

Control térmico de mezclas bituminosas: Un elemento básico en la mejora de las prestaciones de los pavimentos asfálticos

José Luis Peña,
jlpena@asefma.com.es

A la hora de implantar la filosofía de economía circular, uno de los principios básicos es la reducción de impactos ambientales en todo el ciclo de vida de los productos y servicios. Uno de los caminos para reducir los impactos es conseguir aumentar la durabilidad de los materiales. En el caso de los pavimentos asfálticos, numerosos estudios correlacionan la durabilidad de los mismos con las condiciones de fabricación y puesta en obra de las mezclas bituminosas.

En el caso particular de las mezclas bituminosas en caliente, siendo extensivo aún más si cabe a las mezclas semicalientes y templadas, sus propiedades finales una vez compactadas dependen en gran manera del historial térmico al que han sido sometidas.

Cada tipo de mezcla bituminosa requiere de una determinada temperatura de fabricación y tiene unos periodos de manejabilidad y compactibilidad asociados a las temperaturas de puesta en obra. Todas estas temperaturas específicas deben ser detalladas y aplicadas debidamente en las obras de pavimentación.

El control de la temperatura de las mezclas bituminosas no es nada nuevo, pero sí lo es la constatación experimental de que en muchas obras existen problemas de segregación térmica con orígenes diversos que afectan de forma clara a la durabilidad. La aparición de nuevos equipos de medición está permitiendo cuantificar los rangos de variabilidad que pueden ser aceptables sin que las prestaciones funcionales de los pavimentos asfálticos se vean mermadas.

El control de calidad térmico no solo se puede llevar a cabo con equipos de medida de última generación, también es posible conseguir información fiable y útil con procedimientos de medida sencillos siempre que se apliquen una serie de criterios básicos en las mediciones.

Este artículo se centra en las posibilidades que existen para llevar a cabo un control térmico adecuado de las mezclas bituminosas, que permiten conducir a la optimización de sus prestaciones mecánicas y funcionales desde métodos experimentales sencillos hasta los más complejos, cercanos al concepto de Industria 4.0

Palabras Clave: Control térmico, mezclas bituminosas, termómetros, control de calidad, segregación térmica, temperatura

When implementing the methodology of circular economy, one of the basic principles is the reduction of environmental impacts throughout the life cycle of products and services. One of the ways to reduce impacts is to increase the durability of materials. In the case of asphalt pavements, many studies correlate the durability of the same with the conditions of manufacture and paving of bituminous mixtures.

In the specific case of hot bituminous mixtures, and even more for warm and hal-warm mixtures, the final properties of the compacted bituminous mixtures depend to a large extent on the thermal history to which they have been subjected.

Each type of bituminous mixture requires a certain manufacturing temperature and has ranges of handability and compactibility associated with the paving temperatures. All these specific temperatures must be detailed and properly applied in the paving works.

The control of the temperature of bituminous mixtures is nothing new, but there is the experimental

Control térmico de mezclas bituminosas: Un elemento básico en la mejora de las prestaciones de los pavimentos asfálticos

assessment that in many works there are problems of thermal segregation with diverse origins and that clearly affect the durability. The appearance of new measuring equipment is making it possible to quantify the ranges of variability that may be acceptable without the functional performance of the asphalt pavements being reduced.

The thermal quality control can not only be carried out with state-of-the-art measurement equipment, it is also possible to obtain reliable and useful information with simple measurement procedures provided that a series of basic criteria are applied in the measurements.

This communication focuses on the possibilities that exist to carry out an adequate thermal control of bituminous mixtures and that can lead to the optimization of the mechanical and functional performance of the same, from simple experimental methods to the most complex, close to the concept of Industry 4.0.

Keywords: Thermal control, bituminous mixtures, thermometers, quality control, thermal segregation, temperature

1. Introducción

Bajo la denominación de mezclas bituminosas podemos encontrar un gran variedad de productos en función de las diversas combinaciones de ligantes, áridos y aditivos. Todas ellas tienen un diseño funcional similar: los áridos son recubiertos de ligantes bituminosos para conseguir que la mezcla tenga unas prestaciones homogéneas en el volumen que ocupa en el pavimento.

Para conseguir el recubrimiento homogéneo de los áridos por parte de los ligantes bituminosos es necesario que su viscosidad sea la adecuada. Teniendo en cuenta que los betunes de pavimentación a temperatura ambiente son sólidos viscoelásticos parece difícil recubrir un sólido irregular y de gran superficie específica, como son los áridos de las mezclas bituminosas, con un material de esas características. ¿Cómo podemos conseguir la reducción de viscosidad?. En esencia dos son los métodos (aunque, como veremos posteriormente, existen métodos complementarios): calentar el ligante bituminoso o emulsionarlo.

Hasta hace no muchos años, el uso de ligantes emulsionados marcaba la distinción entre mezclas bituminosas en frío y mezclas bituminosas en caliente. Con la aparición de diversas tecnologías de fabricación a baja temperatura, dicha distinción ya no es tan evidente. Por ejemplo, las mezclas templadas con emulsión exigen el calentamiento de los áridos y/o del ligante pero éste sigue siendo una emulsión.

Otro procedimiento que debe destacarse como forma de reducir la viscosidad de los ligantes bituminosos es el uso de la espumación, que consiste bien en inyectar agua y aire al be-

tún caliente o bien en aportar agua en los áridos de forma controlada.

Como podemos ver, el mundo de la pavimentación asfáltica dispone de un conjunto de tecnologías que permiten la aplicación de las mezclas desde temperatura ambiente hasta aproximadamente 180°C.

En términos prácticos, la gran mayoría de mezclas bituminosas pertenecen a la categoría de mezclas en caliente y mezclas semicalientes, existiendo un mercado especializado para las mezclas templadas y las mezclas en frío. Las reflexiones y conclusiones que se exponen en este trabajo son válidas para las mezclas bituminosas en caliente, semicalientes y templadas.

Una vez conseguido un adecuado recubrimiento de los áridos por parte de los ligantes bituminosos, la fase siguiente del proceso productivo es el transporte y posterior extendido de las mezclas bituminosas. Llegados a este punto, el objetivo práctico de proceso de puesta en obra va orientado a maximizar las propiedades mecánicas de las mezclas bituminosas, tanto a corto como a largo plazo.

Como ya se ha indicado, los ligantes bituminosos se calientan para facilitar el recubrimiento de los áridos mediante la reducción de su viscosidad. Así, podría deducirse que calentar los ligantes bituminosos es intrínsecamente bueno. Nada más lejos de la realidad: el calentamiento de los ligantes genera una serie de efectos perniciosos en la mezcla bituminosa que se detallan a continuación:

- Al calentar los ligantes éstos se oxidan, lo que afecta negativamente a su durabilidad.
- El proceso de calentamiento de los ligantes genera vapores que pueden suponer un riesgo para la salud

de los trabajadores.

- Un calentamiento excesivo y su consiguiente bajada de viscosidad puede generar escurrimiento del ligante durante la fase de transporte y puesta en obra y, por tanto, pérdida de prestaciones del producto final o condiciones indeseables durante su vida de servicio.
- Calentar supone un gasto energético y sus consecuentes emisiones.

Por lo tanto, debemos alcanzar un equilibrio entre reducir la viscosidad del ligante para conseguir un buen recubrimiento de los áridos y no usar un calentamiento excesivo que provoca los inconvenientes anteriormente citados. De esta manera, desde el punto de vista de la fabricación disponemos de una “ventana de operación” en lo relativo a la temperatura de los áridos y de los ligantes.

Desde el punto de vista de prestaciones mecánicas de las mezclas bituminosas, partiendo de un diseño de formulación adecuado, el obtener el máximo de las propiedades mecánicas asociadas a una formulación dada depende en gran manera de la densidad alcanzada al finalizar el proceso de compactación, siendo la temperatura un parámetro fundamental en dicho proceso de densificación de la mezcla extendida.

En cuanto al objetivo de conseguir la máxima densidad, cuanto mayor es la temperatura de la mezcla bituminosa más fácilmente se pueden conseguir la densificación de la mezcla debido a la menor viscosidad del ligante. Hemos de recordar que las mezclas bituminosas se pueden compactar hasta que la temperatura sea tan baja que haga incrementar sustancialmente la viscosidad del ligante bituminoso o, mejor dicho, del mástico bituminoso. Tan solo hay un inconveniente en compactar mezclas en caliente (especialmente aquellas mezclas que no basan de forma mayoritaria su comportamiento en la fricción interna de los áridos y que se aplican en espesores medios y altos, como es el caso de muchas mezclas AC): si la temperatura es demasiado alta o, lo que es lo mismo, el ligante es demasiado fluido se produce el efecto de formación de “olas” al paso de los compactadores.

Desde un punto de vista reológico, en las mezclas bituminosas no encontramos betún sino másticos bituminosos: la mezcla de betún y polvo mineral. Esta distinción es especialmente importante porque dependiendo del tipo de polvo mineral, su interacción con el betún puede ser especialmente des-

tacada. El caso más extremo es el caso de la cal que exige un procedimiento de dosificación específico.

Resumiendo, la facilidad intrínseca con la que una mezcla bituminosa se puede compactar depende de varios factores: tipo de ligante bituminoso, características reológicas del mástico bituminoso, la estructura mineral de la mezcla y el procedimiento de fabricación. Al haber tantas variables es difícil predecir cuál es el rango de temperatura óptimo para cada tipo de mezcla. Desgraciadamente tampoco se dispone de ensayos que permitan identificar adecuadamente dicho rango. Tan solo el ensayo de compactabilidad (UNE EN 12697-10) proporciona una cierta información relevante sobre cómo influyen factores como la temperatura o el espesor de las probetas en el proceso de compactación.

En la práctica, la mayor parte de las empresas se guían por la experiencia adquirida en obras anteriores, lo que no es un mal criterio, pero en el momento que las formulaciones incluyen cambios de cierta entidad se produce una falta de conocimiento a la hora de determinar con precisión qué cambios son necesarios en las temperaturas de fabricación y puesta en obra respecto a una formulación ya conocida. Es más, el desarrollo de las tecnologías de fabricación de mezclas bituminosas a baja temperatura ha producido, en algunos casos, un cierto desacople entre las temperaturas de fabricación y puesta en obra: así, una reducción en la temperatura de fabricación de 25°C puede no llevar aparejada una reducción de la temperatura de puesta en obra de la misma magnitud.

Como conclusión, el desarrollo de materiales, aditivos y tecnologías de fabricación generan especificidades en las temperaturas de fabricación que exigen un control riguroso de las temperaturas. En los apartados siguientes se analizarán los diversos elementos que determinan la temperatura de fabricación y puesta en obra y cómo se pueden controlar las temperaturas en cada fase, y se propondrán niveles de precisión en las medidas de control de la temperatura.

2.LA TEMPERATURA DE LAS MEZCLAS BITUMINOSAS EN CADA UNA DE LAS FASES

2.1 Fabricación de las mezclas bituminosas

El primer momento en el que se controlan las temperaturas de las mezclas bituminosas es en el laboratorio, durante la fase de diseño de la mezcla. Las recomendaciones de temperatu-

Control térmico de mezclas bituminosas: Un elemento básico en la mejora de las prestaciones de los pavimentos asfálticos

ras obtenidas basándose en los datos del laboratorio parten de la premisa de que dichas mediciones son correctas. En el apartado dedicado a los equipos de medición se mostrará cuáles son las prácticas más adecuadas.

En esta fase los factores determinantes para elegir la temperatura son la viscosidad del mástico bituminoso a emplear, la distancia de transporte y las condiciones meteorológicas. Los dos últimos factores pueden exigir incrementar ligeramente la temperatura de fabricación pero debemos recordar que el uso de altas temperaturas puede generar oxidación adicional del ligante, emisión de vapores y escurrimiento del ligante

La viscosidad de los másticos es el elemento fundamental, ya que de la adecuada elección de la temperatura de fabricación supondrá un correcto recubrimiento de los áridos. Tradicionalmente, en España la selección de la temperatura se ha hecho basándose en la viscosidad del ligante según se indica en la norma NLT-159 (resistencia a las deformaciones plástica de mezclas bituminosas empleando el aparato Marshall). En dicha norma se indican unos rangos de viscosidad para las fases de fabricación y compactación (170 ± 20 cSt en la fase de mezclado y de 280 ± 30 cSt en la de compactación). En la vigente versión del PG-3 del año 2014 se indica que la determinación de la viscosidad del ligante se realizará según el método UNE-EN 13302, marcando unos límites de viscosidad de 150-300 cP en la fase de fabricación.

Un extenso estudio sobre métodos de determinación de las temperaturas de fabricación se recoge en el informe NCHRP 648 [1] en el que es especialmente llamativa la encuesta realizada entre técnicos de los departamentos de transporte de varios estados de EEUU en la que la mayoría utiliza el método Marshall y/o el compactador giratorio como métodos de determinación de la temperatura de fabricación y compactación.

Llegados a este punto conviene recordar que en las mezclas bituminosas el ligante se encuentra mezclado con el polvo mineral (filler) constituyendo un mástico bituminoso que puede tener unas características reológicas sustancialmente distintas a las del ligante puro dependiendo de la relación volumétrica entre el polvo mineral y el ligante.

En el trabajo realizado por Loma et al [2] se muestra cómo las variaciones de contenido de polvo mineral que permite el PG-3 pueden generar cambios sustanciales en la viscosidad del mástico y pueden hacer necesario ajustar las temperaturas de fabricación.

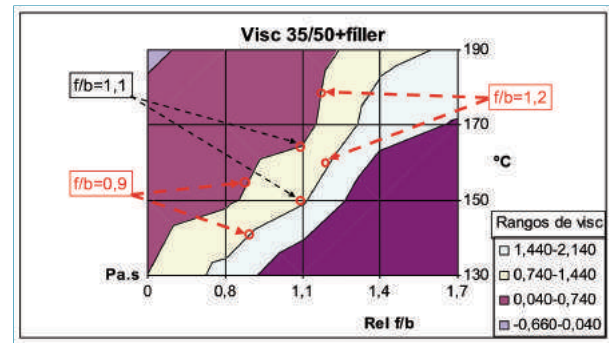


Figura 1. Mapa de viscosidades de másticos. Fuente: [2]

El control de la temperatura de las mezclas bituminosas en esta fase es relativamente sencillo ya que la mayoría de las plantas de fabricación disponen de sensores térmicos que permiten ir controlando la temperatura de los áridos y del ligante, así como en la mezcla final.

A nivel normativo, las normas de marcado CE (UNE EN 13108-20 y UNE EN 13108-21) indican que se realicen controles de la temperatura de la mezcla, bien por lotes o de forma continua o en el caso de la normas de producto se indican temperaturas máximas de fabricación para los diversos tipos de ligante.

El PG-3 añade algunos condicionantes adicionales relativos a las diferencias de temperaturas entre los áridos y el ligante (inferior a 15°C). Con la aparición de las mezclas semicalientes por espumación o la adición de fresado frío en pequeñas cantidades en los mezcladores esta limitación debería sufrir algunas matizaciones.

Para llevar a cabo una verificación de la temperatura de la mezcla durante la carga de los camiones se pueden utilizar tanto termómetros de contacto como termómetro sin contacto (infrarrojos). De acuerdo a la norma UNE EN 12697-13 se recomienda realizar cuatro medidas por cada lado del camión. La experiencia demuestra que dado el poco tiempo transcurrido entre amasada y amasada las diferencias observadas no requieren realizar tantas medidas. En muchos casos las limitaciones para medir vienen dadas por cuestiones de seguridad en el trabajo, ya que es necesario disponer de plataformas adecuadas para que los operarios puedan realizar las mediciones. Además, las nuevas plantas de fabricación disponen de sensores que controlan de forma continua la temperatura de fabricación por lo que las tareas de inspección deberían centrarse en la verificación de los equipos de medida de las plantas.

Un caso distinto es el de los silos de almacenamiento en

caliente en los que sí se pueden encontrar diferencias sustanciales respecto a la temperatura de fabricación si los tiempos de almacenamiento se alargan mucho.

Como conclusión, la determinación de la temperatura adecuada de fabricación es muy importante porque los efectos encadenados que puede generar una mala elección pueden repercutir muy negativamente en la calidad final de la mezcla compactada en el pavimento asfáltico. El control de temperatura en la fabricación no suele ser una fuente de incertidumbre destacable debido a la gran mejora en los procesos de automatización y control de las plantas de fabricación.

Una última reseña sobre el control de la temperatura en la fabricación se refiere al caso de las mezclas semicalientes por espumación y las mezclas templadas. En ambos casos la selección y el control de la temperatura es crítico para conseguir un comportamiento adecuado durante el proceso de puesta en obra. La experiencia práctica ha mostrado que la reducción en las temperaturas de fabricación no puede trasladarse linealmente al rango de temperatura de compactación, lo que significa un rango de operación más estrecho, por lo que controlar adecuadamente la temperatura, especialmente en el proceso de extendido, es aún más importante. También es cierto que en este tipo de mezclas a menor temperatura el proceso de enfriamiento es más lento por lo que se gana algo de tiempo de operación en el transporte y la compactación.

2.2 La fase de transporte

Durante la fase de transporte se producen una serie de fenómenos que se han de tener en cuenta a la hora de decidir la temperatura de fabricación.

Lo más destacado es que las mezclas se enfrían dado que están en contacto con el aire. A pesar de que los camiones llevan toldos para reducir la llegada de aire a la superficie de las mezclas, éstas se enfrían progresivamente. En un capítulo posterior se mostrarán diversos modelos de cálculo que permiten estimar el proceso de enfriamiento de las mezclas en función de diversos factores: temperatura ambiente, tiempo transcurrido, temperatura de partida, velocidad del viento etc.

Como es fácil imaginar, el enfriamiento de las mezclas durante la fase de transporte no se produce por igual en el conjunto de la masa. Así, las capas exteriores se enfrían mucho más, mientras que el interior de la masa de mezcla puede estar a temperaturas muy superiores, apareciendo las denomi-

nadas "costras": masas de mezclas bituminosa relativamente frías y que no se disgregan adecuadamente en el conjunto de la masa descargada por el camión a menos que se disponga de un silo móvil de transferencia.

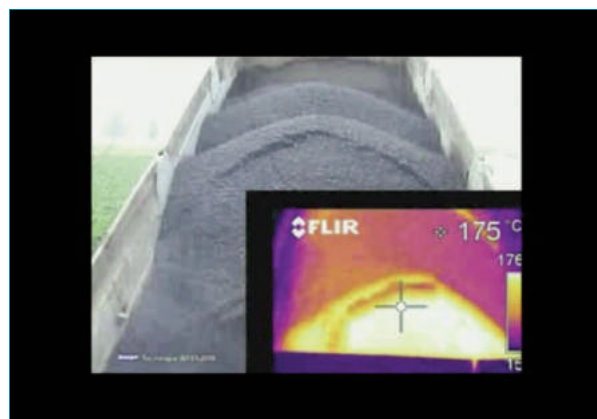


Figura 2. Imagen con cámara térmica del contenido de un camión.
Fuente [3]

El PG-3 exige que se declare la temperatura mínima en la descarga de los elementos de transporte. El problema que se plantea es cómo llevar a cabo dicho control de una manera segura, eficiente y representativa.

Desde el punto de vista de la seguridad, medir la temperatura de la mezcla en la tolva de la extendedora no es adecuado porque implica situarse por delante de un vehículo en movimiento. Situarse en el lateral de la tolva para tomar medidas queda condicionado por la concentración de mezcla fría en los laterales de la tolva. Además, dependiendo de la fase de descarga de la masa de mezcla del camión, los resultados pueden ser muy variables.

La segunda opción es medir la temperatura de la mezcla cuando los camiones esperan a descargar en la extendedora. Para poder hacer esta operación con seguridad se necesita una escalera debidamente asegurada o una plataforma. Además, el termómetro ha de ser de contacto ya que debido al enfriamiento de la superficie exterior los termómetros infrarrojos proporcionarían una medición no representativa del conjunto de la masa de mezcla bituminosa transportada.

La opción más adecuada, aunque requiere de importantes inversiones, es el uso de camiones con cajas aisladas térmicamente y con sistemas incorporados de medición de la temperatura o canales en las cartolas que permiten la colocación de termómetros exteriores. Este tipo de detalles técnicos están especificados en la normativa alemana, donde su empleo es

Control térmico de mezclas bituminosas: Un elemento básico en la mejora de las prestaciones de los pavimentos asfálticos

obligatorio [4].

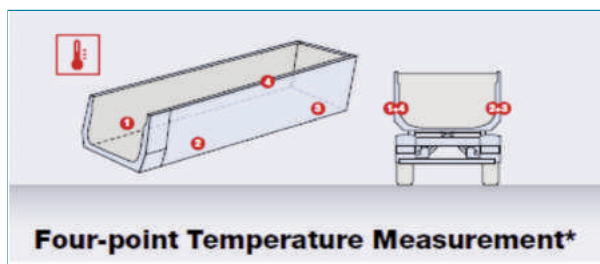


Figura 3. Situación de los puntos de control de temperatura en los camiones según la normativa alemana. Fuente Schmitz Cargobull.

Una consideración final sobre el enfriamiento producido durante la fase de transporte está relacionada con el desarrollo de mezclas fabricadas a menores temperaturas (semicalientes y templadas). El hecho de que en el proceso de fabricación la temperatura sea menor también hace que el proceso de enfriamiento en el transporte discurra más lentamente debido a que el gradiente respecto a la temperatura ambiente es más bajo, lo que suele redundar en que el tiempo de transporte puede ser mayor garantizando que la mezcla se entregue en la obra con una temperatura adecuada para su extendido y compactación.

2.3 La fase de extendido y compactación

Estas son las fases en las que se producen las mayores incidencias a la hora de conseguir optimizar la calidad de los pavimentos asfálticos. Dos son los problemas que hay que abordar en el momento de la puesta en obra de las mezclas bituminosas: decidir la temperatura más adecuada a la que se debe extender la mezcla y, una vez tomada dicha decisión, conseguir que se consiga la máxima homogeneidad térmica en el conjunto de la superficie del pavimento asfáltico que se está construyendo.

Al igual que decidir la temperatura adecuada de fabricación es una tarea compleja debido a la gran cantidad de variables a tener en cuenta, en la fase de extendido y compactación el principal reto proviene del tiempo disponible para llevar a cabo las tareas programadas.

Suponiendo que la mezcla bituminosa llegue a la temperatura programada en la descarga de los camiones (en términos de promedio de temperatura; ya se tratarán posteriormente los problemas generados por las “costras” de material frío)

se inicia el proceso de extendido en el que la mezcla extendida empieza a enfriarse por diversas causas: el contacto con el aire, el contacto con la superficie de apoyo y el enfriamiento debido al agua que aportan los compactadores para evitar la adherencia a los rodillos. Todos estos elementos ayudan al enfriamiento de la mezcla que podrá ser compactada adecuadamente hasta que la temperatura sea tan baja que la viscosidad del mástico bituminoso impida la densificación, momento en el que el paso de los compactadores deja de incrementar la densidad y tan solo genera fisuración en la masa de pavimento asfáltico.

En la fase de compactación nos podemos encontrar con una serie de factores contrapuestos. Ya se ha dicho que cuanto mayor es la temperatura de la mezcla más fácil es la compactación, pero por otro lado por cuestiones de sostenibilidad ambiental la tecnología se encamina a reducir la temperatura de fabricación y, por consiguiente, de puesta en obra.

Además, diversos estudios experimentales señalan que las propiedades mecánicas de las mezclas mejoran al aumentar la temperatura de compactación para la misma densidad o contenido de huecos final [5] (figura 4).

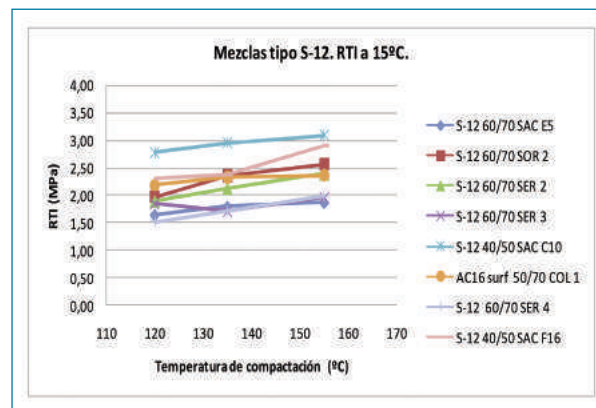


Figura 4. Variación de la resistencia a tracción indirecta frente a la temperatura de compactación. Fuente Proyecto Fénix

Esta mejoría en las propiedades mecánicas es especialmente destacable en mezclas con altos contenidos de filler, áridos finos y mástico bituminoso (mezclas AC densas y semidensas). Sin embargo, el aumentar la temperatura de compactación, además de las cuestiones de reducción de emisiones, se puede ver limitada por el “efecto ola” típico en mezclas AC cuando se extienden en espesores medios y altos (Figura 5).

Aunque la temperatura no es el único factor, sí que es uno de los más relevantes por lo que conocer en cada tipo de mez-

cla la temperatura adecuada para llevar a cabo la compactación es un elemento primordial para obtener las mejores propiedades de una mezcla bituminosa dada.

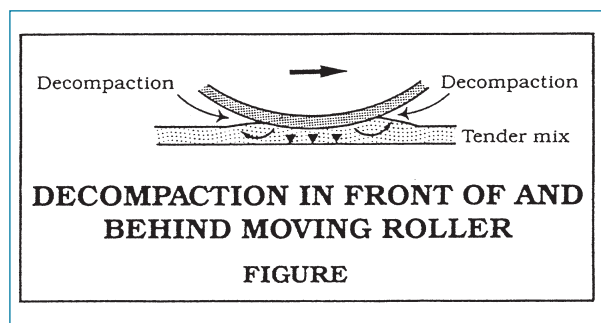


Figura 5. Mezcla inestable durante el proceso de compactación. Fuente Minnesota DOT

Así, durante la fase de diseño de las mezclas es necesario conocer la influencia que tiene la temperatura de fabricación y la de compactación en la densidad final de la mezcla.

La norma UNE EN 12697-10 permite realizar un análisis de la compactabilidad de las mezclas bituminosas en función del número de golpes o giros, según se emplee el compactador de impactos o el compactador giratorio, lo que genera una curva de densificación. De manera similar se puede llevar a cabo el estudio para evaluar el efecto de la temperatura en la compactabilidad de las mezclas bituminosas (Figura 6).

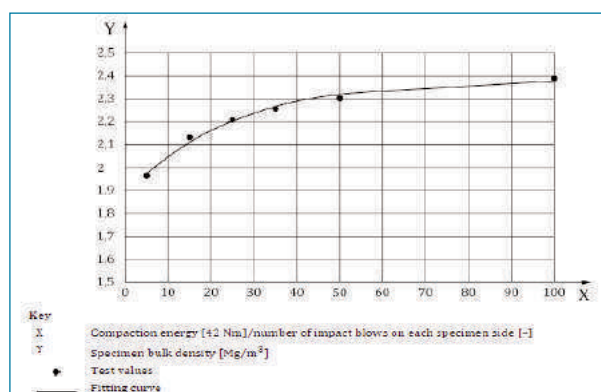


Figura 6. Gráfico de compactabilidad de una mezcla bituminosa según la norma EN 12697-10: 2007

El PG-3 exige que la fórmula de trabajo especifique la temperatura mínima de la mezcla en la descarga. También requiere que se especifique la temperatura máxima a la que se puede iniciar la compactación y la temperatura a la que se debe cesar

la misma.

Es posiblemente esta fase donde más incertidumbre surge a la hora de realizar el control térmico. Ya hemos citado que hay mezclas "tiernas" que pueden generar el "efecto ola" en la compactación pero hay mezclas que no sufren este efecto, por lo que las especificaciones deberían marcar rangos de temperatura en lugar de valores individuales. De esta manera, una fórmula de trabajo debería especificar:

- Rango de temperatura en la descarga de la mezcla en la extendidora, que puede ser controlada bien en el camión o en los sinfines de la extendidora.
- El rango de temperatura en la descarga debería solaparse lo más posible con el rango de inicio de la compactación ya que en caso contrario obliga a los compactadores a demorar su trabajo respecto al paso de la extendidora, cuando lo más eficiente es que se inicie el proceso de compactación lo antes posible.
- La exigencia del PG-3 sobre la temperatura de cese de la compactación no se puede cumplir porque no es posible medir con exactitud la temperatura en el interior de una capa ya compactada y las medidas de temperatura superficial son difíciles de correlacionar con la temperatura de la masa de mezcla bituminosa incluida en la capa que se está compactando.

Cuándo cesa la fase de compactación es una cuestión muy relevante por diversas razones: si se compacta una mezcla "fría", lejos de aumentar la densidad lo que se consigue es generar fisuración que repercutirá negativamente en las prestaciones futuras. Además, gastar tiempo en compactar una mezcla que ya no se densifica más puede suponer no dedicar tiempo de compactación a otras zonas del pavimento que sí pueden estar lo bastante calientes para que la compactación genere un aumento de la densidad.

Una forma de conocer cuándo se debe cesar el proceso de compactación es el uso de los equipos de medida sin contacto de la temperatura que algunos compactadores de última generación llevan acoplados. En muchos casos, estos compactadores suelen llevar sistemas de control de la rigidez del pavimento que compactan por lo que, en base a la experiencia, se puede tomar la decisión precisa del cese de la compactación (Figura 7).

Para concluir, la información que la fórmula de trabajo de una mezcla bituminosa debe facilitar al personal encargado de la puesta en obra es vital para conseguir las máximas presta-

Control térmico de mezclas bituminosas: Un elemento básico en la mejora de las prestaciones de los pavimentos asfálticos

ciones del material escogido. Transformar temperaturas en tiempo de ejecución es una cuestión que se abordará posteriormente pero que exige de una premisa previa: cómo conseguir mediciones exactas que den una información fiable del estado térmico de una mezcla bituminosa.



Figura 7. Compactador "inteligente" con sensores IR de temperatura. Fuente Volvo

3. MEDICIÓN DE LA TEMPERATURA EN LAS MEZCLAS BITUMINOSAS Y EN LOS PAVIMENTOS EXTENDIDOS

3.1 Tipologías de equipos de medida manuales

Medir la temperatura de las mezclas bituminosas desde la fabricación hasta la puesta en obra requiere tener en cuenta las siguientes consideraciones;

- La temperatura que realmente condiciona el comportamiento reológico de las mezclas bituminosas es la de la masa interior. Las mediciones de la temperatura en la superficie pueden generar grandes sesgos e inducir a decisiones erróneas.
- Hay que alcanzar un compromiso a la hora de seleccionar equipos de medida que permitan obtener mediciones con la mayor rapidez y exactitud posible y no generen situaciones de riesgo laboral.

Dentro de los equipos manuales de medida se suelen encontrar dos grandes grupos: equipos de medida por contacto (especialmente termopares K y sondas Pt 100) y equipos de medición sin contacto por radiación infrarroja (IR). En la figura 8 se muestran dos ejemplos de los equipos citados.

A nivel operativo, todos ellos facilitan resolución suficiente para el control de la temperatura de mezclas bituminosas,

La mayor diferencia radica en la velocidad de medición. Así, mientras los equipos IR facilitan medidas casi inmediatas, los equipos de medida por contacto exigen un cierto tiempo de espera hasta que se alcanza el equilibrio térmico en la sonda y la medida puede ser considerada correcta.



Figura 8: Equipo de medición IR (izquierda) y termómetro digital con sonda Pt 100

A la vista de la información anterior parecería que los equipos IR son ventajosos a la hora de hacer controles de temperatura, lo que en muchos casos es cierto, pero hay que tener en cuenta los siguientes aspectos:

- En el control de temperatura en los camiones en la descarga, al generarse una costra fría en la masa de mezcla bituminosa, las mediciones de la superficie no dan una información adecuada. Sin embargo, en las cargas de los camiones en las plantas de fabricación al haber un flujo rápido de la masa de mezcla en las cajas de los camiones el enfriamiento superficial es muy limitado y las medidas coinciden con las de los termómetros de contacto.
- Inmediatamente tras la extendedora, a pocos centímetros de la regla (o en el material contenido en el centro de los husillos), la medida de la temperatura sí es representativa del estado térmico de la mezcla.
- Una vez pasan los compactadores, o incluso sin pasar pero alejándose de la extendedora, la superficie del pavimento proporciona una temperatura que es bastante inferior a la del interior de la mezcla, por lo que el utilizar estas medidas como referencia exige tener datos de experiencias anteriores, como se hace con los medidores IR embarcados en los compactadores.
- La diferencia entre la masa de mezcla bituminosa y la

medida en la superficie se ve afectada por numerosos e importantes factores: temperatura ambiente, velocidad del viento, la temperatura de la capa inferior sobre la que se extiende la mezcla y el espesor de la capa que se extiende.

- Un equipo IR adecuado debe tener regulación de la emisividad, siendo el valor típico para mezclas bituminosas de 0,95.
- Los termómetros IR no miden la temperatura en un punto sino en una superficie cuya área viene determinada por el ratio de distancia al objetivo. Así, un equipo de ratio 12:1 significa que para medir la temperatura de un círculo de diámetro 1 cm no se debe situar a más de 12 cm de distancia. También hay que tener en cuenta que el vapor y los humos pueden interferir en las medidas.

Antes de pasar al siguiente apartado en el que se hablará de equipos de medida mediante escaneado, vale la pena citar un tipo de equipos de medición que está a medio camino entre los equipos de medición manuales y los sistemas de escaneado IR: nos estamos refiriendo a las cámaras térmicas.

Este tipo de dispositivos (Figura 9), permiten obtener mapas de la temperatura superficial de la zona a estudiar.



Figura 9. Cámara térmica

La gran virtud de estos equipos de medición respecto a las mediciones puntuales es que permiten hacer visibles las diferencias de temperatura mediante códigos de colores estandarizados. Es decir, dan información de la homogeneidad térmica. De hecho, aunque hay estudios sobre segregación térmica anteriores al uso de las cámaras térmicas, fue mediante su uso cuando se hizo palpable la magnitud del problema de segregación térmica que puede aparecer en las obras y su efecto en el medio y largo plazo sobre la durabilidad de los pavimentos.

Vista la utilidad de determinar y cuantificar la homogeneidad térmica se dio paso al desarrollo de sistemas de escaneado que permiten almacenar la información, incluso con georreferenciación, siendo tratados estos equipos en una sección posterior.

3.2 Sistemas de control continuo de la temperatura

Basados en la tecnología IR, desde hace ya bastantes años se han comenzado a desarrollar equipos que permiten hacer mediciones de forma continua de la temperatura del pavimento recién extendido.

Los primeros prototipos desarrollados en el Departamento de Transportes de Texas utilizaban una batería de sensores IR que en los primeros prototipos eran desplazados manualmente (figura 10) siendo posteriormente acoplados a la extendidora (figura 11).



Figura 10. Prototipo Pave-IR. Fuente Texas DOT



Figura 11. Prototipo Pave-IR. Fuente Texas DOT

También en Europa se desarrollaban experiencias similares, en este caso en Amsterdam (2008), donde bajo el auspicio del proyecto ASPARi se generaron perfiles térmicos de pavimentos con georreferenciación GPS (figura 12).

Control térmico de mezclas bituminosas: Un elemento básico en la mejora de las prestaciones de los pavimentos asfálticos

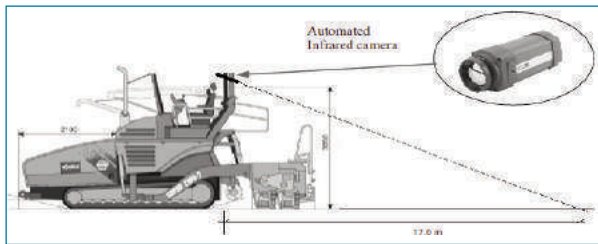


Figura 12. Prototipo de medición de perfiles térmicos. Fuente proyecto ASPARI

La tecnología de escaneo térmico ha ido progresivamente mejorando siendo relativamente normal poder encontrar extendedoras equipadas con este tipo de dispositivos que proporcionan un complejo conjunto de información sobre la temperatura de la superficie de los pavimentos recién extendidos (figuras 13 y 14). Además, es posible situar medidores de temperatura IR en ubicaciones fijas, como pueden ser los sinfines o en las tolvas, de manera que se puede tener un control adicional de la temperatura en la recepción de las mezclas bituminosas.

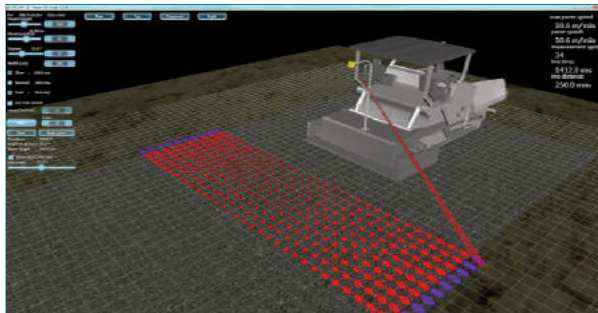


Figura 13. Modelización de la toma de datos de un equipo de escaneo IR a ancho completo. Fuente MOBA



Figura 14. Ubicación en una extendidora de un equipo de escaneo IR a ancho completo. Fuente MOBA

Respecto a las tecnologías de control de temperatura más antiguas, el principal avance de los sistemas de escaneo térmico es que permiten obtener verdaderos mapas del conjun-

to de la superficie de pavimento construida, lo que unido a la geolocalización sienta las bases de un sistema global de control de calidad que responde al concepto de Industria 4.0 en cuanto a la digitalización de la información y posibilidad de disponer de ella en tiempo real.

3.3 Determinación de la homogeneidad térmica

Partiendo del hecho de que se ha hecho una selección adecuada de las temperaturas de fabricación de la mezcla, que los camiones llegan a la obra con la carga a una temperatura dentro del rango especificado y que disponemos de equipos adecuados para hacer las mediciones de temperatura, una de las cuestiones más relevantes es verificar que la temperatura durante el extendido y la compactación se mantiene dentro de unos rangos aceptables, es decir, que haya homogeneidad térmica.

Las numerosas experiencias documentadas han establecido una perfecta correlación entre bajas temperaturas de extendido y bajas densidades (Figuras 15 y 16).

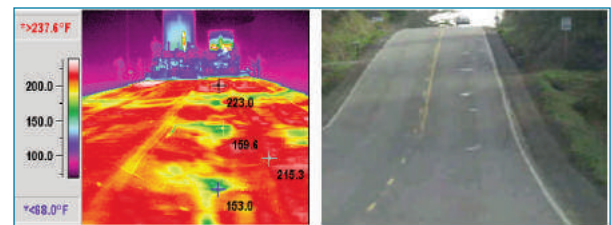


Figura 15. Efecto de las zonas frías en el extendido sobre el comportamiento del pavimento. Fuente [6]



Figura 16. Efecto de las zonas frías en el extendido sobre el comportamiento del pavimento. Fuente [7]

Es evidente que resulta imposible conseguir una homogeneidad térmica absoluta, por lo que surge el concepto de segregación térmica, refiriéndose a las diferencias de temperatura respecto a una referencia establecida que pueden generar daño acelerado en el pavimento durante la fase de uso.

Uno de los trabajos más relevantes en este campo ha sido realizado por la Universidad de Auburn [8] y del que se puede

extraer una clasificación de rangos de variaciones de temperaturas que indican cuando existe verdadera segregación térmica.

Tabla 1. Valores indicativos de segregación térmica. Fuente (8)

Variación de temperatura (°C)	Nivel de segregación
< 10	No hay segregación
10 a 16	Poca importancia
17 a 21	Importancia media
> 21	Importancia alta

Teniendo en cuenta los valores de la tabla anterior, puede considerarse lógico buscar niveles de tolerancia en las medidas de $\pm 5^\circ\text{C}$ para poder estar dentro del rango de temperaturas que no pueden catalogarse como segregación térmica.

Una consideración adicional con los termómetros IR, teniendo en cuenta que se necesita una tolerancia de $\pm 5^\circ\text{C}$, es que recién calibrados su nivel de incertidumbre es de aproximadamente un 2-3%, por lo que el grado de tolerancia exigido se puede cumplir sin problemas, pero si los equipos están sin calibrar corremos el riesgo de sobreestimar la precisión de los equipos.

Para verificar la existencia de segregación térmica en el extendido de las mezclas bituminosas se hace necesario llevar a cabo la determinación del perfil de temperatura. El Departamento de Transporte de Texas ha desarrollado un protocolo para determinar si existe segregación térmica [9]. Dicho protocolo está diseñado para el uso de cámaras térmicas y/o escáneres IR embarcados en las extendedoras. En la versión del protocolo del año 2011 también se incluía como método de determinación de segregación térmica el uso de termómetros IR manuales.

Es de reseñar que el procedimiento anteriormente citado no se aplica a áreas en las que la extendedora se haya detenido más de un minuto y que cada sección de medición es de unos 50 metros de longitud, lo que supone aproximadamente la cantidad de mezcla contenida en un camión para un ancho de 3,5 m y un espesor de 5 cm.

A nivel de homogeneidad térmica tres son los orígenes de zonas “frías”:

- “Costras” de mezcla fría procedente de las zonas exteriores de las cajas de los camiones que no han sido

debidamente homogeneizadas en el proceso de alimentación de la tolva de la extendedora hasta los sinfines.

- Camiones que han mantenido la carga más tiempo que el promedio de la flota de transporte.
- Paradas de la extendedora.

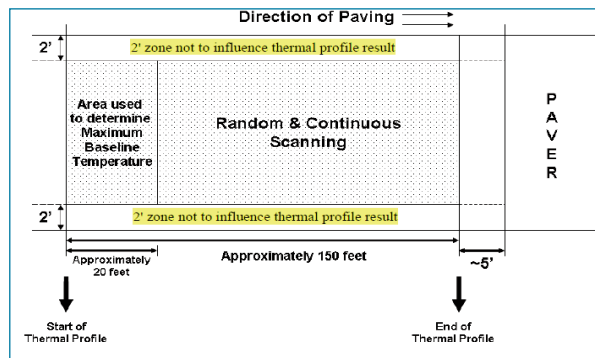


Figura 17. Esquema del procedimiento de determinación de perfiles térmicos en Texas DOT. Fuente [9]

La primera causa suele originar zonas frías singulares de pequeña extensión en el conjunto del pavimento extendido, mientras que las dos últimas sí que producen zonas de bastante mayor superficie con segregación térmica.

Minimizar las tres fuentes de falta de homogeneidad es un paso importante para garantizar la durabilidad de un pavimento asfáltico en toda su extensión.

De acuerdo al protocolo del Departamento de Transporte de Texas, se definen dos niveles de segregación térmica, que son los que se indican en los informes:

- Moderada: si el nivel de segregación térmica esté entre 14°C y 28°C .
- Severa: si el nivel de segregación térmica es superior a 28°C .

4. EL USO DE SOFTWARE PREDICTIVO EN EL CONTROL TÉRMICO

Si partimos de un correcto diseño de una formulación, incluyendo parámetros como son la temperatura de fabricación, el rango de temperatura en el extendido y la temperatura mínima de compactación, ¿cómo podemos llevar a cabo un correcto control térmico de la puesta en obra?

La respuesta puede parecer obvia: midiendo temperaturas en las distintas fases de la puesta en obra. Sin embargo hay

Control térmico de mezclas bituminosas: Un elemento básico en la mejora de las prestaciones de los pavimentos asfálticos

más alternativas, mediante controles indirectos que además facilitan otra información muy relevante; nos estamos refiriendo a los software de predicción de la evolución de la temperatura, siendo los dos más conocidos Pavecool [10] (desarrollado por el Departamento de Transporte de Minnesota) y Multicool [11] (desarrollado por National Asphalt Pavement Association). Los algoritmos de cálculo son comunes en ambos aunque el software Multicool ha añadido algunas funciones adicionales.

El interés de este tipo de herramientas es que una vez verificada su consistencia con los datos obtenidos en las obras, permiten establecer tiempos de inicio de compactación y tiempo máximo de compactación con lo que se puede solventar el problema generado por la falta de fiabilidad de las medidas de temperatura en la superficie durante la fase de compactación. Al igual que existen dispositivos de seguimiento del número de pasadas de compactador en cada zona, sería fácil implantar un control adicional de tiempo máximo de compactabilidad por encima del cual no se debería compactar una zona dada ya que previsiblemente el efecto conseguido produciría una merma de las prestaciones finales de la capa.

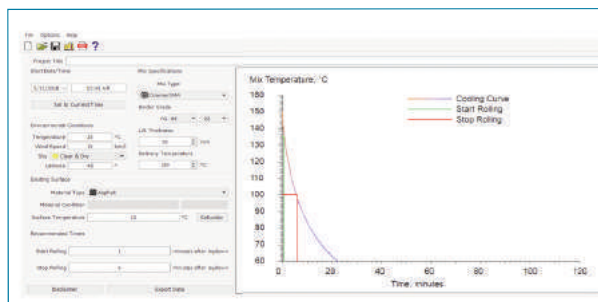


Figura 18. Aspecto de la información proporcionada por el software Pavecool. Fuente [10]

Ambas aplicaciones informáticas están disponibles también para dispositivos móviles lo que las hace especialmente útiles para los técnicos que están a pie de obra, pudiendo hacer estimaciones en función de condiciones climatológicas cambiantes, espesores de extendido o tipo de ligante.

Además, las bases de cálculo del software Pavecool son públicas pudiendo consultarse para conocer los detalles de los algoritmos e información utilizados [12].

5. ¿CÓMO PODEMOS MEJORAR EL CONTROL TÉRMICO?

A nivel normativo, la única referencia existente es la nor-

ma europea "UNE EN 12607-13 Mezclas Bituminosas. Medición de la temperatura". Desgraciadamente la información contenida en dicha norma es muy reducida por lo que difícilmente se puede realizar un salto de calidad basándose en la misma.

En otros países se ha abordado de forma sistemática el control térmico de las mezclas bituminosas, muy especialmente en la puesta en obra, donde se tienen pruebas fehacientes sobre la correlación entre falta de homogeneidad térmica y menor durabilidad del pavimento.

Dada la importancia del trabajo, el grupo de normalización AEN/CTN41/SC2/GT1 abordó el desarrollo de un informe técnico UNE que próximamente será publicado. En el mismo se describen cuestiones prácticas como: elección de instrumentos de medida, calibración/verificación de los mismos, periodicidades de control, determinación de perfiles térmicos etc. El contenido de dicho documento pretende facilitar a administraciones públicas, asistencias técnicas, constructoras y laboratorios de control un conjunto de herramientas que permitan fabricar, extender y compactar mezclas bituminosas de forma que se alcancen las máximas prestaciones

6. CONCLUSIONES

El control de la temperatura en las diversas fases que tienen lugar desde la fabricación hasta la compactación de las mezclas bituminosas es determinante para asegurar las prestaciones del pavimento, pero el control debe basarse en información detallada y clara. De esta manera, más que temperaturas de fabricación, extendido, etc. se deben definir rangos, lo que permite definir criterios de aceptación y rechazo. Por lo tanto, las fórmulas de trabajo deben proporcionar información sobre las temperaturas de las mezclas en las diversas fases, intentando conjugar los siguientes criterios:

- Minimizar las temperaturas de fabricación para reducir la oxidación del ligante, reducir el consumo de combustible en la fabricación y reducir las emisiones procedentes del betún.
- La reducción de la temperatura del betún, y del mástico, debe compaginarse con la búsqueda de las máximas prestaciones de las mezclas, a corto y a largo plazo.
- Bien con datos basados en la experiencia o en estudios de laboratorio, definir correctamente los rangos

de temperatura para el extendido y la compactación es imprescindible para una adecuada puesta en obra.

La elección de los equipos de medida de la temperatura debe tener en cuenta si podemos controlar la temperatura de la masa de mezcla bituminosa o tan solo la de su superficie. También es importante decidir el uso de equipos teniendo en cuenta cuestiones como la ergonomía y la salud laboral.

Con equipos de medida relativamente sencillos y una buena planificación es posible identificar si hay segregación térmica en un pavimento.

El desarrollo de sistemas de control de la temperatura sobre toda la superficie unido a la geolocalización está permitiendo identificar incidencias en los procesos productivos que conducen a segregaciones térmicas que posteriormente generan fallos prematuros de los pavimentos.

La puesta a punto de una buena logística entre producción, transporte y puesta en obra es el camino más adecuado para evitar segregaciones térmicas y áreas con baja densidad o propensas a pérdidas de material granular de forma prematura durante la puesta en servicio.

7. AGRADECIMIENTOS

La gestación de este documento y gran parte de la información ha sido posible gracias a las personas que participan, o han participado, en el grupo de trabajo AEN/CTN41/SC2/GT1/Control térmico: Julio Vaquero (Ministerio de Fomento), José Orenco Marrón (CEDEX), M^a Elena Hidalgo (Eiffage Infraestructuras), Rafael Naranjo (MOBA), Cristóbal Ramírez (MOBA), Pablo Álvarez (BECSA), Antonio García (CEPSA), Olga González (FCC), Jesús Felipe (PAVASAL), Cristina Álvarez (CHM), Antonio José Pérez, Marisol Barral (Campezo) y Javier Pérez Ayuso (CEDEX).

8. REFERENCIAS

- [1] West R.C., Watson D.E et al (2010). NCHRP Report 648: Mixing and compaction temperatures of asphalt binders in hot-mix asphalt; Transportation Research Board.
- [2] Loma J., Moreno E., et al (2009). Influencia de las características del betún y los másticos en la determinación de las temperaturas de fabricación y trabajo de las mezclas bituminosas; Comunicaciones libres IV Jornada Nacional

de Asefma. pp. 549-562.

- [3] García Santiago J.L. (2015). Nuevas tendencias en el Control de Calidad de la puesta en obra de MBC; Presentación de la V Jornada de Ensayos de Asefma.
- [4] Maßnahmen zur Steigerung der Asphalteinbauqualität StB 28/7182.8/5/2523413. (2016)
- [5] Perez F.E. (2009). Ensayos de mezclas bituminosas. Criterios de diseño. Nuevas propuestas; Jornada Nacional Asefma
- [6] Willoughby K.A., Mahoney J.P. et al (2001). Construction-related asphalt concrete pavement temperature differentials and the corresponding density differentials; Report WA-RD 476.1; Washington State Transportation Center (TRAC).
- [7] Segerpalm J. (2014). Auscultación termográfica. Experiencia y métodos actuales a nivel internacional para el control continuo y en tiempo real de segregaciones en la puesta en obra de mezclas bituminosas en caliente; Presentación de la IV Jornada de Ensayos de Asefma.
- [8] Stroup-Gardiner M., Brown E.R. (2000). Report 411. Segregation in hot-mix asphalt pavements; Report WA-RD 476.1; Washington State Transportation Center (TRAC).
- [9] TEX-244-F. Thermal profile of hot mix asphalt. December 2015.
- [10] Pavecool. <http://www.dot.state.mn.us/app/pavecool/>
- [11] Multicool. <http://www.eng.auburn.edu/users/timmdav/MultiCool/FinalRelease/Main.html#Disclaimer>
- [12] Chadbourn B.A, Newcomb D.E. et al (1998), An asphalt paving tool for adverse conditions. Final Report file:///C:/Users/jlpen/Google%20Drive/Dell%2001122016/Varios/AENOR/Informes%20t%C3%A9cnicos/Termograf%C3%ADa/documentos%20aportados/PaveCool1998_18%20manual.pdf