

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**

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

INTRODUCCIÓN

En los últimos años se han presentado numerosos artículos sobre la problemática de segregaciones en la puesta en obra de mezclas bituminosas, muchos de ellos en publicaciones de ASEFMA. Una técnica que se repite en la identificación y evaluación de segregaciones es la termografía, pero hasta el momento en España no se ha presentado un método práctico que posibilite el control continuo. Se describen en este artículo experiencias internacionales de cómo se ha resuelto este problema, con éxito. Se presentan técnicas de auscultación termográfica que se están aplicando actualmente, o se encuentran en desarrollo en los países escandinavos y en los Estados Unidos. También se describe cómo se ha podido relacionar directamente la problemática de segregaciones térmicas y granulométricas en la puesta en obra con la durabilidad del pavimento y otros parámetros de calidad.

Durante la puesta en obra del pavimento, la posibilidad de llevar a cabo un control continuo frente al habitual control puntual permite evaluar, valorar y mejorar la homogeneidad del producto, lo cual incrementa drásticamente la eficiencia en las actuaciones de rehabilitación y nueva construcción de firmes. Se estima una prolongación de la vida útil de una capa de mezcla bituminosa producida con segregaciones minimizadas en entre 25 y 50%, sin mayor coste de implementación.

DESCRIPCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA

El pavimento de nuestras carreteras tiene el doble objetivo de ofrecer una superficie homogénea y óptima para la circulación rodada y resistir los efectos de agotamiento que tiene sobre él el tráfico, el clima y el tiempo. Normalmente las deficiencias que aparecen en la superficie del pavimento, y en consecuencia la reducción de serviciabilidad, es un resultado de deficiencias puntuales de la carretera, representando superficies muy pequeños del total de la carretera. Estas deficiencias son prácticamente invisibles cuando la carretera se pone en servicio pero fácilmente identificables tras unos años de uso, sobre todo en estado húmedo.

El sistema de control de calidad de la puesta en obra de superficies de mezcla asfáltica consiste, mundialmente, en un control estadístico mediante



Segregación producida en el extendido, muy común en el cambio de camión delante de la extendidora. El defecto se suele apreciar a los pocos años de la producción y se convierten pronto en áreas de problema que requiere adelantar la rehabilitación.

testigos. Es decir, un producto cuya mayor debilidad reside en su heterogeneidad, actualmente se mide con muestras puntuales que normalmente no coincidirían con las áreas de riesgo.

En este sentido, el control de calidad convencional, basado en la extracción de testigos y ensayos de compactación, huecos, granulometría y contenido de ligante, y en el mejor de los casos algunas características funcionales de la capa controlada, se limita a un control estadístico, poco eficaz para encontrar los puntos débiles. Este control de calidad no consigue detectar de una manera eficaz y creíble la calidad real del producto.

Lote 3.500 m² control de huecos (%) y espesor

- 5 testigos (0,04 m² = 0,001 % de la superficie)

Como se comentó anteriormente se han presentado en España en los últimos años varios artículos sobre segregaciones en la puesta en obra de mezclas bituminosas y el uso de termografía para identificar estas segregaciones, pero no se ha descrito un método práctico para un control continuo^{1, 2, 3}.

Este artículo no se detiene en la descripción de la problemática de las segregaciones que, está ampliamente descrita en otras publicaciones⁴, sino que presenta un método para poder detectarlas y corregirlas. Aún así se incluye a continuación un resumen de las causas de los fallos cíclicos asociados a los cambios de camión, siendo estos los fallos más característicos ligados a las segregaciones térmicas:

- la alteración de la composición de la mezcla en la operación de carga en planta,
- el enfriamiento parcial en el camión, causando cortezas frías que igualmente aumentan la

segregación granulométrica por rodamiento de áridos y diferencias de viscosidad.

- el enfriamiento en la tolva de la extendedora, en parte por las cortezas o la mezcla ya separada en el camión, que acaba en los lados de la tolva y en parte por la falta de movimiento en los lados de la tolva.
- las paradas de la extendedora, con enfriamiento en la tolva, en el sistema de alimentación y detrás de la regla.

Como consecuencia de las diferencias en temperatura de la mezcla extendida se crean irregularidades (IRI empeorado) debido primero a que la regla de la extendedora funciona flotando sobre la mezcla y un cambio en la viscosidad de la mezcla necesariamente conlleva un cambio de altura de la regla. Como segunda consecuencia, la segregación térmica también afecta a la compactación, tanto en la extendedora como por las compactadoras. Un tercer resultado de esta segregación de origen térmico es que se convierte igualmente en una segregación granulométrica, con mayor contenido de áridos gruesos, sobre todo en las zonas de cambio de camión. Se juntan por lo tanto una serie de problemáticas las cuales contribuyen a empeorar la regularidad y al fallo prematuro del pavimento.

TÉCNICAS EXISTENTES PARA MEDICIÓN DE SEGREGACIONES TÉRMICAS

Existen varias técnicas que de una manera u otra sí permiten identificar, medir y cuantificar las segregaciones y la heterogeneidad de toda la superficie producida, en forma de valores de densidad, dielectricidad, regularidad geométrica o de textura o mediante termografía en puesta en obra. La siguiente tabla, sin pretender ser completa, menciona algunas técnicas y su implementación.

Cada una de estas técnicas representan ventajas sobre el control de calidad estadístico, pero la única que permite un control continuo en tiempo real de la superficie producida es la termografía.

¹ Abertis, *Nuevo sistema de control de calidad en obra mediante termografías*, V Jornada Nacional, AEFMA 2010.

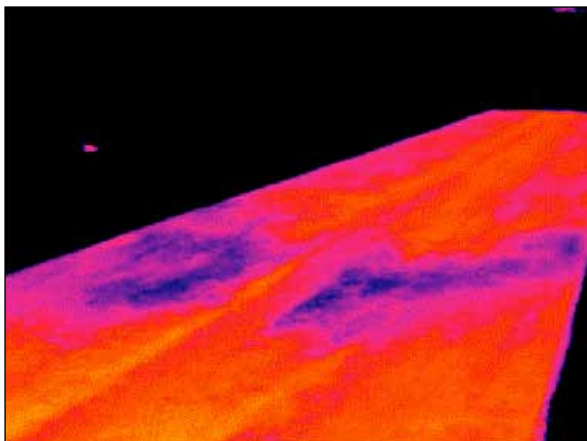
² Costa, A., *Equipos de transferencia y exigencias de regularidad*, Jornada Técnica – Mezclas Bituminosas, AEFMA 2009.

³ Carmona, M. et al, *Aplicación de tecnología infrarroja en control de calidad y puesta en obra de mezclas bituminosas en caliente*, VI Jornada Nacional, AEFMA 2011.

⁴ Gómez, E., *Factores que influyen en la heterogeneidad de la fabricación y extendido de las mezclas bituminosas en caliente así como el efecto en su comportamiento*, UPC 2009.

Técnicas de control continuo de homogeneidad	Implementado o en desarrollo
Auscultación térmográfica en puesta en obra (Infrarrojos)	Escandinavia, EEUU
Auscultación térmográfica en superficies frías (Infrarrojos)	Finlandia
Auscultación de densidad con equipo nuclear (DOR)	Suecia
Auscultación de dielectricidad mediante georadar (GPR)	Finlandia, Suecia, (EEUU)
Auscultación continua de textura MPD (sistemas Láser)	Suecia

En **España** el uso de la termografía en la producción se ha limitado a trabajos de I+D para la descripción del problema de segregación térmica, utilizándose cámaras estáticas de infrarrojos que permiten captar las diferencias en temperatura, pero su valor es más pedagógico que práctico en la mejora de calidad.



Superficie con segregación térmica (y granulométrica) capturada con cámara estática.

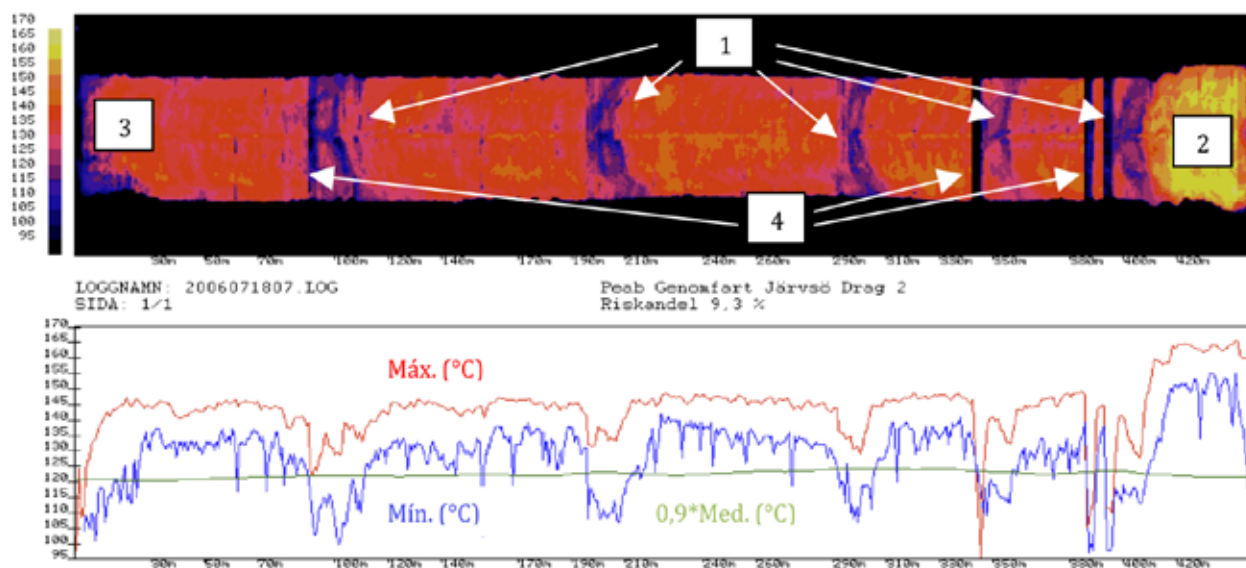
Método escandinavo:

La técnica de auscultación termográfica de las mezclas bituminosas se introdujo en Escandinavia en la década de los 90ª con el desarrollo del escáner de infrarrojos o escáner termográfico. El desarrollo se produjo por iniciativa de las empresas constructoras y fue financiado por el Fondo de Desarrollo de la Asociación Sueca de trabajadores de la construcción (SBUF). Pronto se introdujo tanto en Suecia como en Noruega como una técnica de mejora de calidad y se creó un sistema de penalización/bonificación en contratos de obra para incentivar su uso. La metodología actualmente vigente en Suecia es la VVP 2006:114 *Método para auscultación térmica* y se utilizan unos 25-30 maquinas del tipo *Linjescanner* en los dos países. En el año 2012 se registraron cerca de 10 millones de m² con esta técnica.

El escáner termográfico o de infrarrojos se monta en la parte trasera de la extendedora a unos 3-4 metros por encima de la superficie extendida, y la medición se realiza aproximadamente 1 m detrás de la regla de la extendedora. La cámara escanea la capa en producción en toda su anchura y registra la temperatura en 256 puntos de 10 cm². La medición se realiza en líneas transversales cada 20 cm de avance. El resultado es una reproducción completa en 2D de la temperatura de la capa extendida con datos de posición, temperaturas máximas y mínimas, porcentaje de *áreas de riesgo* (<90% de temperatura media) y velocidad de avance. Como la medición se realiza con infrarrojos también influye la estructura de la superficie,



El escáner termográfico tipo Linjescanner montado en la parte trasera de la extendedora.



Tramo de 450 m auscultada en continuo con escáner termográfico en línea. Se registran claramente las características segregaciones térmicas cada 80-100m debido al cambio de camión (1), así como otras anomalías de la cadena de producción: diferencias en la temperatura de la mezcla recibida (2), problemas al inicio del extendido (3) y paradas (4).

lo que incrementa la detección de segregaciones granulométricas surgidas en la producción.

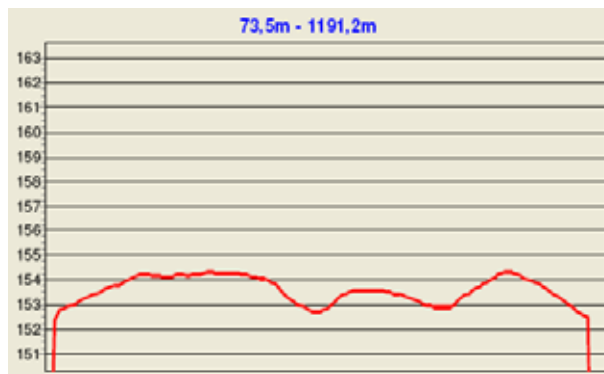
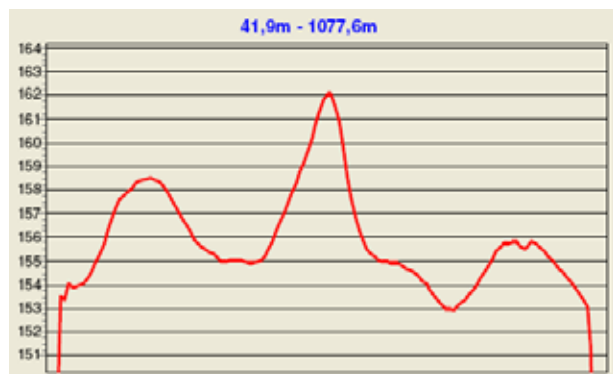
La técnica actualmente incorpora el seguimiento remoto (por internet y GSM) de la mezcla producida en planta, la posición de la flota de transporte, la mezcla transportado por cada camión y de los resultados obtenidos en tiempo real, y se trabaja actualmente en el desarrollo de un sistema combinado de auscultación de temperatura y textura. En la imagen superior se incluye un ejemplo de registro de auscultación termográfica.

A partir de las primeras auscultaciones realizadas en los años 90 se pudo demostrar una correlación muy directa entre las segregaciones termográficas y las separaciones en la capa extendida, con diferencias

en granulometría e incremento de contenido de huecos de 50-100 % en las áreas de riesgo. También se ha podido demostrar en numerosas investigaciones que las áreas de riesgo coinciden con las áreas de problemas de durabilidad a medio plazo.

Las principales ventajas de la técnica se resume en:

- la identificación de segregaciones y zonas de riesgo,
- el resultado proporcionando una imagen del pavimento producido en toda su extensión,
- la auscultación se realiza de manera simultánea al extendido, lo cual permite usar el resultado en tiempo real y corregir anomalías sobre la marcha,



Perfiles transversales de termografía como media sobre un km, demostrando un trabajo con segregaciones transversales (izda) y un trabajo con un extendido adecuado (dcha).

- la documentación de varios factores de la producción, tal y como la velocidad, paradas, variaciones tanto en la producción en planta y el transporte, como en el extendido,
- el método es fácil de aplicar y, sobre todo, produce resultados rápidos y duraderos al implicar a toda la cadena de producción y estimular al personal a mejorar su trabajo.

Metodo EEUU:

En Tejas, EEUU, se ha desarrollado recientemente una técnica diferente al escáner de termografía utilizado en los países escandinavos. La técnica que se está implementando actualmente en este y en otros estados, se basa en un sistema constituido por una serie de cámaras IR montadas sobre una barra detrás de la regla a poca altura. La temperatura se mide en líneas paralelas y se interpolan las superficies entre ellas para obtener una imagen termográfica 2D.

Como se puede observar en la imagen, este sistema tiene la desventaja de quedar montado en una zona de trabajo, que puede llegar a interferir con el extendido y compactación de la mezcla.

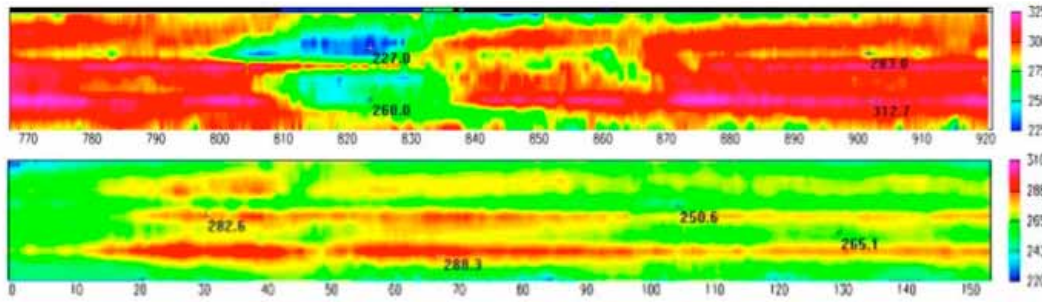
El método ha sido probado en las cuatro regiones de AASHTO en un proyecto incluido en el programa americano de investigación SHRP-2. Las auscultaciones realizadas entre los años 2009 y 2011 presentaron resultados positivos con una correlación obvia entre los resultados de segregación térmica y el contenido de huecos en la capa producida⁵.

Se ha podido constatar que un diferencial termográfico de más de 25° F (= 14° C) implica que el 90 % de los puntos medidos muestran una densidad fuera del rango permitido.

⁵ S. Sebesta, T. Sarenkeeto, T. Scullion, *Using Both Infrared and High Speed Ground Penetrating Radar for Uniformity Measurements on New HMA Layers*, SHRP 2 Renewal Project R06C, 2012



Infrared sensor bar system / Sistema de sensores IR montado en barra, Tejas, EEUU.



Dos superficies auscultadas con Infrared sensor bar system PAVE-IR, mostrando cómo tras modificaciones en la producción se obtiene una mejora considerable en la homogeneidad.

EJEMPLOS DE TRABAJOS DE AUSCULTACIÓN

A continuación se incluyen unos trabajos de auscultación realizados en Suecia con el método escandinavo descrito anteriormente. También se presentan resultados que demuestran la correlación entre las segregaciones termográficas y otros ensayos de control de calidad.

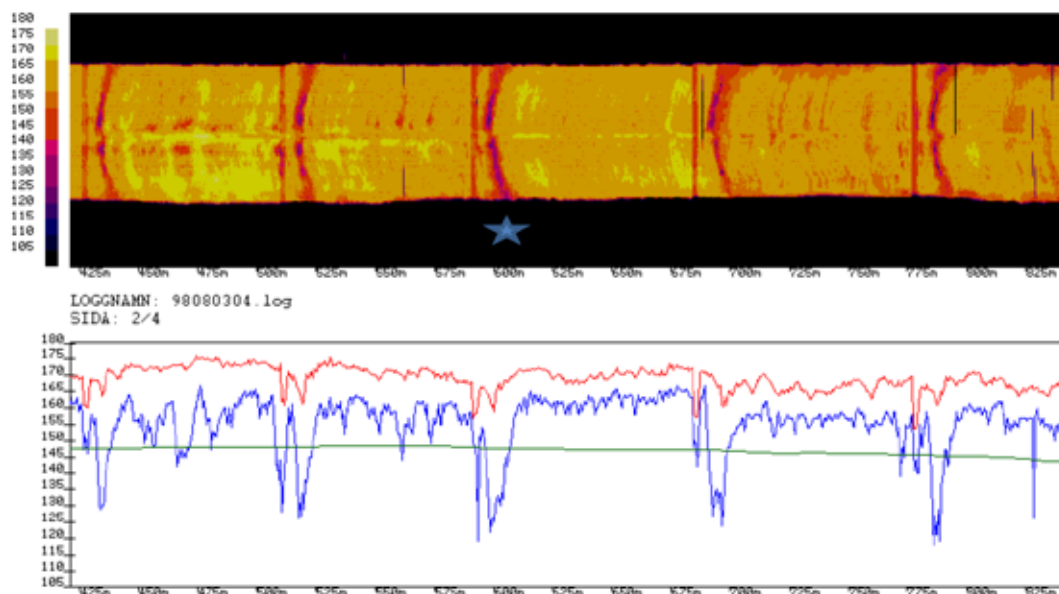
Para ver más resultados se puede acceder a la página web www.gptux.adelo.se (demo/demo), donde se guardan auscultaciones de varios años.

A) E20 Södertälje, año 1998, áreas de riesgo 4,3%

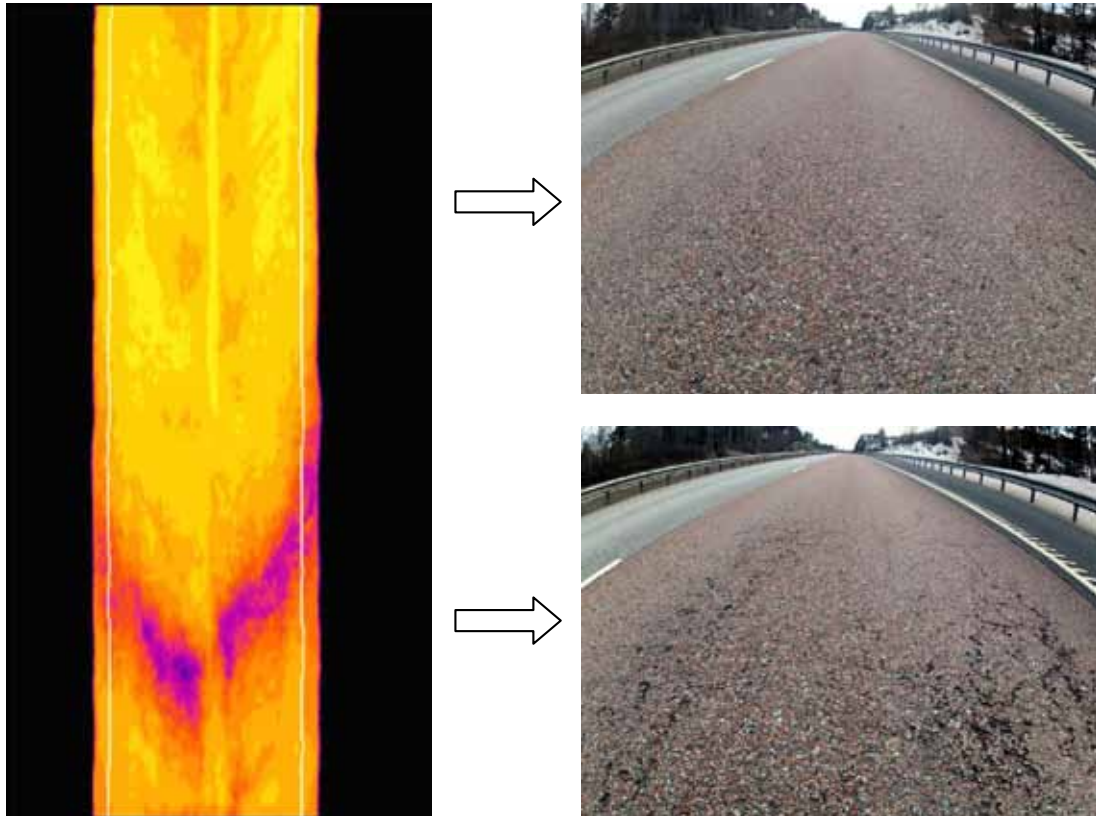
Este trabajo de rehabilitación de un tramo de autovía con una nueva rodadura de mezcla ABS-16 fue uno

de los primeros donde se aplicó el modelo de penalización / bonificación en función del resultado de auscultación termográfica. El resultado, con una media de 4,3% de áreas de riesgo ha de considerarse razonable y se premio con una pequeña bonificación.

En la primavera de 2013 se ha realizado una inspección del tramo y se ha podido constatar que la rodadura ha alcanzado su vida útil esperada de 15 años, por lo que se ha tomado la decisión de fresar la capa y reponerla. La rotura de la rodadura se ha producido en las zonas de cambio de camión que se podía capturar en la auscultación 15 años atrás, y si se hubiera podido evitar, la vida útil de la rodadura se habría visto prolongada en al menos un par de años. El fallo está directamente relacionado con la segregación de la mezcla en estas áreas de riesgo, con alto contenido de huecos, falta de betún y finos y reducida resistencia al agua.



Registro de parte de la auscultación realizada durante la puesta en obra en 1998, con resultado típico. La sección marcada con estrella se presenta en la siguiente imagen.

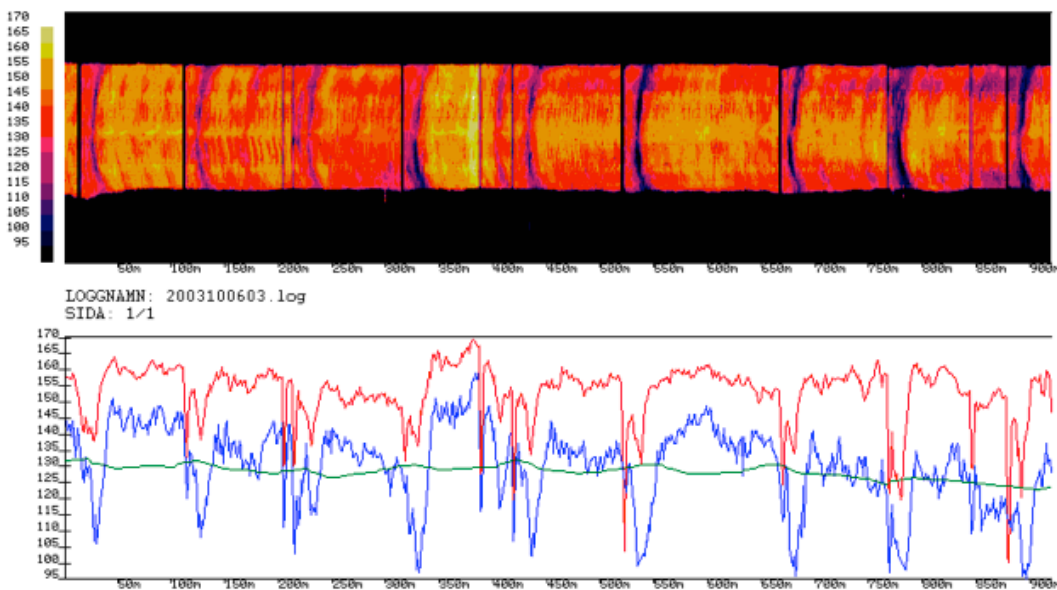


Segregación registrada en la auscultación 1998 y fallo localizado en 2013.

B) E4 Järna-Södertälje, año 2003, áreas de riesgo 7,6% (> 11% en algunos tramos)

El trabajo de rehabilitación se realizó con fresado y reposición con nuevas capas de intermedia D-22 y

rodadura S-16. El resultado presentó claras segregaciones térmograficas, que en algunos tramos llegaron a representar más del 10% de la superficie extendida. La rodadura del tramo tuvo una vida útil de 7 años y se volvió a fresar y reponer en el año 2010.

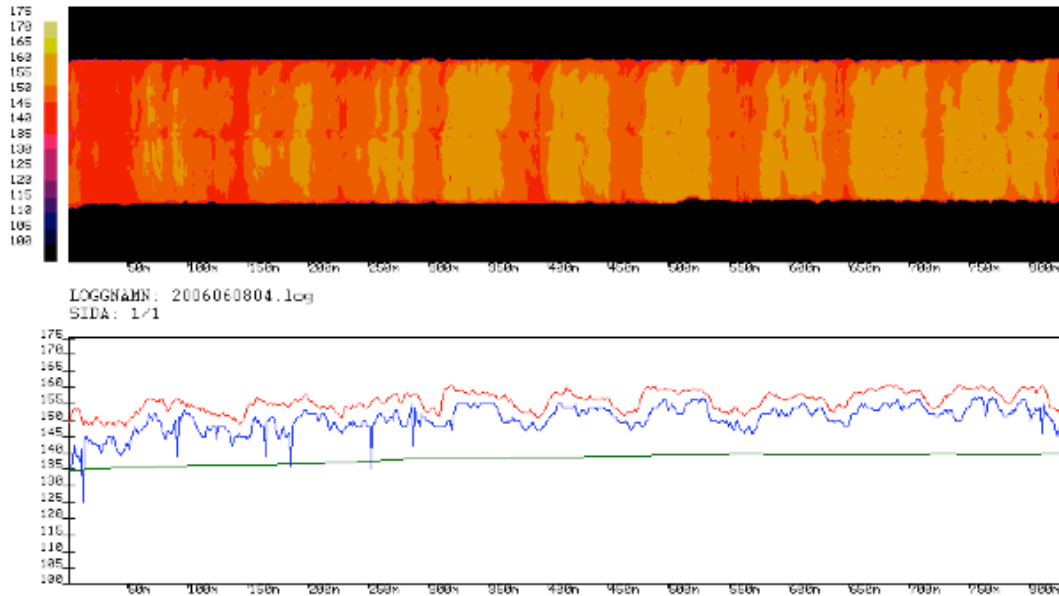


Tramo de la autovía E4 registrado en 2003 con áreas de riesgo de entre 6-11%, resultando en fallos prematuros y la necesidad de adelantar la rehabilitación varios años.

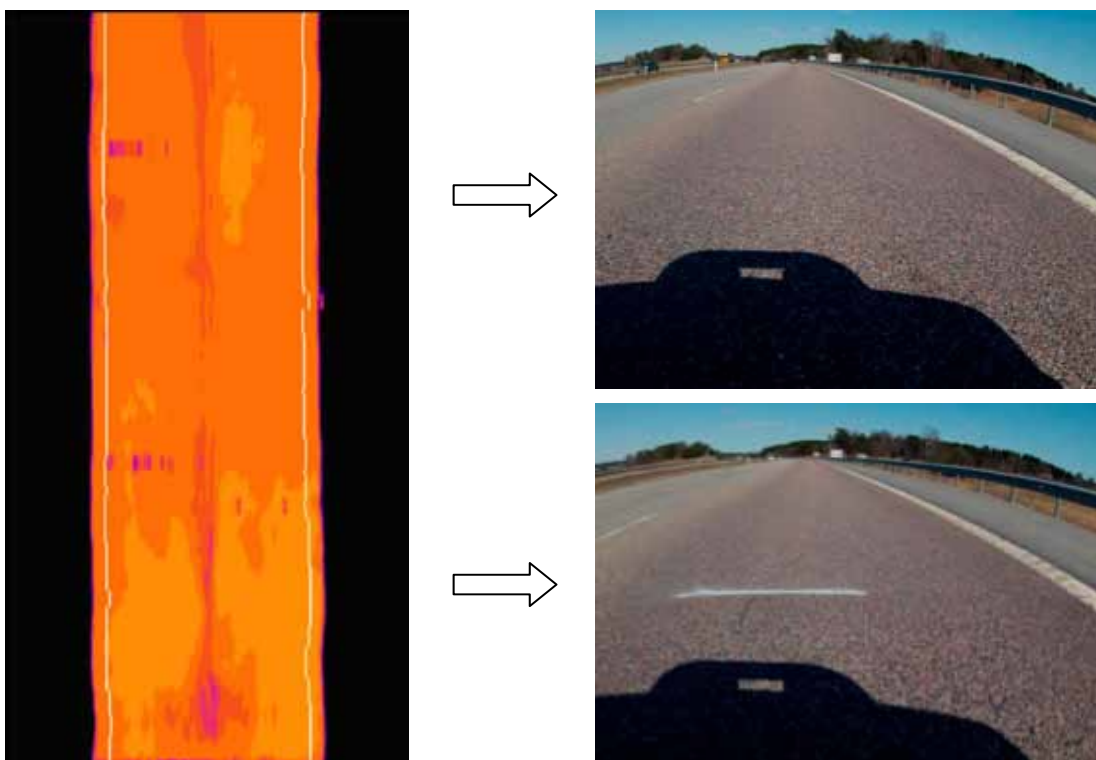
C) E4 Límite de Södermanland-Järna, año 2006, áreas de riesgo 0,4%

La actuación es idéntica a la anteriormente descrita y tiene el mismo tráfico, pero se utilizó un equipo de transfer (silo móvil de transferencia) tipo Shuttle Buggy para homogeneizar la mezcla

antes del extendido. El resultado fue muy satisfactorio y se consiguió reducir las segregaciones térmicas a un mínimo. La inspección visual de la superficie y las deformaciones medidas durante los 6 primeros años de seguimiento del tramo indica una vida útil de la rodadura estimada en al menos 12 años.



Registro de la auscultación de la autovía E4 en 2006 con un mínimo de áreas de riesgo (cerca del 0%). El seguimiento de la carretera hace prever que la rodadura llegará a tener una vida útil de al menos 12 años.



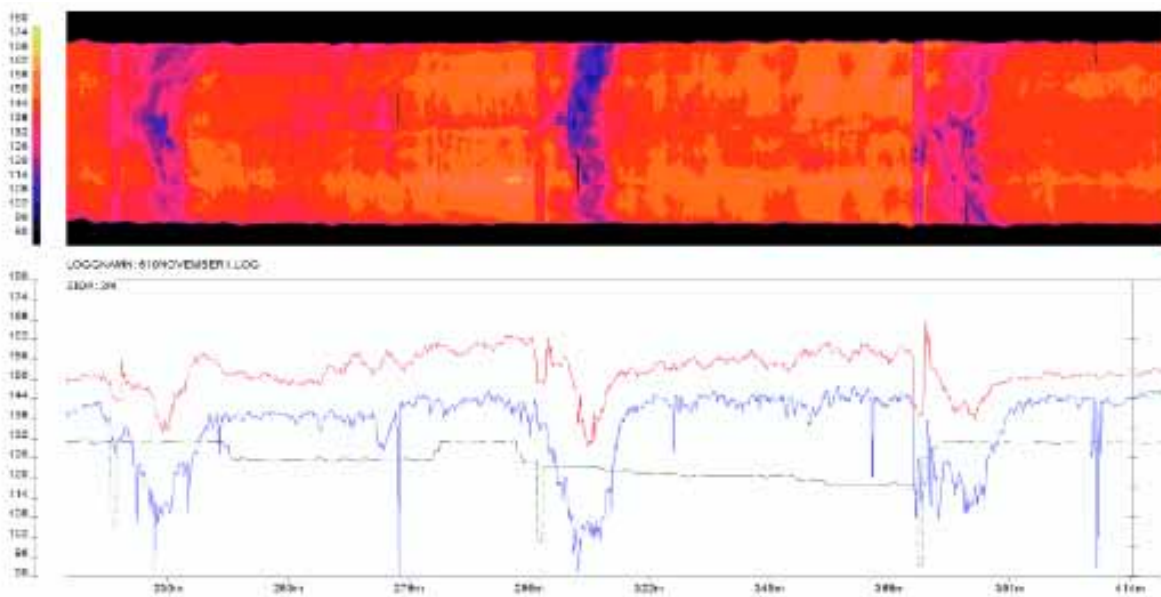
Detalle de la auscultación termográfica del 2006 y fotos de la inspección realizada en 2013.

D) Rv 48 Sunktastan, año 2003, áreas de riesgo 5,8%

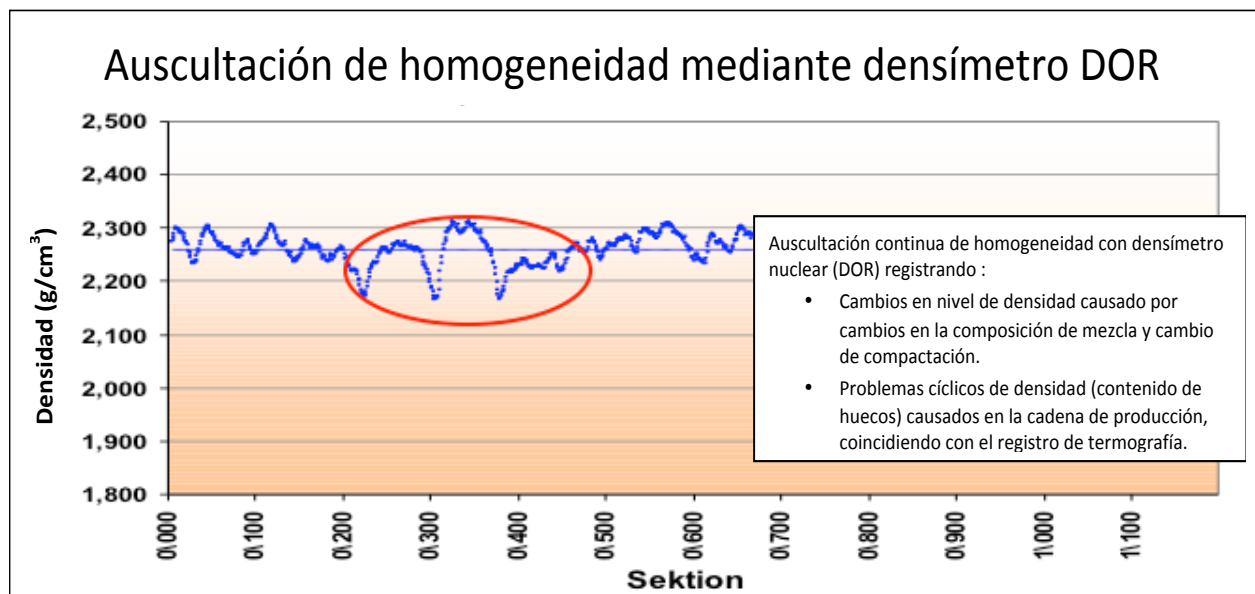
La actuación de rehabilitación de la carretera Rv 48 comenzó en el 2003 con la regularización y el extendido posterior de una capa de mezcla bituminosa D-20. En el control de calidad se incluyó, aparte de la auscultación termográfica, también auscultación continua con un densímetro nuclear (DOR). El resultado de ambas auscultaciones coincide en la identificación de áreas de riesgo (segregaciones).

E) Rv 40 Kullamotet–Ryamotet Göteborg, año 2012, áreas de riesgo 2,7%

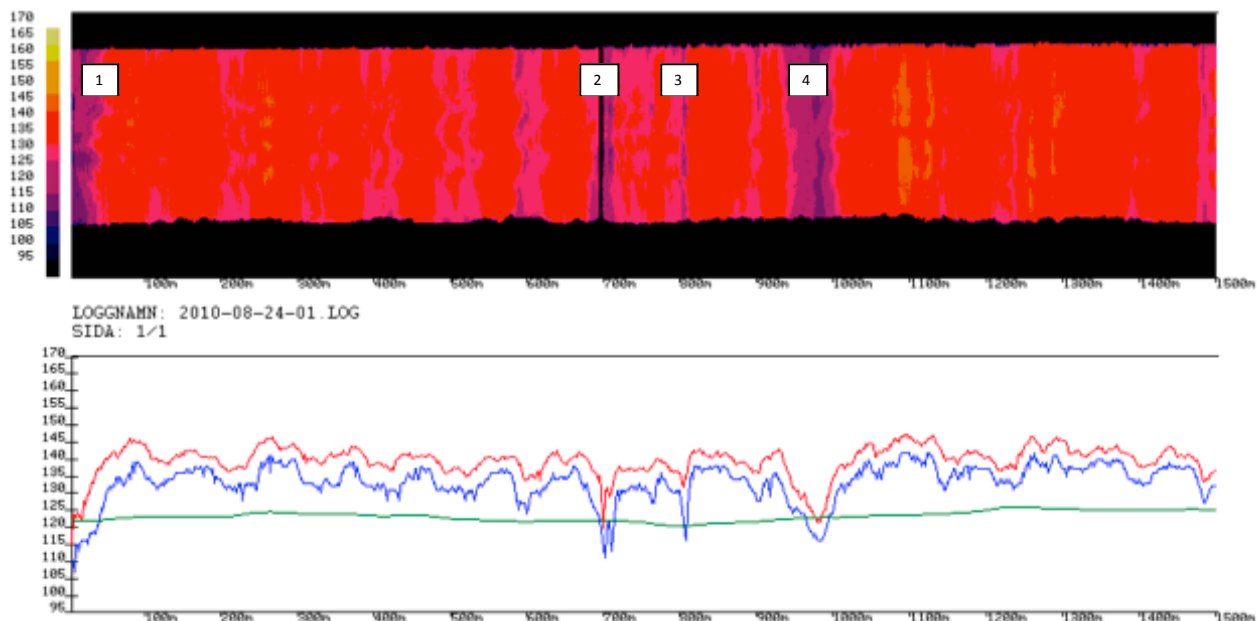
La actuación incluyó el extendido de una mezcla BBTM-10 en 4 carriles en una longitud de 12 km. A pesar del uso de un equipo de transfer Shuttle Buggy se produjeron ciertos fallos como se aprecia en la imagen de la siguiente página: enfriamiento por lento arranque de los trabajos (1), parada con material en tolva (2), vaciado de transfer (3), variación en temperatura recibida de planta (4).



Detalle de la auscultación termográfica de la actuación con segregaciones identificables y con la velocidad de la extendidora representada en el gráfico (1), variando entre 1 y 4 m/s.



Registro de auscultación de homogeneidad de densidad. El tramo marcado representa tramo del registro de auscultación termográfica.



Registro de auscultación termográfica de la puesta en obra en 2012.



Junta en capa de microaglomerado producida por parada en el extendido.

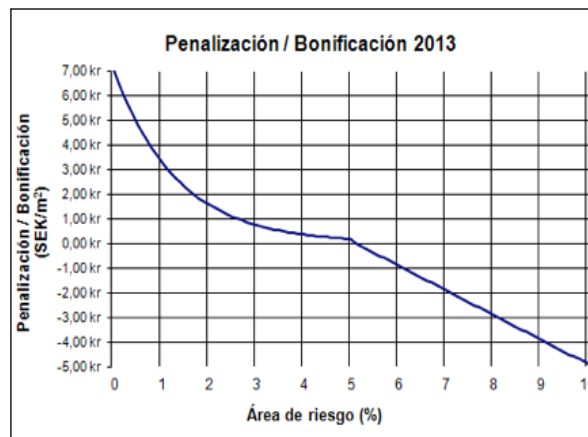
METODO DE PENALIZACIÓN / BONIFICACIÓN EN CONTRATOS DE OBRA

En los países escandinavos se utilizan desde hace más de 10 años para trabajos seleccionados un sistema de penalización / bonificación ligado a los resultados de homogeneidad termográfica obtenidos. En la Demarcación de Carreteras del Estado en Estocolmo por ejemplo se ha aplicado un ajuste de +/- 5 SEK/m² (aprox. 0,5 €/m²) que para el año 2013 se ha decidido incrementar a +/- 7 SEK/m². Los resultados obtenidos en los últimos años, sobre todo con un incrementado uso de Shuttle Buggy,

están llevando que se va a ajustar el nivel "aceptable" de 5% de áreas de riesgo a 3%. En Noruega el método es similar, pero con una bonificación máxima del orden de 1€/m².

Ejemplo de método de Estocolmo, (relacionado al *área de riesgo*, la parte medida por debajo del 90% de la temperatura media corrida):

- **0 ≤ Área de riesgo ≤ 5,0 %**
Bonificación ligada a la reducción de áreas con segregación termográfica = 7 SEK * e^{-0,75 * área de riesgo (%)}
- **Área de riesgo > 5,0 %**
Penalización ligada a alto grado de áreas con segregación termográfica = 5,1 – Área de riesgo (%)



CONCLUSIONES

El propósito de este artículo es principalmente el de presentar una técnica ya implementada en otros países que responde a una carencia de método de control y evaluación de la problemática de segregación en la puesta en obra de mezclas bituminosas.

El método presentado permite controlar en tiempo real las segregaciones térmicas (y como consecuencia granulométricas), y por las razones aquí expuestas ha de considerarse una herramienta excepcional para poder evaluar e incrementar la eficiencia en las actuaciones de rehabilitación y nueva construcción.

La implementación del método en otros países ha permitido dar respuesta a un problema ya muy documentado y ha conllevado un avance en los siguientes puntos:

- Homogeneidad en mezcla y garantía de alcanzar el comportamiento diseñado (mezcla proporcionado en diseño se mantiene con sus características en la puesta en obra).
- Minimización de zonas de segregación/superficies de riesgo (prolongando considerablemente la vida útil).
- Mejora del IRI debido a 1) homogeneidad granulométrica y térmica de la mezcla, 2) mejor control sobre la velocidad de extendido reducción de paradas. La velocidad y la temperatura (viscosidad) influyen en el funcionamiento de la regla de la extendidora.
- Un control de calidad EN TODA LA SUPERFICIE de la obra de pavimentación con registro creado en tiempo real.
- Incorpora un control de prácticamente toda la cadena de producción, desde la formulación de la mezcla, producción en planta, carga y transporte, transfer y extendido.
- Incrementa desde el primer día de aplicación la participación y el interés del equipo de obra, y las experiencias ganadas durante unos pocos días de utilización son perfectamente aplicadas una vez retirado el equipo de medición.

Después de más de una década el método ha permitido estimar una prolongación de la vida útil de una capa de mezcla bituminosa producida con segregaciones minimizadas en entre 25 y 50%, sin mayor coste de implementación.