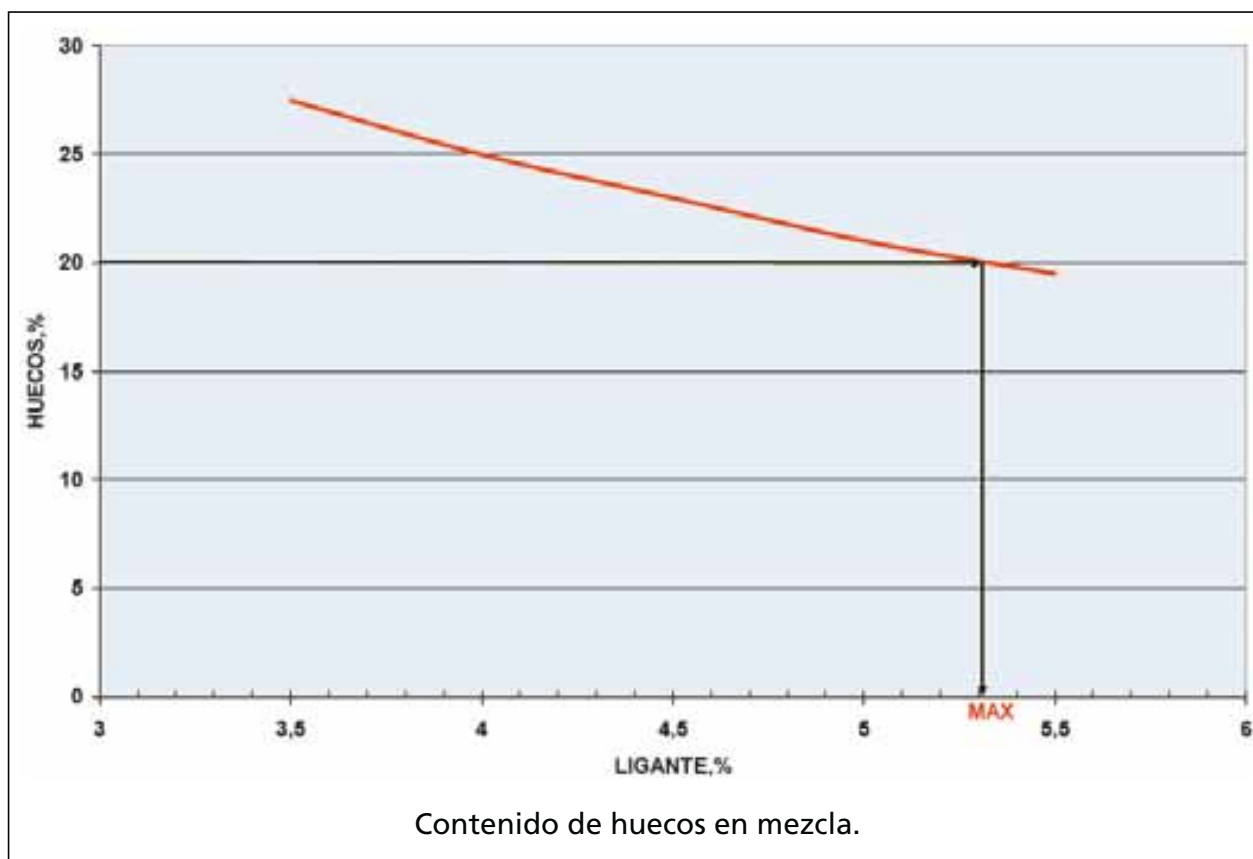


Ensayo Cántabro sin inmersión.



Sensibilidad al agua.

COMPACTACIÓN DE PROBETAS Y DETERMINACIONES DE DENSIDAD



A partir de estas gráficas y con los límites establecidos en los gráficos anteriores se determina el contenido óptimo de ligante. Con dicho contenido de ligante se verifica que no se produce escurrimiento de ligante, realizando el ensayo de acuerdo con la norma UNE-EN 12697-18.

Conclusiones

La revisión de los artículos 542 y 543 del PG-3 para adaptarlos a la normativa europea de mezclas bituminosas, ha requerido 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 probetas, y la determinación de las densidades también ha experimentado algunas variaciones.

En esta ponencia se han descrito brevemente los métodos europeos de compactación de probetas, y de determinación de densidades, así como cada uno de los ensayos de caracterización y/o control exigidos en los citados artículos (determinación del contenido de huecos, pista de laboratorio, sensibilidad al agua, módulo de rigidez, resistencia a la fatiga, pérdida de partículas), indicando los procedimientos de compactación seleccionados en España para la fabricación de probetas, y la justificación de su elección. También se han indicado los diferentes apartados de los artículos en que se exigen cada uno de estos ensayos, así como unos breves comentarios sobre la dosificación del ligante.