



Escola Tècnica Superior d'Enginyers
de Camins, Canals i Ports de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

PROJECTE O TESINA D'ESPECIALITAT

Títol

**Factores que influyen en la heterogeneidad de la fabricación
y extendido de las mezclas bituminosas en caliente así como
el efecto en su comportamiento**

Autor/a

Eva Gómez González

Tutor/a

Félic E. Pérez Jiménez

Departament

Departament Infraestructura del Transport i Territori

Intensificació

Transports

Data

Mayo 2009

ÍNDICE

Capítulo 1. Introducción y objetivos.	1
1. Introducción y objetivos.	1
Capítulo 2. Factores que alteran la homogeneidad de la mezcla.	4
2.1 Segregación granulométrica.	5
2.2 Segregación térmica.	6
Capítulo 3. Patologías derivadas de la falta de homogeneidad.	9
3.1. Fallos cíclicos.	11
3.1.1. Causas de la segregación cíclica o segregación final de camión.	12
3.1.1.1. Carga de camión.	12
3.1.1.2. Formación de la corteza durante el transporte.	13
3.1.1.3. Descarga del camión.	14
3.1.1.4. Extendedora: parada y arranque rápido.	14
3.1.1.5. Vuelo de las alas.	15
3.2. Fallos longitudinales.	16
3.3. Fallos aleatorios.	16
3.4. Patologías derivadas de la segregación.	16
3.4.1. Peladuras.	17
3.4.2. Formación de roderas.	17
3.4.3. Veta longitudinal.	18
3.4.4. Apertura de juntas longitudinales.	18
3.4.5. Defectos de regularidad evolutivos.	18
Capítulo 4. Identificación zonas segregadas.	19
4.1. Identificación visual.	19
4.2. Termografía de infrarrojos.	20
4.3. Medición de la textura.	22
4.3.1. Método del círculo de arena.	22
4.3.2. Texturómetro láser.	23
4.3.2.1. Greenwood Engineering (Dinamarca).	23
4.3.2.2. ARAN (fabricado por Roadware de Canadá).	24
4.3.2.3. WDM- HSTM.	24
4.3.2.4. ARBB.	25
4.3.2.5. ROSANv.	26
4.3.3. GPR: Ground Penetration Radar.	27
4.3.4. Perfiles de densidades.	30
4.3.4.1. Procedimientos generales para la localización de los perfiles de densidad.	31
4.3.4.2. Elaboración perfil densidad.	33
4.3.4.3. Métodos nucleares.	35
4.3.4.4. Métodos no nucleares (basados en la resistividad): PQI (Pavement Quality Indicator).	37
4.3.5. Extracción de testigos.	37
Capítulo 5. Diseño y fabricación de la mezcla.	38

Capítulo 6. Carga de camión en planta.	40
Capítulo 7. Transporte de la mezcla.	42
7.1. End dump truck.	43
7.2. Bottom Dump Truck.	44
7.3. Live Bottom Dump Truck.	45
7.4. Cuadro resumen.	46
Capítulo 8. Consideraciones operacionales de la carga y el transporte de la mezcla.	48
8.1. Consideraciones operacionales de la carga en planta.	49
8.2. Transporte de camión.	49
8.3. Descarga en la zona de pavimentación.	52
8.4. Sincronización de la operación.	52
Capítulo 9. Extendido de la mezcla.	54
9.1. Método tradicional: vertido directo desde camión a extendedora.	54
9.2. Dispositivos de transferencia de material.	56
9.2.1. Alimentador.	56
9.2.2. Windrow elevator o elevador de material en cordón.	57
9.2.3. Shuttle Buggy (Silo de transferencia).	57
9.2.4. Ventajas derivadas de la aplicación de los dispositivos de transferencia de material.	63
9.3. Extendedora: precompactación.	64
9.4. Derrames de material durante el extendido.	64
9.5. Importancia de la extensión.	66
Capítulo 10. Compactación.	67
10.1. Importancia de la compactación.	68
10.2. Factores y variables a tener en cuenta en la compactación.	69
Capítulo 11. Control de calidad.	70
11.1. Control de recepción de la unidad terminada: mejora del IRI.	71
11.1.1. Técnica tradicional mejorada: empleo de sistemas de nivelación de última generación.	71
Capítulo 12. Incentivos y sanciones.	74
12.1. Definición de los niveles de segregación.	75
12.2. Índice AREA para la aceptación del lote.	76
12.3. Área de cada nivel de segregación.	77
12.4. Factores de ajuste de pago propuestos.	77
12.5. Normativa española.	78
12.5.1. Incentivos.	81
Capítulo 13. Estudio experimental.	83
13.1. Planteamiento.	84
13.2. Ensayo de tracción indirecta.	86

13.3. Ensayo de determinación del módulo resiliente mediante compresión diametral.	87
13.4. Ensayo de determinación del módulo de rigidez a tracción indirecta. . .	89
13.5. Resultados obtenidos.	92
13.5.1. Densidad.	92
13.5.2. Ensayo a tracción indirecta.	94
13.5.3. Ensayo de determinación del módulo resiliente mediante compresión diametral.	95
Capítulo 14. Conclusiones y recomendaciones.	97
14.1. Recomendaciones sobre los métodos de identificación.	97
14.2. Recomendaciones sobre el transporte de la mezcla.	98
14.3. Recomendaciones en el uso de la extendidora.	98
14.4. Planificación de las operaciones de extendido y compactación.	100
14.5. Relación espesor de capa y tamaño máximo de árido.	100
14.6. Novedades en la compactación.	101
14.7 Conclusiones del estudio experimental.	102
14.8. Conclusiones.	102
Referencias bibliográficas.	104

Anejos

- Anejo 1: Observaciones de campo
- Anejo 2: Propiedades de la mezcla de ensayo
- Anejo 3: Termografías

Título: Factores que influyen en la heterogeneidad de la fabricación y extendido de las mezclas bituminosas en caliente así como el efecto en su comportamiento

Autor: Eva Gómez González

Tutor: Félix E. Pérez Jiménez

Las mezclas bituminosas en caliente que están debidamente diseñadas, producidas y vertidas en su lugar proporcionan pavimentos duraderos y resistentes que requieren muy poco mantenimiento. No obstante, hay una cantidad de problemas potencialmente dañinos que pueden surgir durante estos procesos. De todos estos problemas, probablemente el más grave es el de segregación. La segregación es un problema que recurre con frecuencia y que ha generado preocupación en la industria de la pavimentación por varias décadas, por lo cual recibe la atención general de los contratistas, departamentos de obras públicas y fabricantes de equipos.

Tradicionalmente, las áreas identificadas visualmente que presentaban una textura no uniforme eran clasificadas como zonas segregadas. Puesto que este tipo de evaluación es subjetiva, hay dificultades para ponerse de acuerdo sobre lo que es la segregación.

La segregación propiamente dicha ha estado asociada a la segregación de tipo granulométrico, sin embargo se ha demostrado que durante la puesta en obra de las mezclas bituminosas en caliente se producen una serie de diferenciales térmicos que afectan a la homogeneidad de la mezcla dando lugar a zonas de material más frío en las que durante la compactación se alcanzará una densidad menor. A este fenómeno se le denomina segregación térmica.

Cuando se produce la segregación granulométrica, determinadas áreas del pavimento se caracterizan a menudo por diferentes texturas de la superficie que rodea el material y por lo general pueden ser vistas a simple vista. Respecto a la segregación térmica, se presenta en cavidades aisladas de diferentes temperaturas fruto de las operaciones del proceso de pavimentación. Estas áreas también pueden producir irregularidades en la capa visibles a simple vista.

La segregación térmica fue primeramente propuesta en 1996 por un estudio realizado en la Universidad de Washington. Durante este estudio se observó que un gran número de proyectos de pavimentación había experimentado una ocurrencia cíclica de áreas del pavimento con baja densidad. Este problema dio lugar a la observación de los diferenciales de temperatura de la capa asfáltica. Estos diferenciales de temperatura resultaban de la colocación concentrada de una masa más fría de mezcla, cuya temperatura estaba próxima o era inferior a la temperatura límite de compactación.

Mientras se estudiaba esta ocurrencia cíclica (o también denominada segregación final de camión) de la mezcla bituminosa en caliente, se concluyó que era un problema relacionado con la variación de temperatura de la mezcla dentro de los camiones de transporte. Se determinó el desarrollo de una corteza fría que se desarrollaba en la caja del camión durante el transporte de la mezcla desde la planta al lugar de trabajo.

La segregación térmica es la principal autora del fallo prematuro de la capa asfáltica. La segregación se ha acabado convirtiendo en un problema persistente en las mezclas bituminosas en caliente que disminuye la vida útil de los firmes ya que conduce a un descenso de la densidad y un aumento de la permeabilidad. Los problemas relacionados con la segregación son graves y eliminarlos es esencial para poder producir mezclas de pavimentación de alta calidad.

La utilización de determinados procedimientos de construcción o "reglas de buena práctica" demuestra que elimina o reduce las segregaciones y sus efectos negativos sobre el firme. Numerosos estudios han demostrado que el uso de dispositivos de transferencia de material minimiza o reduce las segregaciones, tanto térmicas como granulométricas, de forma que se

mejora la durabilidad de la mezcla y se obtienen inicialmente unos valores de IRI elevados. La utilización de determinados procedimientos de construcción o “reglas de buena práctica” demuestra que elimina o reduce las segregaciones y sus efectos negativos sobre el firme.

Title: Factors that influence in the heterogeneity of the production and spread of the hot mix asphalt and the effect on their behaviour

Author: Eva Gómez González

Tutor: Félix E. Pérez Jiménez

The hot mix asphalt pavements are properly designed, produced and discharged into place providing durable and resilient floors require very little maintenance. However, there are a number of potentially damaging problems that can arise during these processes. Of all these problems, probably the most serious is that of segregation. Segregation is a problem that recurs frequently and that has generated concern in the flooring industry for several decades, and therefore receives the attention of contractors, departments of public works and equipment manufacturers.

Traditionally, the areas identified visually presenting a non-uniform texture was classified as segregated. Since this type of evaluation is subjective, there is difficulty agreeing on what is segregation. Segregation itself has been associated with the gradation segregation, however it has been shown to work during the start of work of hot mix asphalt pavements are produced in a series of thermal differentials affecting the homogeneity of the mixture resulting areas of material colder during the compaction density is achieved by a minor. This phenomenon is called thermal segregation.

When the gradation segregation is produce, certain areas of pavement are often characterized by different textures of the surface surrounding the material and can usually be seen with the naked eye. Regarding the thermal segregation, is isolated in cavities of different temperatures resulting from the operations of the paving process. These areas can also cause irregularities in the layer visible to the naked eye.

Thermal segregation was first proposed in 1996 by a study at the University of Washington. During this study it was observed that a large number of paving projects had experienced a cyclic occurrence of areas with low density of the pavement. This problem led to the observation of differentials in the temperature of the asphalt layer. These temperature differentials resulting from the placement of a concentrated mass of cold mixture, whose temperature was near or below the cessation temperature.

While studying this cyclic occurrence (also called end dump segregation) from the hot mix asphalt pavement, it was concluded that there was a problem with the temperature variation of the mixture into transport trucks. It was determined to develop a crust that was being held in cold box truck for carrying the mixture from the plant to the workplace.

Thermal segregation is the main author of the premature failure of the asphalt layer. Segregation is over becoming a problem in hot asphalt mixtures that decreases the lifetime of the pavement as it leads to a decrease in density and an increase in permeability. Related problems are serious and eliminate segregation is essential for production of paving mixes of high quality.

The use of certain construction procedures or "rules of good practice" shows that eliminates or reduces the segregation and its negative effects on the pavement. Numerous studies have shown that the use of material transfer devices minimizes or reduces thermal and gradation segregation in a manner that improves the durability of the mixtures obtained initially higher values of IRI. The use of certain construction procedures or "rules of good practice shows that eliminates or reduces the segregation and its negative effects on the pavement.

A mi abuelo

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1 INTRODUCCION Y OBJETIVOS

Las mezclas bituminosas en caliente que están debidamente diseñadas, producidas y vertidas en su lugar proporcionan pavimentos duraderos y resistentes que requieren muy poco mantenimiento. No obstante, hay una cantidad de problemas potencialmente dañinos que pueden surgir durante estos procesos. De todos estos problemas, probablemente el más grave es el de segregación. La segregación es un problema que recurre con frecuencia y que ha generado preocupación en la industria de la pavimentación por varias décadas, por lo cual recibe la atención general de los contratistas, departamentos de obras públicas y fabricantes de equipos.

Tradicionalmente, las áreas identificadas visualmente que presentaban una textura no uniforme eran clasificadas como zonas segregadas. Puesto que este tipo de evaluación es subjetiva, hay dificultades para ponerse de acuerdo sobre lo que es la segregación.

La segregación propiamente dicha ha estado asociada a la segregación de tipo granulométrico, sin embargo se ha demostrado que durante la puesta en obra de las mezclas bituminosas en caliente se producen una serie de diferenciales térmicos que afectan a la homogeneidad de la mezcla dando lugar a zonas de material más frío en las que durante la compactación se alcanzará una densidad menor. A este fenómeno se le denomina segregación térmica.

Cuando se produce la segregación granulométrica, determinadas áreas del pavimento se caracterizan a menudo por diferentes texturas de la superficie que rodea el material y por lo general pueden ser vistas a simple vista. Respecto a la segregación térmica, se presenta en cavidades aisladas de diferentes temperaturas fruto de las operaciones del proceso de pavimentación. Estas áreas también pueden producir irregularidades en la capa visibles a simple vista.

La segregación térmica fue primeramente propuesta en 1996 por Read [1] de la Universidad de Washington. Durante este estudio se observó que un gran número de proyectos de pavimentación había experimentado una ocurrencia cíclica de áreas del pavimento con baja densidad. Este problema dio lugar a la observación de los diferenciales de temperatura de la capa asfáltica. Estos diferenciales de temperatura resultaban de la colocación concentrada de una masa más fría de mezcla, cuya temperatura estaba próxima o era inferior a la temperatura límite de compactación.

Mientras se estudiaba esta ocurrencia cíclica (o también denominada segregación final de camión) de la mezcla bituminosa en caliente, se concluyó que era un problema relacionado con la variación de temperatura de la mezcla dentro de los camiones de transporte. Se determinó el desarrollo de una corteza fría que se desarrollaba en la caja del camión durante el transporte de la mezcla desde la planta al lugar de trabajo.

La segregación térmica es la principal autora del fallo prematuro de la capa asfáltica. Este fallo prematuro es uno de los problemas más comunes y costosos en la industria de pavimentación. Varios años de investigación han sido dedicados a determinar la causa, pero el problema todavía persiste en muchos pavimentos.

La eliminación de la segregación en las mezclas bituminosas en caliente es un desafío importante para los Departamentos de Transporte en EEUU. La segregación se ha acabado convirtiendo en un problema persistente en las mezclas bituminosas en caliente que disminuye la vida útil de los firmes ya que conduce a un descenso de la densidad y un aumento de la permeabilidad. Los problemas relacionados con la segregación son graves y eliminarlos es esencial para poder producir mezclas de pavimentación de alta calidad.

Las causas más comunes de segregación durante la construcción son la carga incorrecta del camión, el vertido de la mezcla y la operación de la extendidora. La utilización de determinados procedimientos de construcción o "reglas de

buena práctica” demuestra que elimina o reduce las segregaciones y sus efectos negativos sobre el firme.

Numerosos estudios han demostrado que el uso de dispositivos de transferencia de material minimiza o reduce las segregaciones, tanto térmicas como granulométricas, de forma que se mejora la durabilidad de la mezcla y se obtienen inicialmente unos valores de IRI elevados. Esto es debido a que estos equipos son capaces de efectuar un remezclado de manera que rehomogeneizan la mezcla térmica y granulométricamente antes de su descarga a la extendidora a la vez que eliminan las posibles segregaciones de la descarga.

Por otro lado, con el fin de eliminar la segregación de la carga de camión, los camiones necesitan ser cargados en tres ciclos de carga en lugar de una gran caída.

Los procedimientos usuales de control de calidad que definen ubicaciones de muestra al azar tienen una baja probabilidad de identificar este problema de manera suficiente. Una metodología alternativa es necesaria para hacer frente al carácter aleatorio con zonas localizadas de no uniformidad. La segregación se manifiesta en la no uniformidad de la textura superficial asociada con una distribución no homogénea de la mezcla.

La presente tesina pretende establecer los factores que influyen en la heterogeneidad de la fabricación y extendido de las mezclas bituminosas en caliente así como el efecto en su comportamiento.

CAPÍTULO 2

HETEROGENEIDAD DE LA MEZCLA

2 FACTORES QUE ALTERAN LA HOMOGENEIDAD DE LA MEZCLA

La segregación de la mezcla ha sido identificada como un problema importante desde mediados de los años 80. Fue tratada por Bryant (1967) pero empezó a recibir una atención especial mucho después con Brock (1986) que señaló la segregación como un problema común y consistente [2].

Usualmente la segregación propiamente dicha ha estado asociada a la segregación de tipo granulométrico, sin embargo se ha demostrado que durante la puesta en obra de las mezclas bituminosas en caliente se producen una serie de diferenciales térmicos que afectan a la homogeneidad de la mezcla dando lugar a zonas de material más frío en las que durante la compactación se alcanzará una densidad menor. A este fenómeno se le denomina segregación térmica.

Por lo tanto, la homogeneidad de la mezcla está atribuida a las segregaciones de tipo granulométrico y térmico, las cuales constituyen una de las causas principales en la aparición de fallos prematuros [2, 3, 4]. En ambos casos se producen los mismos deterioros por lo que en ocasiones se confunden.

La segregación ocurre generalmente en:

- la manipulación, almacenamiento y apilado de los áridos,
- la producción de la mezcla en la planta,
- la operación de carga y descarga de los camiones,
- y, en la operación de extendido

La segregación debe recibir una atención especial debido a que las entidades contratantes demandan una mayor durabilidad en sus pavimentos. Los pavimentos segregados requieren un mantenimiento más temprano que los construidos correctamente, debido a su alta sensibilidad a la humedad y sus fallos prematuros.

2.1 SEGREGACIÓN GRANULOMÉTRICA

La segregación granulométrica en la mezcla produce una concentración de materiales gruesos en unas áreas del pavimento, mientras que las demás contienen una concentración de materiales más finos. La segregación produce mezclas no uniformes que no cumplen con la fórmula original de la mezcla especificada, en cuanto a la graduación del contenido de asfalto. El pavimento resultante exhibe características pobres en su estructura y su textura y tiene una vida útil más corta.

Se pueden distinguir dos tipos de segregaciones granulométricas: la segregación con predominio de áridos gruesos y la segregación con predominio de árido fino.

La segregación gruesa ocurre cuando la granulometría tiene exceso de árido grueso y carencia de árido fino con respecto a la granulometría definida en la fórmula de trabajo. Estas mezclas se caracterizan por el bajo contenido de ligante, baja densidad, mayor contenido de huecos y textura rugosa. Además presentan deformaciones plásticas aceleradas, una resistencia menor frente a fenómenos de fatiga y mayor susceptibilidad al agua [2, 3, 4].

La segregación con predominio de áridos finos ocurre cuando la granulometría tiene exceso de finos con respecto a la definida en la fórmula de trabajo. Las mezclas se caracterizan por presentar menos huecos, más contenido de ligante, baja densidad, textura fina, baja resistencia a las deformaciones plásticas y mejor resistencia a fatiga, lo que puede dar lugar a roderas, fluencias y falta de textura [2, 3, 4].

Las segregaciones de composición no sólo se pueden producir durante la fase del extendido sino que se pueden originar en operaciones anteriores como la carga del camión, la fabricación o, incluso, pueden provenir de los propios acopios de áridos. La utilización de determinados procedimientos de construcción o “reglas de buena práctica” elimina o reduce las segregaciones y sus efectos negativos sobre el firme [5, 6].

Una definición cualitativa aceptada comúnmente de segregación granulométrica es: “la distribución no uniforme de árido grueso y fino dentro de la mezcla de asfalto”. La definición de la segregación granulométrica cuantitativa es difícil. Puesto que la segregación gruesa está generalmente aceptada como la más destructiva, se suele considerar que existe segregación granulométrica cuando una muestra presenta una desviación de árido grueso (pasa por el tamiz N°8 o N°4) igual o superior al 10% con respecto a la fórmula de trabajo [4].

Típicamente, la segregación gruesa está considerada la más corriente y el tipo más perjudicial de segregación.

2.2 SEGREGACIÓN TÉRMICA

La segregación térmica fue primeramente propuesta en 1996 por Read [1] de la Universidad de Washington. Mientras se estudiaba la segregación cíclica (o también denominada segregación final de camión) de la mezcla bituminosa en caliente, se concluyó que era un problema relacionado con la variación de temperatura de la mezcla dentro de los camiones de transporte.

Se observó que las áreas más frías de la capa asfáltica presentaban porcentajes de huecos elevados. Estudios previos se habían concentrado en la segregación granulométrica como la causa más probable para estas áreas aisladas de los huecos de aire elevados. Sin embargo los análisis del contenido de asfalto y la granulometría para estas zonas descartaban la segregación granulométrica de forma que se determinó la presencia de diferenciales de temperatura como la causa posible.

Los diferenciales de temperatura resultan en densidades más bajas que las deseables y se deben considerar como una posible causa junto con la segregación granulométrica. A partir de aquí surge un nuevo concepto de segregación además de la segregación granulométrica: la segregación térmica.

Esta nueva idea de segregación térmica llevó a una nueva propuesta de definición de segregación por Stroup-Gardiner y Brown (1998): “la segregación es la falta de homogeneidad en los constituyentes de la mezcla en la colocación de la capa asfáltica que es la responsable del daño prematuro en el pavimento” [8]. Siendo estos constituyentes el ligante, los áridos, los aditivos y los huecos de aire.

Dentro de un camión de carga, el material del camión experimenta un enfriamiento rápido durante el transporte. El material hacia el centro y el interior de la masa tiende a mantener una temperatura más elevada. Cuando la masa total de la mezcla se vierte hacia la extendedora, el material frío cercano a las paredes exteriores generalmente cae por el lado izquierdo y derecho de la tolva de la extendedora, en las alas de la extendedora. A medida que la tolva se vacía, el material de las alas es en general el último en salir por la tolva. El resultado es una masa grande de material frío introducida hacia el nuevo pavimento. El material es más difícil de compactar por lo que se obtiene un pavimento de baja densidad y de textura abierta.

El departamento de Investigación de la Casa ROADTEC observó las diferencias de temperatura que aparecían en las mezclas una vez extendidas, en las que se detectaban zonas incluso por debajo de 100°C antes de ser compactadas. Fruto de estas investigaciones fue la relación de la variabilidad de la densidad y el fallo prematuro localizado con la segregación térmica detectada.

La segregación térmica se produce por transferencia de calor entre el aglomerado recién fabricado y la atmósfera. El diferencial de temperatura entre ambos medios es elevado con independencia de las condiciones climáticas – oscila entre 165°C en invierno y 140°C en verano-. La mayor pérdida de calor se produce en los primeros instantes, disminuyendo la temperatura conforme se enfría la corteza exterior.

Los diferenciales de temperatura son diferencias de temperatura en la capa asfáltica resultado de la colocación de una porción significativamente más fría de mezcla bituminosa en caliente en el mismo. Esta masa más fría viene de la capa más superficial (corteza) típicamente desarrollada durante el transporte de la mezcla desde la planta al sitio de trabajo. Estas áreas más frías se enfriarán por debajo de la “*cessation temperature*” (temperatura a la que la compactación no puede tener lugar debido al aumento de viscosidad de la mezcla bituminosa en caliente- tomada comúnmente como 175°F) más rápidamente que la capa circundante.

Los patrones de compactación desarrollados sobre la base general de las temperaturas de la capa pueden no ser adecuados para compactar estas áreas más frías antes de que se enfríen a la “*cessation temperature*” dando como resultado zonas aisladas de compactación inadecuada que a su vez darán lugar a una disminución de resistencia, reducción de la vida a fatiga, envejecimiento acelerado, deformaciones permanentes, desprendimiento de áridos y mayor susceptibilidad al agua.

Generalmente, los diferenciales de temperatura mayores que 13.6°C (25°F) pueden potencialmente causar problemas en la compactación (Willoughby et al., 2001). Se ha observado que diferenciales de 40°C en la temperatura de compactación de la mezcla reducen la resistencia a la fatiga de la misma a valores situados entre el 50% y el 25% del valor esperado.

Esta falta de densidad afecta a las propiedades de la mezcla por lo que disminuirá la durabilidad del firme [7, 8]. Los valores iniciales del IRI son menores provocando un aumento en los gastos de mantenimiento de los vehículos y los gastos de conservación de la vía.

Investigaciones del Departamento del Transporte de Washington, NCAT y otros organismos han sugerido que existe una correlación entre la segregación del material y los diferenciales de temperatura creados en los procesos de pavimentación. Como se ha comentado anteriormente, los diferenciales de temperatura mayores de 25°F pueden causar áreas de material más frío al no ser compactado a la misma densidad que el material circundante. Estas áreas pueden presentar características estructurales y de textura pobres, comportamiento y durabilidad insuficientes, y presentan una esperanza de vida más corta y unos costes de mantenimiento más elevados.

Se ha encontrado que en las áreas donde los diferenciales térmicos en la mezcla son mayores de 25°F, los huecos en el material se incrementan un 2% de forma que disminuye la densidad y la resistencia. Por otro lado, se ha determinado que cada aumento del 1% en los huecos de aire sobre un umbral base del 7% causa una reducción del 10% en la vida del pavimento.

El informe NCHRP Project 9-11 [1] propone diferenciar tres niveles de segregación térmica en mezclas densas en función de los diferenciales de temperatura:

- Sin segregación: el diferencial térmico en la capa es inferior a los 10°C y presenta un porcentaje de huecos del 2%.
- Segregación baja: el diferencial térmico está situado entre los 10°C y los 16°C de temperatura y estas áreas manifiestan un aumento en los huecos entre el 2% y el 4,5%.
- Segregación media: el diferencial térmico está situado entre los 17°C y los 21°C y el incremento de huecos oscila entre el 4,5% y el 6,5%.
- Segregación elevada: el diferencial térmico es mayor de 21°C y el porcentaje de huecos supera el 6,5%.

La tecnología actual permite la identificación de los diferenciales de temperatura mediante el uso de una cámara de tecnología infrarroja durante el extendido de la mezcla.

Para eliminar o reducir la ocurrencia del diferencial de temperatura se recomiendan tiempos de recorrido más cortos, cajas de camiones aisladas, pavimentación en clima cálido, mejora de las prácticas de compactación y remezcla de la mezcla bituminosa en caliente. La aparición de puntos de deterioro prematuro es inevitable con el método tradicional sin el uso de dispositivos de transferencia de material durante el extendido de la mezcla.

La segregación térmica es la principal autora del fallo prematuro de la capa asfáltica.

CAPÍTULO 3

PATOLOGÍAS DERIVADAS DE LA FALTA DE HOMOGENEIDAD

3 INTRODUCCIÓN

Los efectos negativos de las temperaturas bajas de compactación y la segregación granulométrica de la mezcla sobre la vida en servicio de la carretera han sido ampliamente estudiados y documentados.

Las temperaturas de compactación bajas están directamente relacionadas con un aumento en el contenido de huecos de aire, los cuales disminuyen la resistencia del pavimento. Incluso con un diseño de la mezcla perfecto, si la mezcla no está adecuadamente compactada en el campo, el producto final no durará mucho tiempo.

La segregación granulométrica y los diferenciales térmicos muestran los mismos síntomas y en consecuencia los mismos tipos de daños, los cuales pueden causar confusión los unos con los otros. No obstante, el mecanismo de daño final, expresado como densidad inadecuada o huecos de aire excesivos, es el mismo en ambos casos.

El deterioro de un firme se inicia cuando la carretera se pone en servicio y empiezan a circular los vehículos. El fallo del firme se produce cuando la calidad de rodadura desciende por debajo de unos umbrales en que la conducción de los vehículos no es segura ni confortable. Las verdaderas causas del deterioro de un firme son el tráfico y los factores ambientales.

Estos factores de deterioro resultan dos variables complejas y difíciles de definir que a su vez dependen de varios elementos. El tráfico está directamente relacionado con el número de ejes, a la carga por eje, a la velocidad de circulación de los vehículos, a la regularidad superficial del firme, etc..., por lo que resulta una variable que depende de un conjunto diverso de elementos.

Los factores ambientales potencian la acción del tráfico e incluso pueden deteriorar el firme sin la acción del tráfico. Estos factores ambientales someten a los firmes de carreteras a una serie de agresiones externas que afectan a la durabilidad de la mezcla, es el caso de la radiación solar, las variaciones de temperatura estacionales y diarias, el envejecimiento del ligante, entre otros.

En el diseño y proyecto de un firme deben tenerse en cuenta dos aspectos fundamentales. Por una parte, su función resistente determinará los materiales y espesores de las capas que habremos de emplear en su construcción y, por otra su funcionalidad en servicio que definirá las condiciones de textura y acabado a exigir en el firme para que éstas resulten seguras y confortables.

Las características o cualidades funcionales del firme residen fundamentalmente en su superficie. Aspectos como la adherencia del neumático al firme, las proyecciones de agua en lluvia, el desgaste de los neumáticos, el ruido en el exterior y el interior del vehículo y el envejecimiento de los vehículos, entre otros, están asociados con la textura y regularidad superficial del pavimento.

Dentro de la textura se suele distinguir entre la microtextura, la macrotextura y la megatextura. La microtextura se corresponde con las irregularidades superficiales del pavimento menores de 0.5 mm, la macrotextura comprende los valores de 0.5 a 50 mm, y la megatextura de 50 a 500 mm. A partir de longitudes de onda de 0.5 m se habla de irregularidad superficial del pavimento.

La microtextura define la aspereza del pavimento y es necesaria para conseguir una buena adherencia del neumático al firme. La macrotextura define la rugosidad y es necesaria para mantener esa adherencia a altas velocidades o con el pavimento mojado, además. La megatextura está asociada con los baches o peladuras que puede haber en el firme. La megatextura y la irregularidad superficial perjudican significativamente las características funcionales del pavimento.

La vida en servicio de un firme suele ser mucho mayor que la considerada en proyecto y mediante las sucesivas actuaciones de conservación se alarga la

vida del mismo. Pero esta vida puede reducirse por falta de homogeneidad de la mezcla y ser necesarias más actuaciones de conservación por una ejecución deficiente

Numerosos estudios han determinado que la falta de homogeneidad de la mezcla no sólo está atribuida a la segregación granulométrica sino también a la segregación térmica que se produce durante la puesta en obra [1]. Este tipo de segregaciones produce diferenciales térmicos en la capa recién extendida de manera que aparecen zonas más frías en las que la densidad será menor a la prescrita.

Los fallos más significativos causados por las segregaciones se pueden agrupar en: fallos cíclicos, longitudinales y aleatorios. Para cada uno de estos fallos se van a definir las patologías derivadas de la falta de homogeneidad de la mezcla que resultan a medio-corto plazo. No es objeto de esta tesina centrarse en los fallos a fatiga de las mezclas producidos a largo plazo.

3.1 FALLOS CÍCLICOS

Hasta mediados de los 90 se atribuían los problemas de compactación de la mezcla al enfriamiento global de la mezcla, a la segregación del árido dentro de la mezcla o a la mezcla incompleta del ligante y el árido. Una nueva perspectiva respecto a los factores que afectaban negativamente a la compactación de la mezcla empezó en 1995.

En ese año, el Department of Civil and Environmental Engineering de la Universidad de Washington señaló que la pavimentación presentaba una ocurrencia cíclica (segregación cíclica) de áreas con una textura más rugosa que el área de pavimento circundante y una densidad menor, cuyo fallo se presentaba de forma prematura. Los intervalos entre las áreas problemáticas parecían corresponder a la longitud de la capa asfáltica colocada a partir de una carga de camión, por lo que el fallo cíclico se asociaba a los finales de camión.

Estos fallos cíclicos tradicionalmente se habían atribuido siempre a segregaciones de tipo granulométrico. Se había demostrado [1] que la mayoría de estos fallos ocurrían sin que las mezclas presentasen desviaciones granulométricas ni de contenido de ligante y además estaban asociados a segregaciones de tipo térmico.

El fallo cíclico sigue una pauta debido a la falta de homogeneidad de la mezcla (de tipo térmico, granulométrico o ambas) antes de su compactación o en una práctica de compactación inadecuada. Los síntomas aparecen como un cambio de textura, ya sea inicial o por pérdida progresiva de mortero, respecto a las zonas adyacentes.

Las causas de los fallos cíclicos asociados a los finales de camión proceden de:

- la alteración de la composición de la mezcla debido al vertido en planta de la mezcla en el camión,
- formación de una corteza fría en la caja del camión durante el transporte,
- debido a las paradas de la extendidora en las operaciones de entrada y salida del camión, al enfriamiento de la mezcla bituminosa en la tolva, y detrás de la regla de extendido,
- la mezcla que permanece en la tolva hasta que se abaten las alas de la extendidora ha experimentado un enfriamiento. Esta mezcla se vuelca en el centro de la tolva para transportarse a la regla de extendido.

Esta segregación cíclica también se denomina segregación final de camión.

3.1.1 Causas de la segregación cíclica o segregación final de camión

3.1.1.1 Carga de camión

La primera causa de la segregación en la carga del camión es la entrega desde el silo en la planta hacia la caja del camión. La segregación de la mezcla ocurre mientras se produce la segregación del árido cuando el material se vierte encima de una pila cónica. Las partículas del árido más grandes en la mezcla caen rodando a los lados y se recogen en el fondo de la pila.

La segregación de la carga del camión es realmente una combinación de dos factores. El primer factor consiste en la caída de material segregado cuando finaliza la descarga (el árido grande se deposita en la parte delantera de la caja del camión). El segundo factor consiste en la caída del material segregado cuando se inicia la descarga del camión (el árido grande se deposita en la puerta trasera de la caja del camión). Puesto que la mayor parte de áridos grandes se depositan en la parte trasera del camión, se producirá más segregación en el inicio de la descarga de un camión debido a la gran presencia de árido grueso.

Con el fin de eliminar la segregación de la carga de camión, los camiones necesitan ser cargados en tres ciclos de carga en lugar de una gran caída:

1. El primer vertido se realiza inmediatamente en la parte delantera de la caja del camión, lo más hacia delante posible. Este proceso reduce la distancia que las partículas de árido grueso pueden rodar hacia la parte delantera de la caja del camión, y por lo tanto reduce significativamente la cantidad de segregación que ocurrirá durante la operación de carga.

2. Seguidamente es necesario que el conductor del camión desplace el camión hacia delante con el fin de que el segundo vertido pueda ser depositado en la parte trasera del camión. Este proceso reduce la distancia de rodadura del árido grueso hacia la puerta trasera.
3. El tercer vertido de la mezcla puede hacerse en el centro de la caja del camión, entre los vertidos primero y segundo.



Fig: ciclos de carga en el camión directamente desde el silo

3.1.1.2 Formación de la corteza durante el transporte

Durante el transporte, la mezcla sufre un enfriamiento especialmente acusado en la parte superior y en el contacto con la caja del camión. Esta corteza protege al resto de la mezcla y ayuda a conservar la temperatura del núcleo que puede ser adecuada durante varias horas. Esta corteza debería deshacerse al descargar la carga en la tolva de la extendedora y homogeneizarse con el resto al ser llevada hacia la regla de la extendedora por los alimentadores y sinfines. Sin embargo esto no es así y se producen variaciones importantes en la temperatura de la capa, y en consecuencia, en la compactación de la misma, ya que la corteza pasa a través de la extendedora sin una remezcla sustancial durante las operaciones de final de camión.

Las costras frías de la parte superior de la carga suelen fluir en la descarga hacia los lados de la tolva, donde se concentran y permanecen hasta que se termina de vaciar el camión, momento en el que se abaten las alas de la tolva y se lleva esa mezcla hacia la regla de extendido.

La mezcla depositada en las esquinas de la tolva está más fría no sólo por la presencia de las costras de material sino por el tiempo de permanencia en esa zona mientras dura la descarga del camión. De esta manera, en cada final de

camión, se concentran esas masas de mezcla más fría, dando lugar a áreas en el extendido con un diferencial de temperatura importante, llegando incluso a presentar una temperatura por debajo de la temperatura de compactación y, por tanto, repercutir en una densidad menor tras la compactación con un área con más huecos y menor durabilidad.

En la mayoría de los casos, el transporte de camión enfría la superficie de la masa de mezcla transportada dando lugar a una corteza superficial que tiene efectos perjudiciales sobre la calidad total de la capa asfáltica si no se trata adecuadamente con medidas como la reducción del tiempo de transporte, aislamiento de la caja del camión o colocación de una lona para disminuir la tasa de enfriamiento superficial de la mezcla. Cuando la temperatura ambiente tiende a ser más fría se acelera el enfriamiento de la mezcla durante el transporte por lo que se tomarán todas las precauciones posibles para evitar el aumento de la tasa de enfriamiento en la mezcla.

3.1.1.3 Descarga del camión

Si el camión se carga correctamente, esto es utilizando los vertidos múltiples de la mezcla a lo largo de la caja del camión, la descarga del camión minimiza los problemas de segregación.

Cuando se abre la puerta trasera del camión, una masa de mezcla fluirá de la caja del camión hacia la tolva de la extendidora. Como la caja del camión se eleva, la mezcla en la caja sigue avanzando en una masa. En este caso, por la carga correcta del camión, las partículas de áridos más grandes en el mezcla no se separarán del resto de la mezcla.

Si el camión se carga incorrectamente y las partículas de árido grandes en la mezcla han rodado tanto por la puerta trasera como por la parte delantera del camión, la segregación ya se ha producido. El problema puede minimizarse utilizando un procedimiento diferente para la descarga del camión como es la utilización de los silos de transferencia en el extendido de la mezcla.

Es importante cargar la caja del camión correctamente de modo que la segregación de la mezcla se reduzca o elimine.

3.1.1.4 Extendidora: parada y arranque rápido

La tolva de la extendidora debe continuar medio llena entre dos camiones. La cantidad de la mezcla que permanece en la tolva de la extendidora cuando la caja del camión está vacía debería estar por encima de la parte inferior de las

compuertas de la parte trasera de la tolva o por encima de la apertura de la cinta transportadora en la parte trasera de la tolva.

Si la extendedora está medio llena y si hay mezcla segregada en la puerta trasera del camión, el material segregado se agregará con la masa de la mezcla en la tolva. Cuanta más mezcla haya en la tolva, menores son las posibilidades de material segregado dentro de la mezcla.

Mantener la tolva medio llena entre dos camiones se puede conseguir por la parada rápida de la extendedora. Antes de que el camión finalice la descarga y evitar que se consuma la mezcla de la tolva de la extendedora, se procederá a la parada de la extendedora. De esta manera cuando el nuevo camión recién llegado esté en la posición adecuada, la mezcla se entregará en una masa hacia la tolva medio llena.

Si la tolva de la extendedora está vacía entre camiones, la mezcla segregada en la puerta trasera de la caja del camión pasa directamente a través de la tolva y hacia los sinfines. Para este caso, la cantidad de mezcla en los sinfines es significativamente escasa ya que se ha dejado consumir toda la mezcla de la tolva y esto reduce la fuerza sobre el borde delantero de la regla de extendido resultando en una zona débil en la superficie del pavimento con una textura muy rugosa en la franja de la extendedora.

3.1.1.5 Vuelco de las alas

Como se ha comentado anteriormente la tolva de la extendedora debe seguir estando medio llena entre camiones. Es muy común la acumulación de las costras de mezcla fría en las esquinas de la tolva hasta que se abaten las alas de la tolva y se lleva esa mezcla hacia la regla de extendido. Para evitar la aparición de zonas segregadas debidas al abatimiento de las alas se pueden usar dos procedimientos.

El primero consiste en el vaciado de las alas al final del día. La mezcla que se acumula en las esquinas de la tolva y permanece durante todo el día no será colocada. Dependiendo del tamaño de la extendedora, quizás de una a dos toneladas de mezcla se recogerán en las alas y no serán colocadas. Esto significa que no se produce el vuelco de las alas en ningún momento durante el día y la mezcla que está recogida en las esquinas de la tolva se pierde simplemente al final del día.

El segundo, y más económico, es reducir la capacidad de las dos esquinas de la tolva colocando unas placas. De esta manera, al abatir las alas de la tolva no se lleva tanto material a la regla de extendido.

3.2 FALLOS LONGITUDINALES

El fallo longitudinal responde generalmente a segregaciones en el centro de regla (unión de sinfines) y a una mala ejecución de las juntas longitudinales. Las posibles causas de los fallos aleatorios son las siguientes:

- la alteración de la composición de la mezcla por una inadecuada operación o mantenimiento del sistema de alimentación de la regla de extendido debido a:
 - fallos en la prolongación de los sinfines del “túnel” con excesiva distancia al tope lateral,
 - el desgaste de los alabes de los sinfines en la zona central de la regla,
 - el inadecuado diseño de los alabes de los sinfines,
 - y la excesiva velocidad de los alimentadores de las bandejas desde la tolva,
- los que se producen en las juntas longitudinales por defectos de compactación.

3.3 FALLOS ALEATORIOS

Las posibles causas de los fallos aleatorios son las siguientes:

- presencia de masas frías no homogeneizadas en el contorno de la caja del camión,
- enfriamiento de la mezcla durante las paradas de la extendidora.

Se producen zonas aisladas con pérdida de material y obedecen a segregaciones de tipo térmico que dan como resultado áreas mal compactadas. Esto resulta en una mezcla con un alto índice de huecos, baja cohesión y susceptible a la acción del agua.

Estos fallos relacionados con la falta de homogeneidad de la mezcla requieren unas actuaciones de tipo preventivo para evitar su ocurrencia ya que son difícilmente detectables por el control de calidad normal y requieren el empleo la técnica termográfica

3.4 PATOLOGÍAS DERIVADAS DE LA SEGREGACIÓN

Un estudio realizado por el NCAT [1] determinó que la forma principal de daño, además de las peladuras, es la fisuración longitudinal seguida por la formación de baches. Este tipo de fisuración está asociada tanto con la rigidez de la mezcla y la baja resistencia a la tracción. De esta investigación se dedujo que se perdían de 2 a 7 años de vida a causa de la segregación para una vida útil del pavimento de 15 años.

3.4.1 Peladuras

El deterioro de la capa de rodadura en las áreas segregadas presenta la forma de peladuras. La desintegración superficial de la capa de rodadura se manifiesta por la pérdida del ligante y por el desprendimiento del árido, incrementando la macrotextura del pavimento.

Con el tiempo y la acción repetida del tráfico, estas áreas se incrementan tanto en tamaño como en profundidad, formando baches en la superficie del pavimento. El bache es el resultado final de la fisuración por fatiga de las peladuras.

Las peladuras consisten en una progresiva pérdida de material del pavimento desde la superficie hacia las capas inferiores. Las causas son varias:

- se suelta la película de betún del árido,
- envejecimiento del ligante,
- compactación pobre especialmente en condiciones climáticas frías
- contenido de asfalto insuficiente

Por otro lado se distinguen tres niveles de peladuras:

- Nivel ligero: pequeñas peladuras distribuidas aleatoriamente en la superficie del pavimento. El árido fino y/o el ligante ha empezado a desprenderse en algunas zonas del pavimento.
- Nivel moderado: se presentan desprendimientos extensivos de áridos finos y/o ligante. Superficie abierta y rugosa.
- Nivel severo: pérdida de la superficie del material



Fig: Detalle de peladura en el pavimento

3.4.2 Formación de roderas

La rodera es una depresión en la superficie debido al paso de las ruedas de dos vehículos. Se produce el levantamiento del pavimento a lo largo de la zona de rodera, pero en muchos casos, sólo es visible después de la lluvia cuando las huellas están llenas de agua. Las roderas se derivan de una deformación

permanente en la capa del pavimento usualmente producida por la postcompactación debida al tráfico o por un desplazamiento de material inestable.

Las posibles causas son:

- La compactación insuficiente de las capas de mezcla bituminosa en caliente durante la construcción. Si esto no se compacta bastante inicialmente, el pavimento de MBC puede continuar la densificación bajo las cargas del tráfico.
- Estructura de pavimento inadecuada
- Diseño de la mezcla o fabricación incorrectos (pej, excesivo contenido de asfalto, excesivo filler, cantidad insuficiente de partículas de áridos angulares).

3.4.3 Veta longitudinal

Se producen en el centro o solapes de extensión de la regla de extendido. Esta segregación puede ser de tipo granulométrico y térmico, dando como resultado una franja con más huecos y menos cohesión.

3.4.4 Apertura de Juntas longitudinales

Una patología frecuente se manifiesta con la apertura, fisuración y erosión progresiva con pérdida de material, facilitando el acceso de agua. Son debidas a la falta de homogeneidad de composición de la mezcla en el borde y a la compactación pobre de la mezcla. La baja densidad alcanzada provoca una mayor accesibilidad del agua y debilidad en términos de cohesión y resistencia mecánicas.

3.4.5 Defectos de regularidad evolutivos

Se deben principalmente a postcompactaciones por insuficiencia de densidad inicial ya que se producen asientos diferenciales en superficie. Esta densidad inicial es fruto de la falta de homogeneidad inicial debido a la aparición de fallos cíclicos o longitudinales. Esta postcompactación genera un asiento diferencial en la superficie y la alteración de la regularidad superficial.

CAPÍTULO 4

IDENTIFICACIÓN ZONAS SEGREGADAS

4 IDENTIFICACIÓN DE LAS ZONAS SEGREGADAS

Durante la puesta en obra determinar las zonas segregadas resulta difícil. A continuación se van a desarrollar los métodos utilizados.

4.1 IDENTIFICACIÓN VISUAL

Históricamente, la identificación visual de la textura superficial ha sido usada para localizar la segregación. Se trata de un enfoque subjetivo que ha llevado a discrepancias entre administraciones y contratistas de manera que se hace necesaria la aparición de procedimientos objetivos para identificar y medir la segregación y valorar sus efectos sobre el comportamiento del firme. El Departamento de Transporte de Ontario utiliza una manual de daños en el pavimento que proporciona directrices a inspectores con ejemplos fotográficos de los diferentes niveles de segregación [6].

Usualmente la detección visual de las áreas no uniformes se usa como base para otros enfoques cuantitativos. En 1997, Cross et al [3], llegaron a la

conclusión que las observaciones visuales están indicadas para identificar la segregación en mezclas con tamaños de árido grandes y granulometrías gruesas (por debajo de la línea de máxima compacidad) y que resulta difícil determinar visualmente la segregación para mezclas con tamaños de árido pequeños y granulometrías finas.

4.2 TERMOGRAFÍA DE INFRARROJOS

Todos los objetos emiten una radiación infrarroja en forma de calor, el cual puede ser detectado por un escáner de infrarrojos. Estos impulsos naturales son convertidos en pulsos eléctricos y entonces procesados para crear una imagen visual de la energía térmica del objeto. El principal componente de cualquier sistema de imágenes térmicas es el escáner óptico, una unidad que es usada para detectar la radiación infrarroja de un objeto. Otros componentes esenciales del sistema son un monitor, una cámara de vídeo, y un ordenador con un software adecuado para el tratamiento de datos, el análisis y el almacenamiento.

Los colores representan los cambios de temperatura superficial, el azul para las regiones frías y el rojo para las zonas más calientes. La tecnología de la imagen térmica indicará las regiones de huecos elevados. La capacidad térmica del aire es mínima comparada con la de la capa asfáltica.

Para el éxito de la colocación y la compactación de las mezclas bituminosas en caliente, cada paso en el procedimiento de colocación debe ser realizado dentro del rango de temperatura adecuado. Cuando la temperatura de la mezcla varía en el material colocado, la compactación y, en consecuencia, el comportamiento puede variar significativamente.

Durante mucho tiempo, los termómetros infrarrojos han sido utilizados para comprobar temperaturas superficiales, pero pequeñas áreas de baja temperatura pueden ser omitidas fácilmente. La imagen de termografía de infrarrojos es una alternativa para los termómetros que está disponible para proporcionar una imagen infrarroja de las temperaturas superficiales.

Uno de los problemas más comunes y costosos en la pavimentación es la segregación de la mezcla. Este problema puede ocurrir por muchas razones y en muchas localizaciones en el proceso de construcción. En los últimos años, la segregación térmica ha sido identificada como uno de los conceptos más importantes en relación con la segregación. Por lo tanto, es necesario encontrar una herramienta que identifique la segregación térmica inmediatamente durante el proceso constructivo, de modo que el problema pueda ser rectificado. Una cámara de infrarrojos es una de las herramientas que han sido reconocidas para ser efectivas en la identificación de la segregación térmica. Por el uso de la cámara de infrarrojos, las imágenes de la mezcla bituminosa en caliente puede ser tomadas en todo el proceso de

construcción, incluyendo la carga en el camión durante el transporte, en el camión antes del vertido, en la tolva de la extendedora, detrás de la regla de extendido antes de la compactación, y después de la compactación.

El uso de termografía de infrarrojos permite identificar la presencia de puntos fríos en las zonas de la mezcla recién extendida, los cuales afectan a la compactación y llevan a cabo al daño prematuro del pavimento [10].

En la figura que se muestra a continuación se observa que los puntos de baja temperatura de la imagen infrarroja se relacionan exactamente con los puntos visiblemente deteriorados que se observan en la fotografía de la misma sección de la carretera.

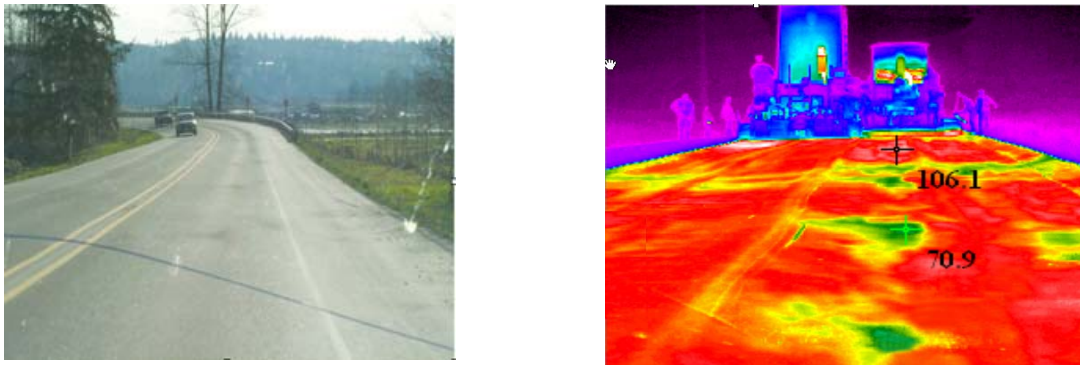


Fig: Zonas frías en la capa

Con una diferencia de sólo 3°F, la sección longitudinal que muestra la imagen infrarroja indica que esta capa asfáltica en el proceso de enfriamiento posee una uniformidad térmica excepcional. La fotografía digital de la carretera tomada un año después no muestra signos de desgaste ni degradación.



Fig: Temperatura uniforme de la capa

Algunos inconvenientes de esta tecnología son los siguientes:

- sólo son evidentes los defectos cercanos de la superficie
- tanto la segregación térmica y la granulométrica aparecerán como áreas frías, por lo que una segunda confirmación será necesaria para definir el tipo de segregación.

La cámara infrarroja muestra y registra las temperaturas como imágenes coloreadas con una escala de referencia. Se trata, pues, de una herramienta económica para llevar a cabo las evaluaciones de calidad de pavimentación durante la colocación que con precisión predecirá donde fallará prematuramente el pavimento.

El 90% de las carreteras de los Estados Unidos están construidas con mezclas bituminosas en caliente. A pesar de que han sido construidas para durar quince años o más, han aparecido fallos prematuros. Estos fallos suponen un coste innecesario anual de millones de dólares.

El Departamento de Transporte del Estado de Washington confirmó que una de las causas más comunes de fallo en las carreteras era la diferencia de temperatura durante la colocación de la mezcla. Las zonas más frías presentaban menor densidad. Mezclar de nuevo la mezcla antes de su colocación ayudó a reducir los diferenciales de temperatura significativamente.

Actualmente, el Departamento de Transporte de Washington cuenta con especificaciones para la colocación del pavimento que incluyen pautas específicas respecto al diferencial térmico y la densidad. Una cámara de termografía de infrarrojos hizo posible seguir estas especificaciones mientras se colocaba el pavimento y se identificaban los problemas potenciales en tiempo real. Estas nuevas directivas han permitido construir carreteras más lisas y ahorrar en costes de mantenimiento.

4.3 MEDICIÓN DE LA TEXTURA

La medida de la textura mediante el método del círculo de arena o con texturómetros láser de alto rendimiento permite localizar zonas con posibles segregaciones granulométricas.

4.3.1 Método del círculo de arena

El método de ensayo del círculo de arena ha sido usado para cuantificar las observaciones visuales de diferencias en la macrotextura de la superficie. El método del círculo de arena parece ser el método más objetivo y preciso para detectar la textura. Las observaciones visuales de los cambios en la textura superficial del pavimento pueden estar cuantificadas con el método del círculo de arena. Sin embargo, este método consume tiempo y no es práctico para usarse diariamente.

4.3.2 Texturómetro láser

Este tipo de tecnología ha sido usado para medir la macrotextura de la superficie. La tecnología produce una luz infrarroja que se proyecta sobre la superficie del pavimento.

La investigación realizada por el NCHRP [1] indicó una fuerte correlación entre las medidas láser y las profundidades de textura del método del círculo de arena. Sin embargo, esta correlación entre la medición del método del círculo de arena y el texturómetro láser depende de la rugosidad de la superficie.

Durante los últimos veinte años el uso de la tecnología láser para definir la textura superficial ha ido ganando gran popularidad. Usando algoritmos matemáticos se obtiene la distancia a la superficie en un punto [15]. Las mediciones son realizadas muy rápidamente ya que el vehículo conduce a lo largo del pavimento posibilitando las mediciones en puntos cada milímetro definiendo un perfil superficial como se ilustra en la figura.

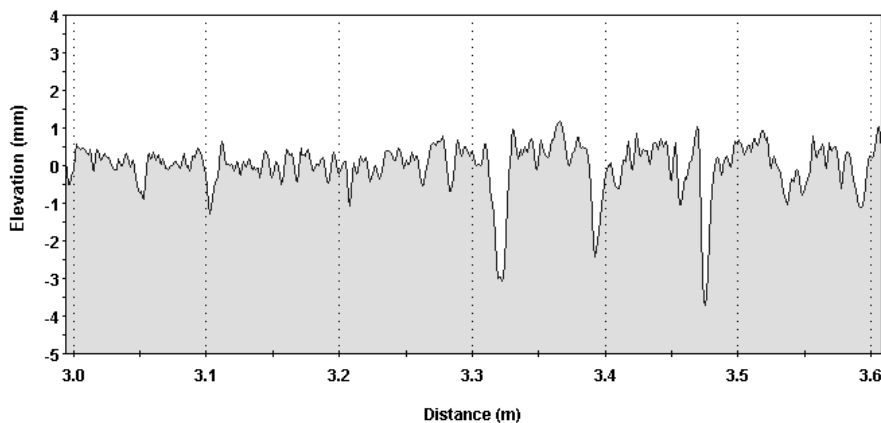


Fig: ejemplo de medición de la textura superficial mediante el texturómetro láser sobre una longitud de 3.6 metros

La evaluación de la textura con dispositivo de medición láser montados sobre vehículo está bien establecida y un número importante de dispositivos comerciales están disponibles. Algunos de estos se resumen a continuación.

4.3.2.1 Greenwood Engineering (Dinamarca)

Este sistema está instalado en un vehículo estándar. El conductor puede operar el sistema desde el asiento delantero. Con la configuración actual, hasta 25 láseres se localizan sobre una viga frontal. Cada láser mide la distancia desde la viga hasta la superficie del pavimento con una velocidad de muestreo de 16 kHz. Todas las señales son almacenadas por cada sensor individualmente.



Fig: Texturómetro láser fabricado por el Greenwood Engineering de Dinamarca

4.3.2.2 ARAN (fabricado por Roadware de Canadá)

El ARAN (Automatic Road Analyzer) proporciona información para respaldar mejor las decisiones de gestión por la recogida coherente y precisa de datos de manera rápida y rentable. Una amplia variedad de datos pueden ser recogidos continuamente a velocidades de carretera:

- Perfil longitudinal
- Rugosidad (IRI)
- Perfil transversal
- Deformaciones permanentes
- Textura del pavimento



Fig: Dispositivo ARAN

4.3.2.3 WDM- HSTM

El WDM, desde el Reino Unido, fabrica el HSTM (High Speed Texture System), un sistema para medir la textura a velocidad elevada que ha sido diseñado para proporcionar un método económico de vigilancia rutinaria de la macrotextura de las redes de carreteras.

El HSTM consiste en un remolque de dos ruedas diseñado para el transporte de un máximo de tres sensores láser (uno en cada rueda y un tercero en la

parte central), un monitor de pantalla plana como centro de control, un ordenador de cálculo, y un disco para almacenar los datos. El HTSM es capaz de medir por encima de un rango de velocidad de 0 a 100 Km/h.

La mayoría de vehículos equipados con una bola de remolque de 50 mm puede arrastrar el HTS además el ordenador y el panel de control pueden ser alojados dentro del vehículo. Los cables de conexión son suministrados para adaptarse a este fin. El uso de un vehículo remolcador evita la necesidad de modificaciones de vehículos especiales.



Fig: Dispositivo HSTM

4.3.2.4 ARBB

El ARBB (Australian Road Research Board) fabrica una gama de perfiladores láser que incluye un multiláser y un sistema portátil más limitado. El Multiláser Profiler (MLP) es un sistema montado por vehículo que automáticamente recoge datos por los perfiles láser.

Presenta las siguientes ventajas:

- Proporcionar simultáneamente medidas de rugosidad, rutting y macrotextura.
- Inspecciona hasta 600 Km de carretera por día



Fig: Dispositivo ARBB

4.3.2.5 ROSANv

En enero de 1997, la FHWA presentó el ROSANv (Rosan Surface Analyzer) a los profesionales del transporte en el Transportation Research Board Annual Meeting en Washington DC.

Esta tecnología utiliza un ligero sistema portátil montado en el parachoques del vehículo para evaluar las características de la textura del pavimento a lo largo de una trayectoria lineal. La alta velocidad y el láser de alta calidad en este sistema proporciona un elevado nivel de resolución capaz de producir mediciones como las definidas en la ASTM E 1845-96 para el cálculo de la profundidad del perfil media (MPD=mean profile depth) de la macrotextura del pavimento.

El principal y primer objetivo del ROSANv fue el desarrollo de un sistema automatizado portátil para la medición de la textura del pavimento a velocidades de carretera a lo largo de una trayectoria lineal como un reemplazo del método del círculo de arena como indica la ASTM-E965 y la ISO 10844. La letra “v” significa que puede ser montado rápidamente sobre cualquier vehículo en el parachoques.

El ROSANv proporciona los siguientes datos:

- Mediciones de la textura
- Mediciones de control de calidad de un nuevo pavimento para certificar que el pavimento cumple con las especificaciones de los límites de textura y segregación granulométrica.



Fig: Dispositivo ROSANv

Numerosas son las ventajas que presenta el uso de esta tecnología para detectar y medir la segregación:

- Se obtienen perfiles de textura superficial continuos rápidamente ya que esta tecnología se maneja a velocidades de carretera normales.
- Esta tecnología proporciona una medición cuantificable que corresponde a las observaciones de no uniformidad de la textura superficial.
- El equipo es portátil y razonablemente económico y puede ser montado en cualquier vehículo.
- El equipo y el software de análisis es fácil de usar y puede proporcionar un análisis estadístico de los datos obtenidos.

Los inconvenientes se incluyen a continuación:

- La tecnología mide sólo defectos de la superficie.
- Las velocidades más bajas son necesarias para una mejor resolución.
- Es necesario una superficie de pavimento seca. Las superficies mojadas alteran la desviación del rayo láser.

El ROSANv parece ser el más avanzado con respecto a los algoritmos desarrollados para determinar la segregación en los asfaltos y tiene la más amplia aplicación en esta área hasta la fecha.

4.3.3 GPR: Ground Penetration Radar

El georadar (GPR) es una técnica de prospección geofísica basada en la emisión de ondas electromagnéticas en una banda de frecuencias entre 100 MHz y 1 GHz. El parámetro electromagnético que se evalúa es la permitividad eléctrica relativa (constante dieléctrica) ϵ_r .

Se transmiten los impulsos (ondas) de corta duración hacia el pavimento a través de una antena. Estos impulsos se ven afectados por los cambios de propiedades del medio. La onda se refleja en el interior del material, y al ser detectada en superficie proporciona información de los cambios de permitividad, los cuales permiten identificar las propiedades del pavimento.

Debe disponerse de una antena emisora de ondas y de una antena receptora de las ondas reflejadas; ambas antenas van desplazándose en la superficie. El tiempo de viaje de un pulso electromagnético a través del pavimento puede entonces ser usado para calcular el espesor de la capa.

Sculion (1997), encontraron que las anomalías en las formas de las ondas reflejadas podían ser usadas para evaluar densidad y el contenido de humedad [6]. Los perfiles de textura superficial longitudinal continuos pueden ser obtenidos rápidamente porque la tecnología puede ser llevada a cabo en velocidades normales de carretera. Sin embargo, las velocidades más lentas son necesarias para una resolución más alta.

El equipo es portátil y razonablemente asequible y puede ser montado en cualquier vehículo. Las desventajas de esta tecnología incluyen lo siguiente:

- Es necesaria una superficie de pavimento seca. Las superficies húmedas alterarán la deflexión del rayo láser.
- Antes es necesaria una calibración, ya que los resultados finales dependen del tipo de mezcla.

En Finlandia se ha desarrollado un método para relacionar la superficie dieléctrica de la mezcla bituminosa en caliente con el contenido de huecos [13]. Se generan las distribuciones de probabilidad para el contenido de huecos usando testigos para calibrar la relación entre la superficie dieléctrica y los huecos, luego se hace una predicción de los huecos por cada 5.000 lecturas del GPR aproximadamente para cada proyecto de pavimentación. La relación es la siguiente:

$$\text{AirVoidContent} = Ae^{b\varepsilon}$$

siendo:

- A y b están determinados desde la calibración de los testigos; se deben tomar un mínimo de tres testigos
- ε es la superficie dieléctrica de los datos del GPR

Es de gran importancia tomar los testigos suficientes para la calibración a fin de desarrollar la relación entre el dieléctrico de superficie y los huecos. Esta ecuación es específica para cada proyecto de pavimentación.

El Departamento de Transporte de Texas determinó en base a un estudio que la superficie dieléctrica es el mejor indicador de cambio en los huecos que los datos de temperatura de la cámara infrarroja.

Las siguientes figuras ilustran el hecho que la relación que pronostica los cambios en los huecos versus los cambios dieléctricos tiene una R^2 más alta y un error más bajo que la relación entre los cambios de temperatura y los cambios en los huecos. Por lo tanto, este estudio indicó que si los cambios de densidad son las irregularidades principales que existen en la capa asfáltica, el GPR es la mejor herramienta para la investigación que el dispositivo infrarrojo.

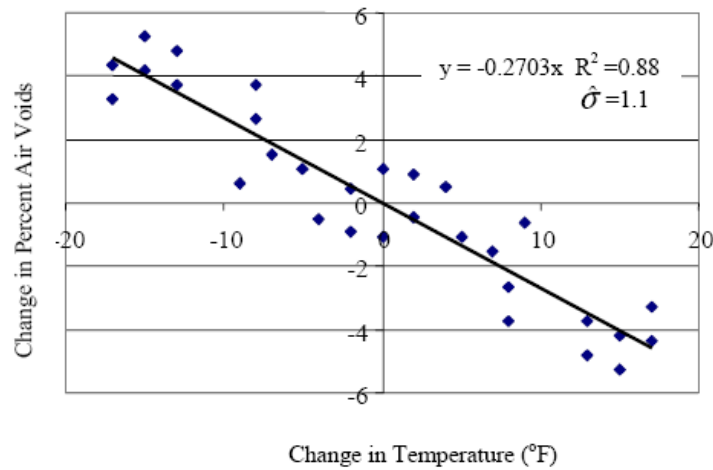


Fig: cambio en el porcentaje de huecos versus cambio en la temperatura

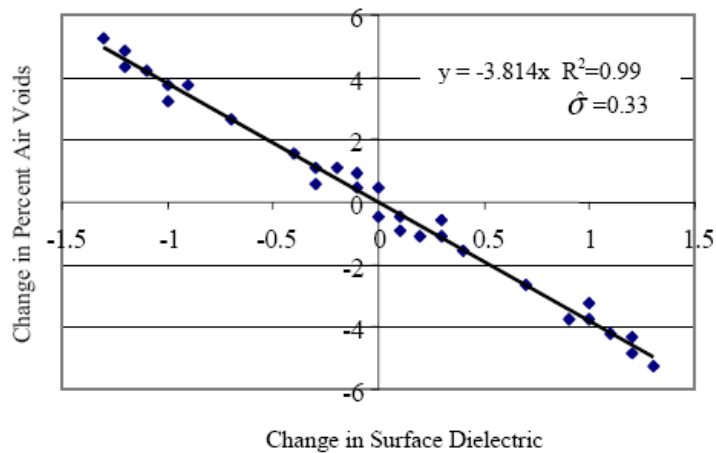


Fig: cambio en el porcentaje de huecos versus cambio en el dieléctrico de superficie

El mejor uso del GPR es adoptar la metodología propuesta en Finlandia para desarrollar la relación entre el dieléctrico de superficie y el contenido de huecos de la mezcla en la capa. A partir de aquí se genera por un lado, la predicción de la distribución de los huecos y utilizando un software para cartografiar la superficie se puede generar una trama de superficie en dos dimensiones de los huecos en la sección

Las figuras que se muestran a continuación son un ejemplo de distribución de huecos para una sección de ensayo y una pequeña sección de la trama de superficie de los huecos predecidos.

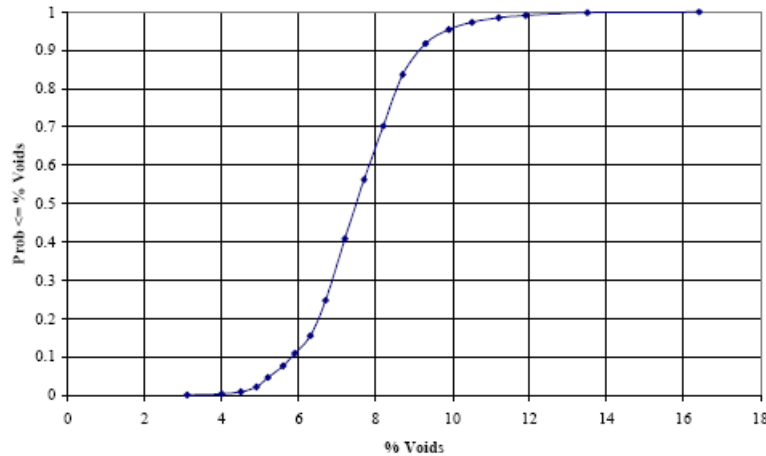


Fig: distribución de huecos desarrollada a partir de los datos del GPR

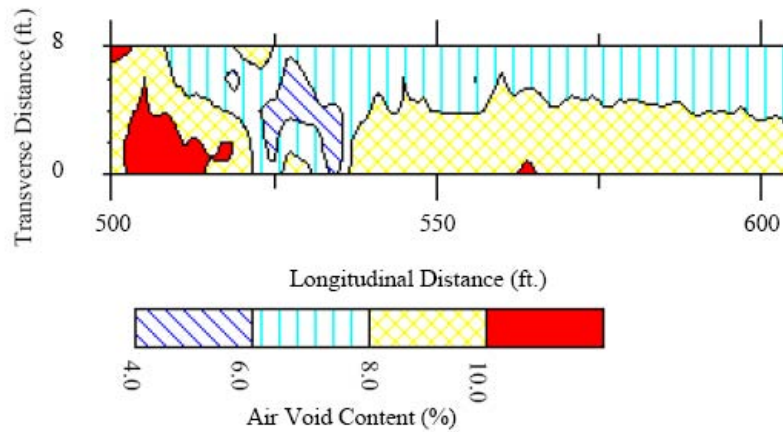


Fig: trama superficial de huecos a partir de los datos del GPR

La distribución de huecos podría ser usada para evaluar las primas y las sanciones. Por ejemplo, si una sanción se evalúa cuando el porcentaje de huecos es mayor del 10%, de la trama superficial de la figura se prevé aproximadamente que un 5% de la superficie de la capa asfáltica tendrá un contenido de huecos inaceptable. La trama superficial de huecos puede ser usada para trazar las áreas de baja densidad y por tanto identificar donde pueden esperarse fallos prematuros.

Ya que los datos del GPR se toman después de haber finalizado la compactación, se recomienda el empleo de este método para mejorar el control de calidad.

4.3.4 Perfiles de densidades

La segregación afecta a la densidad por lo que un sistema apropiado consistiría en la medición de la densidad in situ mediante sistemas de lectura rápida. A

partir de estas lecturas se van a trazar perfiles de densidad para detectar áreas segregadas. La utilización de perfiles de densidad no distingue entre segregación térmica y granulométrica.

Para la elaboración de los perfiles de densidad, se determina la ubicación del perfil de densidad usando una cámara de tecnología infrarroja. Las mediciones de densidad están realizadas usando un dispositivo de densidad nuclear. El criterio para escoger la localización de un perfil de densidad está basado sobre la variación de temperaturas en un área de la capa asfáltica recién pavimentado antes de su compactación.

El criterio es el siguiente:

$\Delta T \geq 25^{\circ} F$	Realizar el perfil de densidad
$\Delta T \leq 25^{\circ} F$	Realizar ensayo de control de calidad normal

Este criterio fue desarrollado por el Departamento del Transporte de Washington en el estudio de varios proyectos.

Un equipo de dos personas es requerido para completar el ensayo. Una persona que maneja las cámaras digital y infrarroja, e identifica las áreas que requieren un perfil de densidad. La otra persona marca las áreas identificadas para los perfiles de densidad y opera con el dispositivo de densidad nuclear.

El procedimiento del perfil de densidad se usa como herramienta del control de calidad.

4.3.4.1 Procedimientos generales para la localización de los perfiles de densidad

Los procedimientos generales para identificar la localización de los perfiles de densidad se indica a continuación [7]:

1. Tomar una serie de imágenes infrarrojas y digitales de cada una de las siguientes zonas:
 - Vertido de la mezcla desde planta a camión
 - Superficie existente en frente de la extendedora
 - En la caja del camión o en el material del elevador en cordón
 - En la tolva de la extendedora
 - En la regla de extendido de la extendedora
2. Tomar una serie de imágenes infrarrojas y digitales para indicar la temperatura de compactación de la capa asfáltica de la siguiente manera:
 - Una imagen inmediatamente antes de la compactación
 - Una imagen inmediatamente antes de la compactación intermedia
 - Una imagen inmediatamente antes del final de la compactación

3. Tomar una serie de imágenes infrarrojas y digitales y buscar localizaciones para realizar perfiles de densidad:
 - Permanecer dentro de los 30 pies detrás de la regla de extendido de la extendidora
 - Mirar hacia la extendidora y ver todo el carril
 - Analizar el pavimento recién colocado para cualquier mancha fría sobre la capa. Las imágenes infrarrojas deben ser tomadas en las zonas que no han sido compactadas:
 - Si el diferencial de temperatura es mayor o igual a 25°F, se marcará esta zona colocando una varilla. Se tomará una imagen infrarroja y digital de la misma localización usando la varilla como referencia. Se determinará la coordenada transversal desde el borde del pavimento a esta zona. Esta zona se convertirá en el punto cero del perfil de densidad, el cual se llevará a cabo después de compactar la capa completamente.

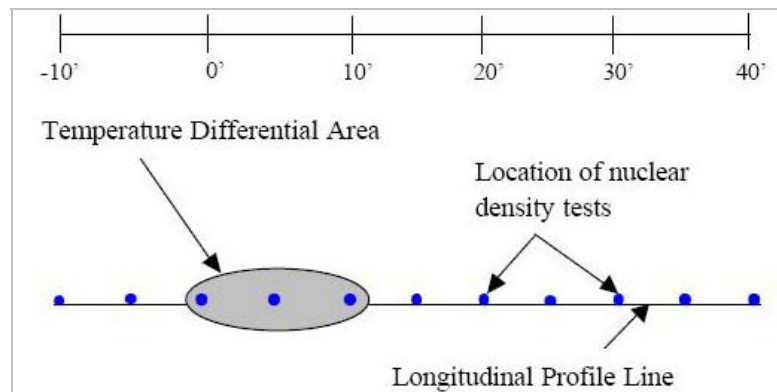


Fig: Diseño del perfil de densidad para un área segregada

Respecto a la segregación longitudinal causada normalmente por la extendidora en la que aparecen vetas longitudinales (*streaking*), el perfil no debe cruzar por encima de las vetas longitudinales. Para determinar la línea del perfil, se recomienda tomar una distancia de ± 2 pies en los extremos tal y como se observa en la figura y a partir de aquí determinar la línea del perfil, cuyo trazado será esviado respecto de la veta longitudinal.

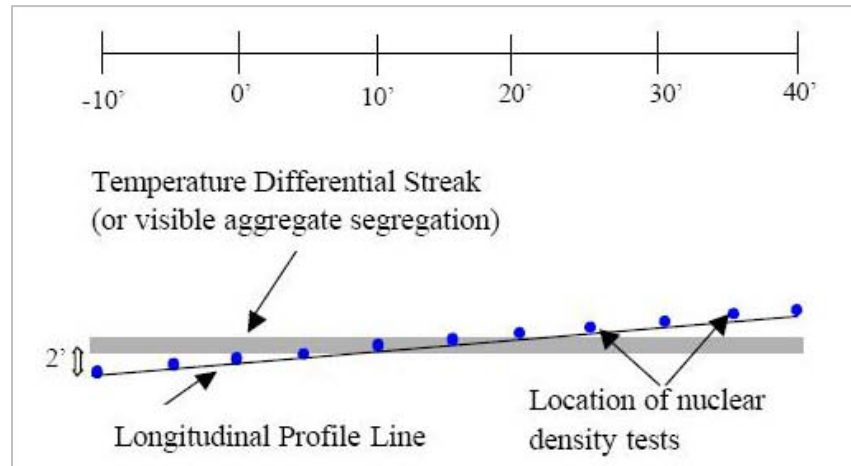


Fig: perfil de densidad para las vetas longitudinales

- Si el diferencial de temperatura es menor de 25°F, se realizará el ensayo normal de control de calidad.
- Las imágenes infrarrojas y los perfiles de densidad deben ser además realizados en áreas de notable segregación visual y en cualquier momento que haya una parada/inicio de la operación de pavimentación. El procedimiento es el mismo que el mencionado anteriormente.

4.3.4.2 Elaboración perfil densidad

Después de que los puntos identificados y marcados para los perfiles de densidad han sido compactados completamente se empiezan los ensayos de perfil de densidad. Un perfil de densidad se describe como una línea longitudinal de 50 pies sobre la capa con las lecturas de densidad aproximadamente cada 5 pies tal y como se observa en la figura anterior. Los pasos a seguir serán los siguientes:

1. Sobre el punto cero marcado se diseñará el resto del perfil sobre la capa:
 - Se medirá la coordenada transversal desde el borde del pavimento. Todo el perfil mantendrá esta coordenada. Sin embargo, si se observan áreas segregadas adyacentes al perfil se añadirán estos puntos de ensayo adicionales anotando su coordenada y localización en el perfil.
 - Se marcarán los primeros puntos de ensayo cada 10 pies desde el punto cero en la dirección opuesta a la pavimentación.
 - Posteriormente se marcarán el resto de puntos del ensayo cada cinco pies en la dirección de la extendidora para un total de

diez puntos como mínimo. Por lo tanto, el perfil se extiende desde -10 pies hasta 35 pies como mínimo.

2. Una vez definidos los puntos del perfil, se colocará el dispositivo de densidad nuclear sobre un punto de ensayo. El proceso en la toma de lecturas se describe a continuación:
 - Para un punto se tomarán dos lecturas separadas 90°.
 - Antes de mover el dispositivo se hará un promedio de las dos lecturas. Se comparará cada lectura individual con el promedio. Si cualquiera de estas lecturas varía por más de 1.0 lb/ft³ del promedio, se tomarán lecturas adicionales hasta que se obtengan lecturas con una variación menor de 1.0 lb/ft³, descartando las otras lecturas para ser válidas.
 - Se moverá el dispositivo aproximadamente 5 pies en la dirección de pavimentación para tomar la siguiente lectura. Si un área segregada es visible en medio de 5 pies de distancia, se tomará una serie adicional de lecturas en esa localización.
 - Un mínimo de tres perfiles de densidad deben ser realizados por día.
 - Un perfil de densidad adicional deberá ser realizado en un área uniforme dentro de los 5 pies del perfil original.

Para el perfil de densidad se define el rango de densidad y la disminución de densidad. El rango de densidad es la diferencia entre las lecturas de densidad máxima y mínima a lo largo del perfil y la disminución de densidad es la diferencia entre las lecturas media y mínima. En base a un estudio realizado por el Departamento de Transporte de Washington se determinaron unos valores límite para el rango de densidad y la disminución de densidad.

Representando los rangos de densidad de los distintos perfiles, se observa que cuando los diferenciales de temperatura son menores de 25°F, los puntos caen por debajo del valor de 6 libras/pies³ (6 pcf). Por el contrario, los rangos de densidad exceden de 6 pfc cuando los diferenciales de temperatura son superiores a los 25°F.

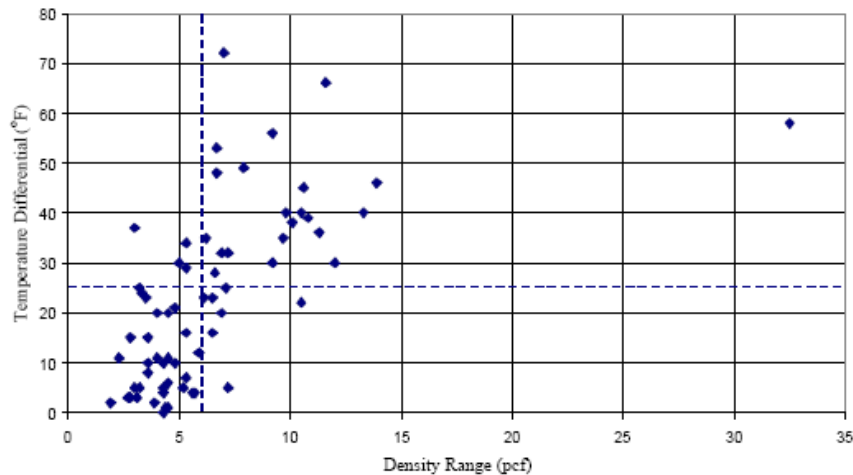


Fig: Rango de densidad versus el diferencial de temperatura para cada perfil de densidad

Por otro lado, representado la disminución de densidad para los distintos perfiles, se observa que cuando los diferenciales de temperatura son menores de 25°F, los puntos caen por debajo del valor de 3 pcf.

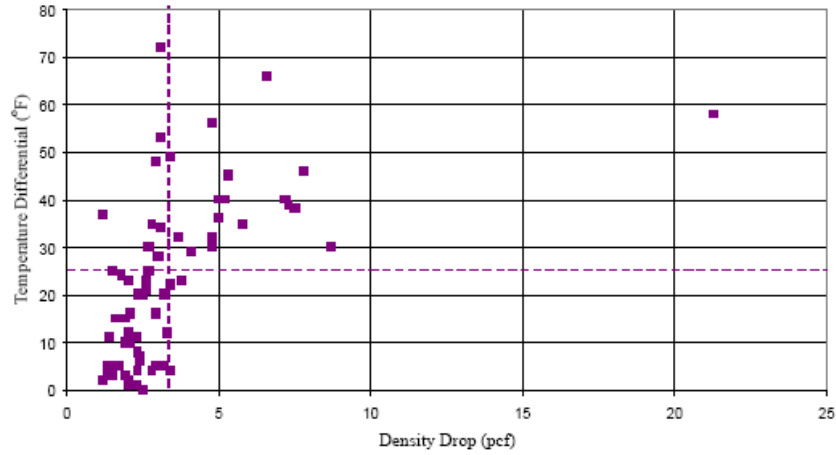


Fig: Disminución de densidad versus el diferencial de temperatura para cada perfil de densidad

Los perfiles de densidad son un procedimiento sistemático para determinar áreas de baja densidad debidas a la segregación granulométrica o térmica. La inspección visual o la utilización de la cámara termográfica determinan la localización del perfil de densidad. Los perfiles pueden ser usados como un método de control para mejorar la calidad del producto acabado.

Para la determinación de la densidad se pueden usar: métodos nucleares y no nucleares, cuyo desarrollo se presenta en los siguientes apartados.

4.3.4.3 Métodos nucleares

Estos medidores pueden ser usados para identificar áreas segregadas por perfiles de densidades longitudinales de la capa asfáltica. Una suposición es que la segregación será vista como densidad baja sin embargo, la literatura revisada indica un éxito limitado para este método. Hay dos razones:

En primer lugar, una suposición común para usar estos medidores es que la densidad disminuye con el aumento de la segregación del árido grueso. Sin embargo, esta suposición no considera la granulometría para la línea de máxima compacidad. Si la fórmula de trabajo empieza por encima de esta línea, la separación del árido grueso en este tipo de mezcla puede dar como resultado una densidad más elevada cuando la granulometría se traslada hacia la línea de máxima compacidad.

En segundo lugar, los áridos tienen diferentes efectos sobre la variabilidad del medidor. Si la mezcla está compuesta de una mezcla de distintos tipos de árido, el cambio en la variabilidad del ensayo puede hacer difícil la detección y medición de áreas segregadas.

Densímetro nuclear para capas delgadas

Resulta complicado asociar las diferencias de densidad a fenómenos de segregación por lo que existen equipos específicos que miden la densidad en la capa más superficial para eliminar así la variabilidad propia de la densidad aportada por las capas inferiores. Uno de estos equipos es el densímetro nuclear cuyo uso está limitado a capas delgadas.

La CasaTroxler ha desarrollado un prototipo de densímetro nuclear para capas delgadas con la intención de ser usado como un medidor tradicional para medir in situ las propiedades de las mezclas bituminosas en caliente.

El densímetro nuclear está diseñado especialmente para medir la densidad de capas de poco espesor (de 2.5 a 10 cm). Mide con exactitud la densidad de la capa delgada, sin la influencia de la densidad de la capa de apoyo inferior proporcionando una lectura rápida. Proporciona resultados rápidos y de gran exactitud a partir de una fuente de emisiones gamma y detectores que permanecen dentro del densímetro. Las emisiones gamma penetran el material evaluado y son recibidas por los detectores para, posteriormente, ser cuantificadas. Además no se requieren cálculos adicionales ni la aplicación de gráficos para la determinación de la densidad de la capa.

Los inconvenientes asociados a esta tecnología incluyen lo siguiente:

- el contenido de humedad en las MBC influirá en las lecturas del medidor. Esto limita el uso de estos medidores para aplicaciones durante la construcción únicamente. La variabilidad en los contenidos de humedad de la capa del pavimento después de la construcción hará cuestionable la fiabilidad de los resultados.
- Las mediciones de densidad simultáneas son necesarias con el fin de utilizar plenamente los datos. En la actualidad, esto requiere el uso de dos medidores por ensayo.
- Sólo mediciones discretas pueden ser obtenidas.

En EEUU el densímetro es utilizado actualmente por muchas agencias gubernamentales y contratista como un método aprobado para la medición de la densificación en capas asfálticas de poco espesor.

4.3.4.4 Métodos no nucleares (basados en la resistividad): PQI (Pavement Quality Indicator)

El PQI de la casa Trans-Tech permite obtener la densidad del pavimento asfáltico rápidamente. Se trata de un innovador equipo de medida de densidades in situ no nuclear para pavimentos asfálticos.

Este dispositivo de determinación de densidades de mezclas asfálticas está basado en el concepto de la resistividad y desarrolla un campo electromagnético usando un trasmisor y un receptor, superando en rapidez y seguridad de empleo a los dispositivos nucleares. Permite conocer la densidad obtenida por efecto del sistema de precompactación, a la salida de regla de la extendidora, permitiendo su ajuste.

4.3.5 Extracción de testigos

La extracción de testigo permite conocer la composición de la mezcla, esto es la granulometría, el contenido de ligante, la densidad y el contenido de huecos, todos ellos factores ligados a la segregación de la mezcla. El problema es que resulta poco operativa y corresponde al control del producto acabado.

El Departamento de Transporte de Alabama ha adoptado recientemente un programa de ensayo, basado en las mediciones del contenido de asfalto y la granulometría, para cuantificar la segregación. Brevemente, se toman los testigos de las áreas con una textura de la superficie no uniforme, y se determinan el contenido de asfalto y la granulometría. El área se considera segregada si el contenido de asfalto está por debajo de un valor umbral y la granulometría está fuera de unos rangos preestablecidos.

CAPÍTULO 5

DISEÑO Y FABRICACIÓN DE LA MEZCLA

5 DISEÑO Y FABRICACIÓN DE LA MEZCLA

No es objeto de esta tesina centrarse en el proceso de diseño y fabricación de la mezcla por lo que la autora hará una breve mención en su contenido.

El diseño adecuado de la mezcla es importante para eliminar la segregación. Las mezclas que se diseñan de modo uniforme, sin granulometría discontinua, generalmente son muy tolerantes. Permiten la existencia de errores en otras partes de las operaciones de la planta o de vertido de la mezcla sin afectar de modo significativo al rendimiento de la mezcla.

Las mezclas con granulometría discontinua son intolerantes. En consecuencia, el más leve error en el proceso de planta, transporte o vertido de la mezcla puede producir superficies no uniformes.

Una línea de densidad máxima, similar a la que se muestra en la figura, puede usarse como guía para obtener una granulometría uniforme. Para confeccionar una línea de densidad máxima, la FHWA (Federal Highway Administration) utiliza en la escala horizontal los tamaños de tamiz elevados a la potencia 0.45,

CAPÍTULO 6

CARGA DE CAMIÓN EN PLANTA

6 CARGA DE CAMIÓN EN PLANTA

Debido a la carga rápida del camión debajo de las tolvas, los conductores frecuentemente tienden a detener el camión debajo de la tolva y no moverlo durante la carga. Si la mezcla es sensible a la segregación, los áridos más grandes rodarán hacia las partes delantera, trasera y laterales del camión, haciendo que los materiales gruesos sean los primeros y los últimos en descargarse de la caja del camión.

Los materiales gruesos se depositarán en las secciones laterales de la extendidora. Este tipo de descarga produce zonas gruesas de pavimento entre una carga del camión y la siguiente. Este tipo de carga se muestra en la siguiente figura.

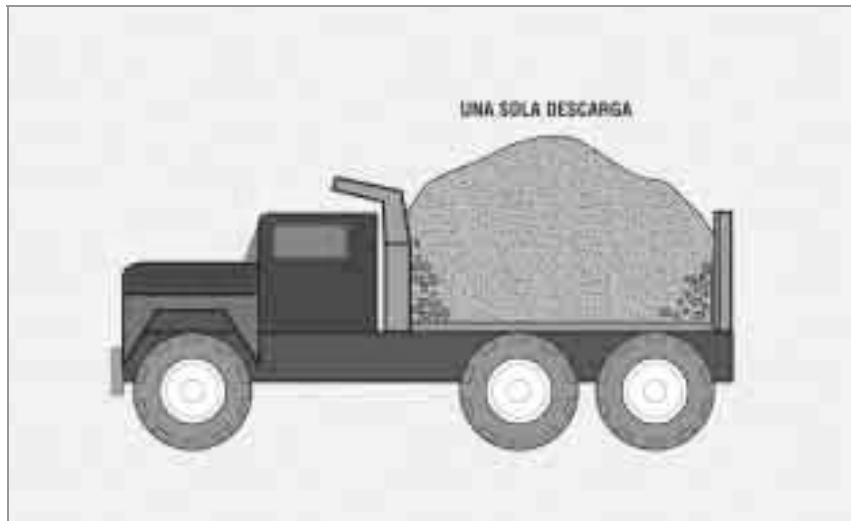


Fig: Carga incorrecta del camión

Al cargar el camión en tres etapas diferentes de descarga, la primera cerca de la parte delantera de la caja del camión, la segunda cerca de la compuerta trasera y la última en su parte central, el material grueso es forzado a rodar hacia el centro del camión para luego quedar cubierto como se ilustra en la figura.

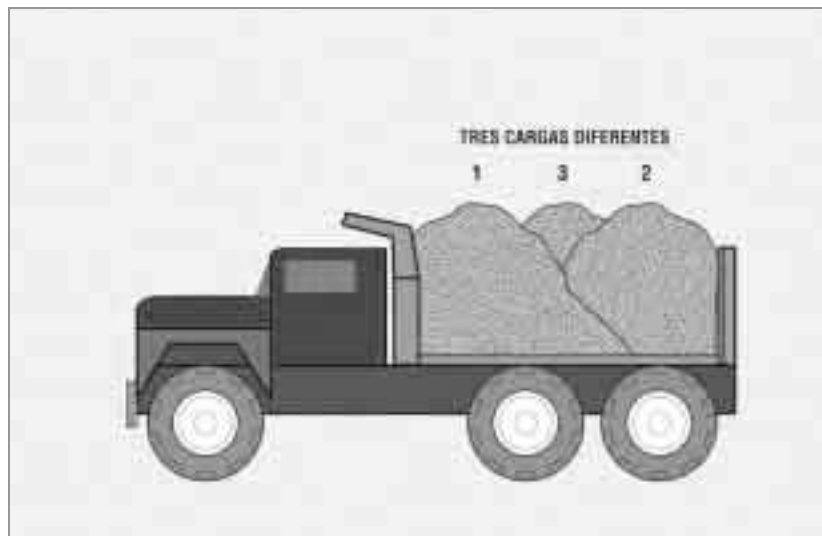


Fig: Carga correcta del camión

Con esto se asegura que el primer material descargado por el camión será material de buena calidad con el material grueso combinado en su parte central.

Las tolvas equipadas con dosificadores de peso aseguran que el camión quedará uniformemente cargado y mejora la probabilidad de evitar la segregación de una mezcla sensible a ello.

CAPÍTULO 7

TRANSPORTE DE LA MEZCLA

7 TRANSPORTE DE LA MEZCLA

El transporte de la mezcla supone todos los movimientos y equipos necesarios para transportar la MBC desde la planta de producción a la zona de pavimentación, incluyendo la carga del camión en planta, recorrido hasta la zona de pavimentación, vertido de la mezcla a la extendedora o tolva del vehículo de transferencia de material, y vuelta del camión a la planta de producción. Idealmente, el objetivo del transporte de la mezcla debería ser mantener las características de la mezcla entre la planta de producción y la zona de pavimentación. Las prácticas de transporte pueden tener un efecto profundo sobre la temperatura de la mezcla en la pavimentación, la segregación granulométrica y/o térmica de la mezcla y calidad de la capa asfáltica.

La mezcla se transporta en camiones cuya caja estanca y lisa debe estar limpia y tratada con productos para impedir que la mezcla bituminosa se pegue a la caja. La caja del camión debe ser cubierta con lonas para reducir las pérdidas de calor durante el transporte.

Durante el transporte, la mezcla sufre un enfriamiento especialmente acusado en la parte superior y en el contacto con la caja del camión. Se formará una corteza fría que las lonas no eliminarán completamente. Esta corteza protege al resto de la mezcla y ayuda a conservar la temperatura del núcleo que puede ser adecuada durante varias horas. Esta corteza debería deshacerse al descargar la carga en la tolva de la extendedora y homogeneizarse con el resto al ser llevada hacia la regla de la extendedora por los alimentadores y sinfines. Sin embargo esto no es así y se producen variaciones importantes en la temperatura de la capa, y en consecuencia, en la compactación de la misma.

La elección correcta de los camiones es de suma importancia ya que la caja debe tener dimensiones y formas adecuadas. Ésta no debe ser muy larga para no tropezar en la tolva de la extendedora ni muy corta porque la descarga puede caer fuera de la tolva de la extendedora. En este capítulo se tratarán los tipos de camiones utilizados para el transporte de la mezcla y las diversas consideraciones relacionadas con el transporte de la mezcla.

En Estados Unidos se distinguen tres tipos básicos de camiones utilizados para el transporte de la mezcla clasificados por sus respectivos métodos de descarga:

- End dump: se trata de un camión volquete normal
- Bottom dump o también llamado belly dump: se trata de un camión que descarga por el vientre de la caja.
- Live bottom dump o también llamado flow-boy

7.1 END DUMP TRUCK

Este tipo de camiones se trata de camiones volquete tradicionales que descargan por elevación de la caja. La carga se desliza hacia abajo de la caja y hacia fuera a través de la puerta trasera del camión (ver figura).



Fig: End Dump truck o camión volquete

Los camiones volquete son el tipo de vehículo más popular de transporte porque son abundantes, maniobrables y versátiles. Algunas consideraciones generales asociadas con los camiones volquete son:

1. Cuando la caja está elevada ésta no debería ponerse en contacto con la extendidora. La caja en contacto con la extendidora puede afectar a la elevación de la regla de extendido, y a su vez perjudicar en la suavidad de la capa asfáltica.
2. La caja del camión debe ser levantada ligeramente antes de que la puerta trasera se abra. Esto permite a la mezcla deslizarse hacia atrás contra la puerta trasera de forma que se inunde la tolva de la pavimentadora. La mezcla que resbala hacia la tolva de la extendidora es más susceptible de segregación granulométrica.
3. Establecer el contacto camión-extendidora para asegurar que el camión no golpea a la extendidora demasiado fuerte y no causa sacudidas en la extendidora con una parada repentina, la cual podría causar un punto áspero en la capa asfáltica.
4. una vez la extendidora y el camión están en contacto, deben seguir en contacto. Esto asegura que la mezcla no se derrama accidentalmente frente a la extendidora a causa del hueco entre el camión y la misma. Por lo general, el conductor del camión aplicará los frenos del camión con bastante fuerza para ofrecer alguna resistencia a la extendidora. La mayor parte de extendidoras pueden ser acopladas para la descarga del camión usando unas bolas de remolque.

7.2 BOTTOM DUMP TRUCK

Se trata de camiones de descarga de material en cordón. Los camiones de descarga en cordón descargan por la apertura de puertas en la parte inferior de la caja del camión. Las paredes interiores de la caja se inclinan para dirigir la carga hacia las puertas inferiores. La descarga puede ser controlada por el grado de apertura de la puerta y de la velocidad del camión durante el vertido. Usualmente ésta es colocada en un montón alargado llamado cordón en frente de la extendidora.

Posteriormente el windrow elevator o elevador de material en cordón es usado para elevar el cordón de la mezcla y alimentar la tolva de la extendidora. Los elevadores de material no tienen ningún método de regulación del flujo de material, el cual es necesario para colocar la cantidad correcta de mezcla para ajustarse al ancho y espesor de pavimentación sin permitir que la tolva de la extendidora se agote o llegue a estar sobrecargada.



Fig: bottom dump truck



Fig: descarga de material en cordón por el vientre de la caja

7.3 LIVE BOTTOM DUMP TRUCK

Este tipo de camiones tienen un sistema de cinta transportadora en la parte inferior de la caja para descargar. La mezcla bituminosa en caliente se descarga en la parte de atrás de la caja sin tener que levantar la caja del camión (tal y como se observa en la fotografía). Estos camiones son más caros de usar y de mantener debido al sistema de cinta transportadora pero reducen los problemas de segregación (porque la mezcla se mueve en una gran masa)

y elimina el contacto entre la extendedora y la caja del camión, debido a que la caja no se levanta durante la descarga.



Fig: Live bottom dump truck



Fig: Descarga del live bottom dump truck

7.4 CUADRO RESUMEN

Cada tipo de camión es capaz de entregar adecuadamente la mezcla desde la planta a la zona de pavimentación. Sin embargo, ciertas situaciones tales como las enumeradas en la tabla que se muestra a continuación, puede hacer de un camión más ventajoso sobre otro.

Situación	Posible tipo de camión	Razón
Pavimentación en calles congestionadas de ciudad	End dump	Mejor maniobrabilidad porque ni tiene ningún trailer y es más pequeño que un live bottom y un bottom truck
Pavimentación usando una mezcla altamente vulnerable a la segregación	Live bottom	Este camión entrega la mezcla por la cinta transportadora la cual minimiza la segregación
Pavimentación en carreteras rurales	Bottom dump	En general tiene una capacidad mayor que el end dump (por lo tanto son necesarios menos camiones) pero requiere espacio para las hileras de material

Tabla: situaciones de pavimentación y tipo de camión

CAPÍTULO 8

CONSIDERACIONES OPERACIONALES DE LA CARGA Y EL TRANSPORTE DE MEZCLA

8 CONSIDERACIONES OPERACIONALES DE LA CARGA Y EL TRANSPORTE DE LA MEZCLA

Hay varias consideraciones operacionales y reglas de buena práctica que son esenciales para mantener las características de la mezcla entre las instalaciones de la planta y el lugar de pavimentación. A continuación se van a desarrollar estas consideraciones operacionales en cuatro categorías:

- Carga en planta
- Transporte dentro del camión
- Descarga
- Sincronización de la operación

8.1 CONSIDERACIONES OPERACIONALES DE LA CARGA EN PLANTA

La carga en las instalaciones de planta implica transferir la mezcla desde el silo para el camión de transporte. Hay dos posibles problemas con esta transferencia:

1. Lubricación y limpieza de la caja del camión

Las cajas de los camiones deberían estar limpias y lubricadas para prevenir la introducción de sustancias externas hacia la mezcla y evitar que la mezcla se pegue a la caja del camión. Los productos derivados del petróleo no deben utilizarse debido a aspectos medioambientales y porque tienden a estropear el betún. Luego para la lubricación deben utilizarse productos no derivados del petróleo tales como agua jabonosa u otros productos comerciales adecuados.

2. Segregación granulométrica

La mezcla debe ser descargada de la caja del camión para minimizar la segregación. La caída de la mezcla del silo en una gran masa crea una única pila de mezcla en la caja del camión. El árido de mayor tamaño tiende a rodar fuera de este montón y se recoge alrededor de la base. El vertido de la mezcla en pequeñas masas (tres es lo típico) en diferentes puntos de la caja del camión evitará en gran medida la acumulación del agregado de mayor tamaño en un área y por lo tanto minimizará la segregación granulométrica.



Fig: Vertido de mezcla a camión

8.2 TRANSPORTE DE CAMIÓN

El transporte del camión afecta a las características de la mezcla con el enfriamiento [12]. La mezcla es en general cargada en el camión a una temperatura bastante uniforme entre 250°F y 350°F

Durante el transporte, el calor es transferido al medio ambiente por convección y radiación y la temperatura de la superficie de la mezcla descende. Este enfriamiento de la superficie de la mezcla aísla la masa interior y por lo tanto la mezcla transportada tiende a desarrollar una corteza fina fría en la superficie que rodea un núcleo mucho más caliente.

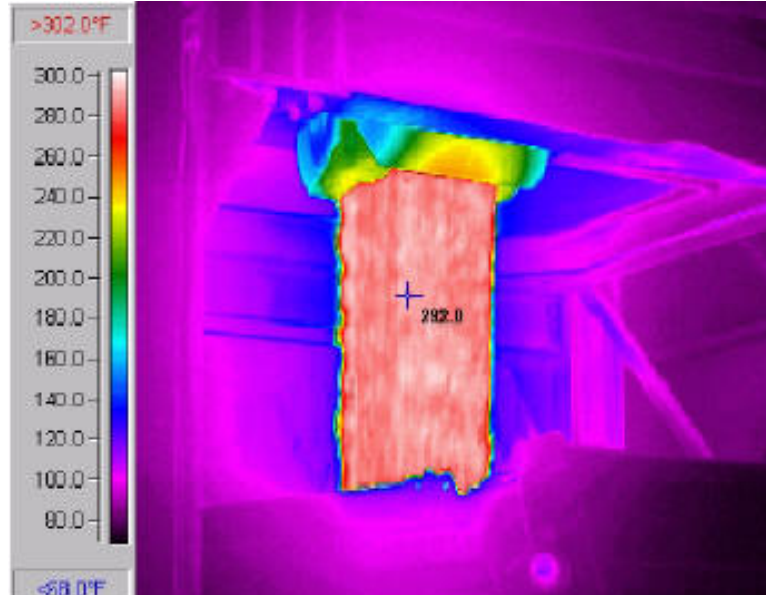


Fig: Imagen de infrarrojos de la caída de la mezcla de un silo al camión. Se observa que la temperatura es uniforme en toda la mezcla.

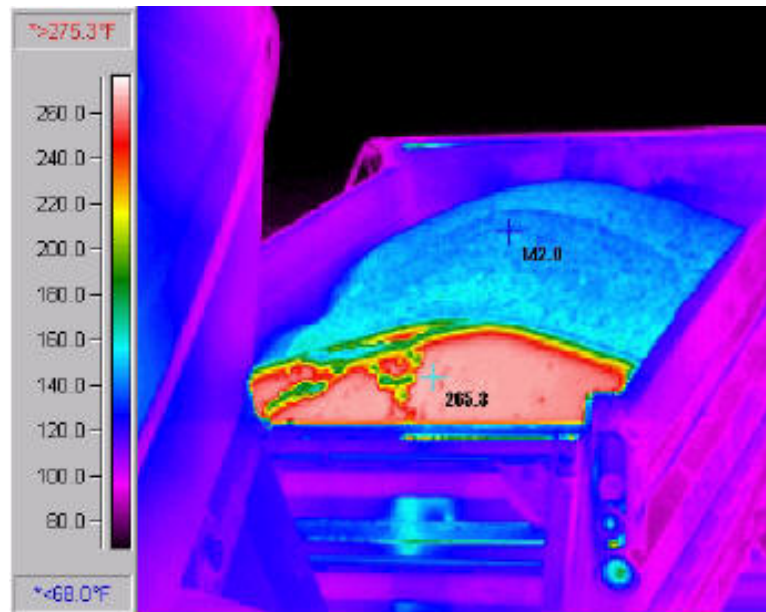


Fig: Imagen de infrarrojos de la carga del camión. Se muestra la corteza fría de la capa superficial (azul) y la masa interna caliente (roja).

Factores tales como la temperatura del aire, la lluvia, el viento y la distancia de transporte pueden afectar a las características y a la temperatura de esta

corteza. Varias medidas que se pueden tomar para minimizar el enfriamiento de la mezcla durante el transporte son:

1. Minimizar la distancia de transporte
Se puede lograr escogiendo plantas cercanas a la zona de pavimentación. Las plantas más cercanas proporcionan tiempos más cortos y resultan en un enfriamiento menos de la mezcla durante la mezcla. Desafortunadamente, muchas localizaciones de pavimentación pueden no estar cerca de ninguna planta existente y desde el punto de vista económico no se podrá permitir el uso de una planta móvil.
2. Aislar la caja del camión
Esto puede disminuir la pérdida de calor durante el transporte. Un aislamiento tan simple como un contrachapado de madera puede usarse para evitar la pérdida de calor.
3. Colocar una lona sobre la caja del camión
Una lona sobre la caja del camión proporciona un aislamiento adicional, protege la mezcla de la lluvia y disminuye la pérdida de calor. Un estudio del Quality Improvement Committee del NAPA (National Asphalt Pavement Association) estudió la colocación de la lona sobre la caja del camión y encontró que las temperaturas superficiales de la mezcla de las cargas tapadas con lona descendían más lentamente que las cargas no tapadas con lona pero la temperatura por debajo de la superficie a unos 10 cm entre las cargas tapadas y las no tapadas no fueron significativamente diferentes.



Fig: Conductor cubriendo la caja del camión con una lona

En la mayoría de los casos, el transporte de camión parece enfriar la superficie de la masa de mezcla transportada, sin embargo esta corteza superficial fría puede tener efectos perjudiciales sobre la calidad total de la capa asfáltica si no se trata adecuadamente con medidas como la reducción del tiempo de transporte, aislamiento de la caja del camión o colocar una lona para disminuir la tasa de enfriamiento superficial de la mezcla.

Con la utilización de dispositivos de transferencia de material, se mezclará en el lugar de pavimentación la corteza y la masa del núcleo interior, cuya temperatura está cercana a la temperatura original en carga, produciendo una mezcla con una temperatura uniforme.

8.3 DESCARGA EN LA ZONA DE DE PAVIMENTACIÓN

La descarga de la mezcla por el método tradicional de vertido directo desde camión implica aquellos procedimientos discutidos en el apartado 7.1 de la presente tesina así como algunas otras consideraciones básicas tales como:

1. La mezcla debe ser descargada rápidamente cuando llega al lugar de pavimentación. Esto minimizará el enfriamiento de la mezcla antes de ser colocada.
2. Antes de cargar la mezcla en la extendedora, hay que verificar que la mezcla es correcta. Ocasionalmente, los trabajos de pavimentación requieren varios diseños de mezcla diferentes para las distintas capas y estas mezclas no deben ser intercambiadas.

8.4 SINCRONIZACIÓN DE LA OPERACIÓN

Idealmente, la producción de la mezcla en planta, el transporte en camión y la entrega a la extendedora deben estar sincronizados para reducir al mínimo la acumulación del exceso de mezcla en cualquiera de las tres fases. Siendo realistas, sin embargo esta sincronización puede ser absolutamente difícil debido a la variación de rendimientos de entrega de la mezcla, tiempos de viaje impredecibles y producción en planta variable.

Idealmente, todas las operaciones están diseñadas para encontrar rendimientos óptimos. Sin embargo, estos rendimientos pueden variar en función del ancho de pavimentación y del espesor de capa. Además, las localizaciones complicadas de pavimentación pueden temporalmente disminuir los rendimientos de colocación.

El transporte de camión debe ser planificado tal que el rendimiento del transporte de la mezcla (expresado en toneladas/hora) se corresponda

estrechamente con la tasa de producción de la planta y con la colocación de la mezcla.

Algunos factores para considerar son:

- número de camiones que se utilizarán
- tipo de camión
- capacidad media de los camiones
- rendimiento de salida de las instalaciones de producción
- disponibilidad y condiciones de los silos de almacenamiento en la planta de producción
- tiempo para lubricar la caja del camión antes del transporte
- tiempo de espera en la planta de producción
- tiempo de carga y de pesado en la planta de producción
- tiempo para cubrir la caja (cuando se usa una lona)
- distancia entre la instalación de producción y el lugar de pavimentación
- velocidad media del camión

El tráfico desempeña un papel importante en los rendimientos de entrega de la mezcla porque afecta a la velocidad del camión. Especialmente en áreas urbanas congestionadas, el tráfico pesado e imprevisible puede aumentar sustancialmente, o por lo menos variar, el tiempo de viaje del camión. Mientras que el tiempo de recorrido aumenta, más camiones son necesarios para proporcionar una determinada tasa de mezcla al lugar de pavimentación. Por lo tanto, el empeoramiento del tráfico aumenta los costes de transporte. Además, la incertidumbre del tráfico puede resultar tanto en tiempos de inactividad largos en la extendedora, ya que espera el próximo camión, o que varios camiones lleguen al mismo tiempo a la planta de aglomerado o al lugar de pavimentación.

La producción de planta está típicamente relacionada con las tasas de transporte y de entrega de la mezcla a la extendedora. A menudo puede ser más económico dirigir las plantas a rendimiento máximo y almacenar el exceso de material en silos de almacenamiento para la descarga en camiones a medida que van llegando. El aislamiento del silo de almacenamiento ha progresado a un estado donde las mezclas densas pueden ser almacenadas en ellos hasta una semana sin afectar significativamente a las características de la mezcla. Sin embargo, las mezclas gap graded (granulometría discontinua) tales como las SMA (microaglomerados) o OGFC no deben permanecer por más de 2 o 3 horas.

En resumen, la sincronización debe ser el objetivo, pero a veces es difícil de alcanzar ya que influyen varios factores y puede dar lugar a la ineficacia de la planta y la degradación de la calidad de la mezcla. Si la planta de producción tiene silos bien aislados y herméticos y está produciendo una mezcla densa, puede ser beneficioso poner a pleno rendimiento la planta y almacenar la mezcla hasta que se precise en lugar de intentar igualar la tasa de entrega a la extendedora y la de trayecto.

CAPÍTULO 9

EXTENDIDO DE LA MEZCLA

9 EXTENDIDO DE LA MEZCLA

El extendido debe efectuarse a una velocidad constante, regulando la velocidad de la extendedora a la producción de la planta para conseguir minimizar las paradas de la extendedora.

9.1 MÉTODO TRADICIONAL: VERTIDO DIRECTO DESDE CAMIÓN A EXTENDEDORA

Con respecto a la calidad de la mezcla, se recomienda vigilar las segregaciones producidas durante el vertido de la caja del camión.

Los camiones se irán acoplado a la extendedora de forma que el contacto sea suave. Cuando ya se ha efectuado la aproximación, se coloca el camión en punto muerto para ser empujado por la extendedora. Seguidamente, la descarga a la tolva se realiza elevando la caja del camión. Al descargar el

camión en la tolva de la extendedora, es importante descargar el material como una sola masa, en lugar de poco a poco. Para lograr esto, la superficie de la caja del camión debe estar en buenas condiciones y lubricada, de modo que toda la carga se deslice hacia atrás.

Para asegurarse que el material se descarga como una sola masa, hay que elevar la caja del camión a un ángulo empinado pero seguro. La altura de descarga de la mezcla debe ser mínima para evitar formaciones cónicas y ser extendidas sin amontonamientos.

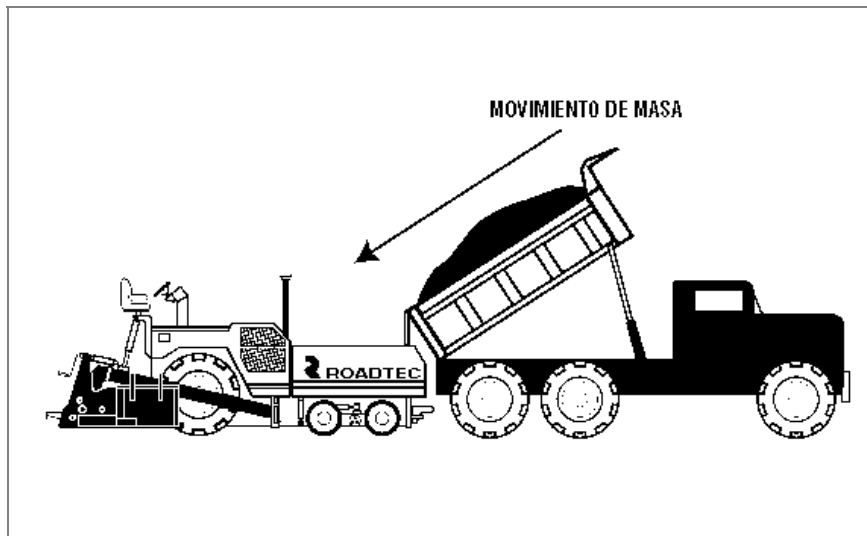


Fig: un ángulo de descarga más grande asegura una descarga en masa

La descarga rápida de materiales del camión llena la tolva de la extendedora y reduce al mínimo el escurrimiento del material que frecuentemente se produce en la compuerta trasera del camión. La descarga rápida evita la acumulación de los materiales gruesos en los extremos de la extendedora.

La mezcla se dispone en franjas con un ancho adecuado a fin de efectuar la menor cantidad de juntas longitudinales y lograr continuidad en el pavimento. En sectores con pendientes, conviene extender en subida pues cuesta abajo el camión debe ir frenando y esto perjudica la extendedora. Así se evita una capa defectuosa de manera que se logran mejores valores de compactación al efectuar en subida el extendido.

Se debe controlar la temperatura con que las mezclas en caliente llegan para su extendido. La temperatura se verifica por cada camión, con termómetros especiales que se introducen en la mezcla. Si la temperatura fuese muy elevada puede que el ligante haya alcanzado una excesiva temperatura con peligro de oxidación o envejecimiento prematuro. Si fuese muy baja, la compactación se haría muy dificultosa.

Por otra parte, con producciones relativamente altas, el tiempo que transcurre entre el final del vertido de un camión y el inicio del siguiente obliga casi siempre a parar la extendedora, pues la capacidad de almacenaje de la tolva

es relativamente pequeña, y su volumen teórico no se alcanza nunca, aun utilizando bañeras bien adaptadas.

9.2 DISPOSITIVOS DE TRANSFERENCIA DE MATERIAL

Durante la década de los 80, un programa de estudios sobre el origen de los fallos en los pavimentos asfálticos determinó que la segregación de los materiales era una de las causas más relevantes. Los orígenes de la segregación eran conocidos en su mayoría pero era preciso encontrar el sistema que remediara la misma antes de extender el aglomerado. La idea era disponer de un equipo que pudiera volver a mezclar el aglomerado caliente justo antes de entregarlo a la extendedora. Los dispositivos de transferencia de material se usan en el extendido de las mezclas bituminosas en caliente. Proporcionan un volumen adicional de material que permite que la extendedora opere de forma continua y minimiza el tiempo de espera de los camiones.

9.2.1 Alimentador

El primer alimentador europeo surgió en Francia a partir de la necesidad de conseguir altas producciones en la ejecución de una autopista. Se modificó una extendedora quitándole la plancha y colocando en su lugar una cinta transportadora, de modo que se convirtió en un alimentador móvil.

Este dispositivo sólo transfiere material a la extendedora de modo que no dispone de capacidad de remezcla y de capacidad de almacenamiento.



Fig: alimentador

El alimentador proporciona una cantidad regular de flujo de material a la extendedora sin ningún contacto y su gran capacidad de rendimiento permite

su empleo con grandes extendedoras. De esta forma, la extendedora produce capas asfálticas regulares sin interrupciones y con la mayor calidad en el extendido.

Un caso particular de alimentador es el windrow elevator, cuyo uso está limitado a la pavimentación en cordón.

9.2.2 Windrow elevator o elevador de material en cordón

En Estados Unidos es bastante frecuente el uso de camiones de descarga por fondo, los cuales dejan un cordón en el suelo. Este tipo de pavimentación se le denomina windrow paving. El proceso consiste en lo siguiente: a la extendedora se le acopla un alimentador llamado windrow elevator que eleva el material desde el suelo a la tolva de manera que sólo hay una transferencia de material. Con este sistema, se aumenta la capacidad de la tolva de recepción de la extendedora.

Al integrar este dispositivo se encuentra disponible una mayor capacidad de compensación con respecto a los cordones ya que se subsanan las variaciones en la sección transversal y además permite que la extendedora funcione a una velocidad constante.



Fig: windrow elevator

9.2.3 Shuttle Buggy (Silo de transferencia)

En el año 1935 Harry Barber inició su invención, la primera extendedora. A partir de entonces la construcción de carreteras cambió desde entonces para

mejor. En la década de los 80 se empezó a estudiar el fallo del pavimento más en profundidad y se observó que una de las causas más importantes era la segregación del material. Este descubrimiento inspiró a encontrar un dispositivo que remezclara la mezcla caliente justo antes de la alimentación a la extendedora.

El resultado fue el primer silo de transferencia (Shuttle Buggy) que ROADTEC introdujo al mercado en el año 1989. Sin embargo, en aquel tiempo, la segregación térmica no era todavía objeto de estudio de la industria de pavimentación. Con la ayuda del Shuttle Buggy, la tecnología de pavimentación experimentó un cambio significativo reduciendo la segregación de material por primera vez.

Como anécdota, comentar que surgió como idea emplear las siglas UHT (Unidad de Homogeneización Total) para referirse al Shuttle Buggy. Aunque la idea expresada queda clara, estas siglas se asocian generalmente al sector de la alimentación, y más concretamente a la leche.

El silo de transferencia surge de adaptar el sistema windrow paving a camiones basculantes y a la colocación de un silo intermedio para almacenar la mezcla. De aquí la denominación de silo de transferencia de material, cuyas funciones principales consisten en almacenar la mezcla y realizar un amasado secundario mediante unos sinfines interiores.



Fig: silo de transferencia

Numerosos estudios han demostrado que el uso de dispositivos de transferencia de material minimiza o elimina las segregaciones, tanto térmicas como granulométricas, de forma que se mejora la durabilidad de la mezcla y se obtienen inicialmente unos valores de IRI elevados. Esto es debido a que estos equipos son capaces de efectuar un remezclado de manera que rehomogeneizan la mezcla térmica y granulométricamente antes de su

descarga a la extendedora a la vez que eliminar las posibles segregaciones de la descarga.

La exclusiva capacidad de rehomogenizar la mezcla asfáltica que distingue al silo móvil de los simples transferidores se basa en el sinfín del tipo “triple-pitch” (triple paso) situado en el interior de la tolva de almacenamiento propia del silo. Este diseño origina un flujo bidireccional en la mezcla que, al mismo tiempo que se desplaza transversalmente desde las paredes exteriores hacia el interior, incorpora material desde las capas superiores provocando un movimiento colectivo que garantiza un rápido y completo remezclado.

Los sinfines tipo “single-pitch” no remezclan ya que todos los discos tienen la misma inclinación y arrastran el material principalmente a los lados de la tolva del silo. Los espacios entre los discos de la barrena se llenan y la barrena sólo abre un túnel de paso a través del material por lo que no evita la segregación. En el silo de transferencia los sinfines del tipo “triple-pitch”, cuyos discos tienen inclinaciones distintas, proporcionan una acción de remezclado mucho más eficaz por lo que esta es la clave para lograr los mejores resultados de la mezcla.

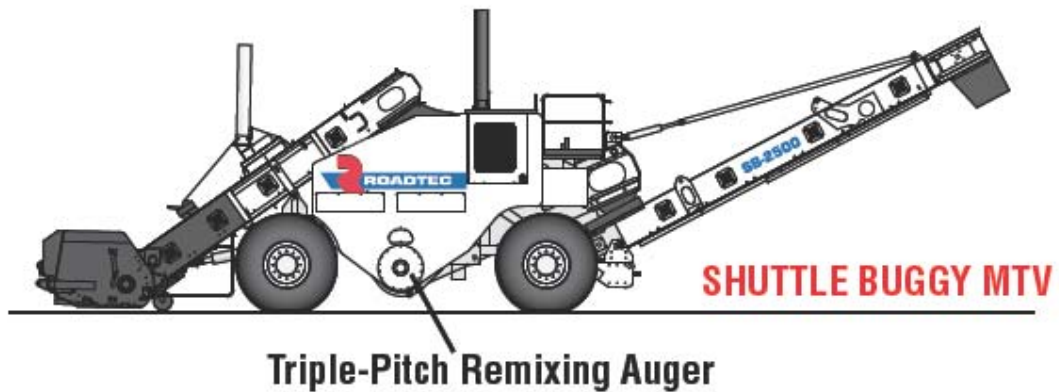


Fig: Sinfines tipo “triple-pitch” del silo de transferencia de material

Es evidente la dificultad de descarga de la mezcla del camión a la extendedora mientras ésta se mueve de modo continuo. El silo de transferencia recibe el aglomerado desde el camión y lo transfiere a la extendedora, evitando el contacto entre ambos y los frecuentes impactos en las maniobras de atraque que afectan a la consecución de una buena regularidad superficial.

El transporte desde la caja del camión hacia el silo y entre éste y la extendedora se realiza mediante cintas transportadoras para evitar la segregación del material. Este dispositivo de transferencia de material (MTV) tiene una capacidad de almacenaje de 20 a 25 toneladas de la mezcla.

Como se ha comentado anteriormente, la mezcla en el interior del silo de transferencia es mezclada constantemente por la barrena del tipo “triple-pitch” situada en la parte inferior de la tolva de almacenamiento. La acción de mezcla iguala las temperaturas y mezcla uniformemente las partículas pequeñas y grandes. La cinta transportadora se extiende desde la parte inferior y alimenta a la tolva de la extendedora. Las características de disipación de calor de la tolva de almacenamiento ayudan a combatir la segregación térmica.



La tolva delantera del silo permite la descarga rápida de los camiones. Una vibración en la placa inferior de la tolva evita la acumulación de material en la parte de arriba. Las ruedecillas de apoyo giratorias y resistentes bajo la tolva aseguran el movimiento suave. El flujo de material descargado a la cinta transportadora puede ser regulado por el ajuste de la posición de los deflectores accionados hidráulicamente en la entrada de la tolva.

Una vez la mezcla llega a la tolva de almacenamiento del silo, dos sinfines de paso variable en la parte inferior vuelven a mezclar el material a medida que la mezcla viaja hacia el transportador de la descarga trasera. El transportador de descarga trasera lleva el material hacia un transportador giratorio trasero. Este puede alimentar a la extendidora a una velocidad de 600 tph (544 toneladas métricas por hora). Los silos de transferencia pueden utilizarse también para proceder a la elevación del material asfáltico en cordón. Sólo es necesario retirar la tolva delantera y colocar una cabeza de recogida de material.



Fig: Cabeza de recogida de material asfáltico en cordón en el silo de transferencia

La extendedora tiene una tolva que permite almacenar aproximadamente 20 toneladas de material. El transportador del silo llena la tolva por su parte superior y posibilita situar sobre la tolva de la extendedora una tolva adicional que aumenta un volumen de mezcla acumulada frente a la regla de extendido.

La capacidad de almacenar una bañera completa en su silo interior hace que el tiempo de descarga de un camión se sitúe entre 1 y 2 minutos, quedando éste liberado para volver a planta. Conjuntamente con la tolva suplementaria situada en la extendedora, conforma un stock de aglomerado frente a la regla de extendido. Normalmente la utilización del silo de transferencia está asociada a la colocación de una tolva suplementaria en la extendedora, cuya aportación proporciona una capacidad total de 45 toneladas.

Con ello se garantiza un extendido a velocidad constante y sin paradas, así como una alimentación regular de mezcla frente a la regla. Todo ello colabora a la obtención de una buena rasante. Permite además descargar los camiones en puntos alejados de la extendedora. Al poder acarrear el contenido completo de un camión posibilita que éste descargue en cualquier punto evitando zonas donde pueda haber riesgo de colisión o vuelco al levantar la caja (por ejemplo, bajo tableros de puentes, tendidos eléctricos, túneles, curvas peraltadas, etc.). Al tratarse de una máquina sobre ruedas, la velocidad del Silo Móvil (14,5 km/h en desplazamiento y 4,8 km/h en operación) permite que estas maniobras no reduzcan la velocidad de avance del equipo de extendido.

A continuación se muestra en la figura la disposición de la tolva suplementaria de la extendedora.



Fig: tolva suplementaria de la extendedora

En la siguiente figura se muestra un silo de transferencia cargando la extendidora desde una línea adyacente. Si algún obstáculo, como barreras rígidas, líneas de referencia, aceras, riegos de adherencia, etc. dificultan el acarreo del aglomerado desde la traza a pavimentar, el transportador de descarga pivotante (110° en total; 55° a derecha o izquierda) del Silo Móvil permite alimentar la tolva de la extendidora desde una posición más ventajosa.

En caso de requerir trabajo manual en ciertos puntos, el silo de transferencia es capaz de dispensar el material de forma cuidadosa a los trabajadores exactamente donde lo necesitan porque la cinta transportadora se puede bajar y girar de lado a lado.

También ha permitido alimentar dos extendedoras simultáneamente en obras donde ello ha sido necesario. Las ventajas que ofrece en su aplicación en obras de ensanchamiento de calzada son también evidentes.

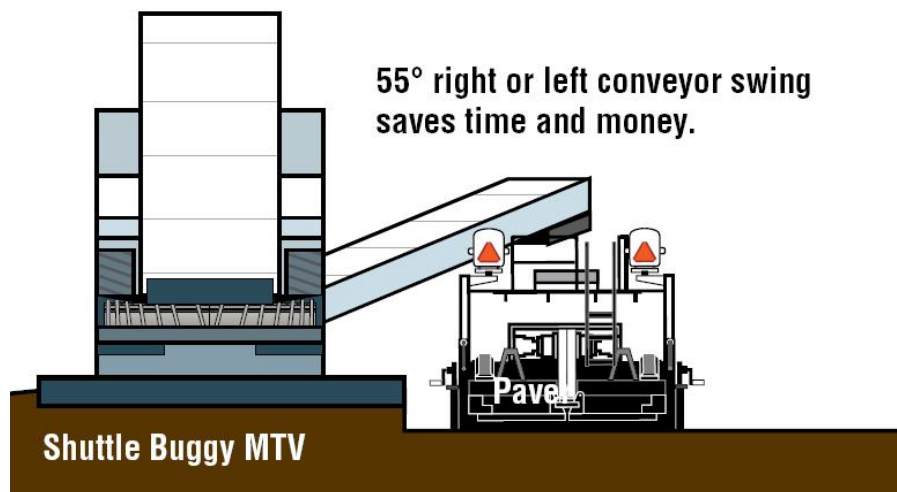


Fig: Shuttle Buggy trabajando en carril adyacente

El uso de un silo de transferencia de material permite a la extendidora funcionar de modo continuo, llevando a cabo una remezcla del material y usar camiones más grandes. Además, se elimina la acumulación de material grueso en los laterales de la tolva de la extendidora. La acumulación de material grueso y la descarga de las secciones laterales es una de las causas principales de segregaciones “final de camión”.

Esta máquina permitirá que los camiones descarguen a una velocidad de 1.000 tph (907 toneladas métricas por hora). Estos dispositivos han demostrado tener la capacidad de eliminar completamente la segregación de “final de camión” y aleatoria debido a la remezcla de material por los sinfines.

El Shuttle Buggy es verdaderamente un equipo que hace que la pavimentación sea menos delicada. Incluso cuando la extendidora y el Shuttle Buggy fueron

operados por cuadrillas de pavimentación inexpertas, se lograron muy buenos resultados. En esencia, hace que la operación sea menos delicada.

El empleo del Silo corrige así las segregaciones granulométricas y térmicas y asegura una perfecta homogeneidad de la mezcla, garantizando así que ésta alcance en todo punto el máximo de sus prestaciones y eliminando el efecto de “fin de camión”.

En resumen, el silo de transferencia asegura el remezclado de la mezcla y rehomogenización antes de la descarga a la extendedora, eliminando la segregación sufrida en la carga de camiones y durante el transporte. Su gran capacidad de almacenamiento asegura un avance de la extendedora a velocidad constante y, dado que la regla se mantiene en flotación sobre una mezcla totalmente homogénea, la obtención de una rasante perfectamente regular es una más de las ventajas asociadas al uso del silo de transferencia, minimizando los gastos derivados del estado del firme. Cuando se detiene la extendedora, la regla de extendido tiene una oportunidad para asentarse. La cabeza de la mezcla se enfría, creando un resalto en la capa cuando se vuelve a iniciar el movimiento de nuevo.

El objetivo principal del silo de transferencia es mantener la extendedora en movimiento continuo de tal forma que no sólo aumenta la eficiencia en la ejecución del pavimento sino que también contribuye a la calidad de la capa.

9.2.4 Ventajas derivadas de la aplicación de los dispositivos de transferencia de material

- Reducción de la segregación de las mezclas, especialmente la que se produce en los finales de camión.
- Reducción de las variaciones térmicas de la mezcla, eliminando las costras que se pueden haber formado durante el transporte e igualando su temperatura con el resto de la mezcla.
- Al trabajar en continuo la extendedora, sin paradas por cambio de camión, desaparecen las marcas en el pavimento debidas a las paradas.
- Al disponer de un almacenaje importante de mezcla, tampoco se para la extendedora aunque haya retrasos razonables en el transporte.
- Al no existir contacto directo entre el dispositivo de transferencia y la extendedora, no hay riesgo de golpes debidos a la entrada de los camiones en la tolva.
- Pueden trabajar desplazados lateralmente respecto a la extendedora.
- El tiempo de vaciado de los camiones es muy corto, ya que el ritmo de descarga es de unas 600 a 900 t/h. Puede permitir una reducción en el número de vehículos.
- Se puede aumentar el rendimiento del extendido, si se dispone de una planta de mayor producción.

9.3 EXTENDEDORA: PRECOMPACTACIÓN

La regla de la extendidora es flotante, y precompacta la capa mediante un támara, situado en la parte delantera de la regla. Las reglas de alta compactación pueden llevar doble támara delantero o uno o dos listones de presión tras la regla vibrante.

La precompactación obtenida depende del tipo de regla, espesor de capa, tipo y temperatura de la mezcla y velocidad de avance. Puede ser del 75 % en reglas poco eficientes, del 85 % en reglas buenas y superar el 90 % en las reglas de alta compactación.

Especialmente en capas gruesas, es fundamental que la precompactación sea alta, para obtener una regularidad superficial aceptable. Los operadores de las extendedoras tienen tendencia a reducir la vibración, ya que la máquina “se vuelve más incómoda y hace mucho ruido”.

9.4 DERRAMES DE MATERIAL DURANTE EL EXTENDIDO

Para el vertido directo desde camión, las áreas frías aparecen a unos 25- 30 pies inmediatamente después de la posición de la regla de extendido durante un cambio de camión. Por tanto, esta configuración camión-extendidora contribuye en gran medida a la formación de estas áreas. Los derrames de material como los que se muestran en la siguiente figura están causados típicamente por el extremo de la caja del camión que arrastra material del borde de la tolva.



Fig: Derrame de la mezcla

La regla de extendido de la extendidora tiende a extender tales derrames en la dirección de pavimentación. Antes de que el camión se retire de la extendidora

y evitar la acumulación de material sobre el borde delantero de la tolva debería llevarse a cabo la limpieza de la caja del camión para evitar la aparición de estas áreas frías. Las áreas frías en forma de “V” (abanico o mariposa) como se observa en las figuras son bastante comunes para los derrames.

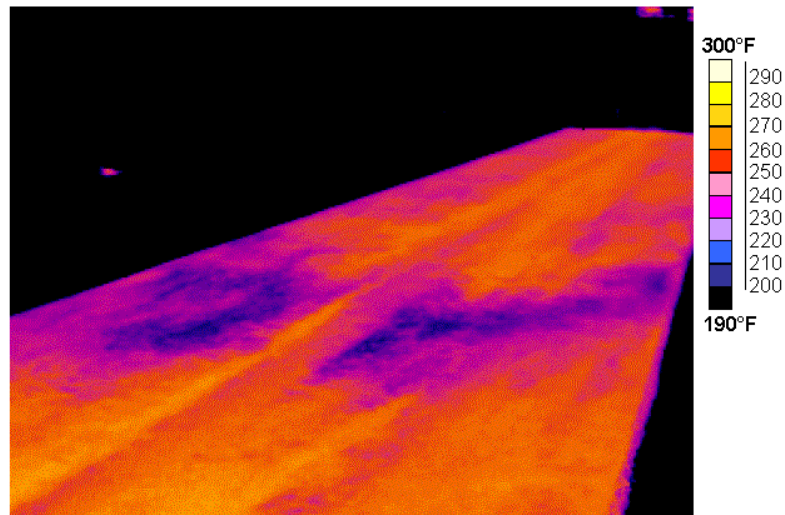


Fig: Área fría de derrame en forma de V

Los ángulos de las áreas frías indican que los sinfines de la regla de extendido transportaban material frío lateralmente en la dirección de avance de la extendidora. La fuente de material más frío está en el perímetro de la tolva de la extendidora. Cuando el camión se suelta de la extendidora sin interferir sobre el material del borde de la tolva, el siguiente camión golpeará esta mezcla del borde hacia la cinta transportadora de la extendidora. Este material presenta una temperatura significativamente más baja.

Si hay un retraso entre camiones y este material permanece en la superficie existente, este material continuará enfriándose antes de que la extendidora extienda la mezcla caliente sobre el mismo. Las condiciones climáticas más frías agravan este problema.

La aparición de las manchas frías en la capa inmediatamente después de la colocación tiende a crear áreas con densidades más bajas. Estas áreas de densidad más baja mostrarán daños debido al envejecimiento acelerado del betón debido al incremento de huecos de aire además del aumento de la permeabilidad del agua. Dependiendo del diferencial de temperatura y el área superficial de las zonas frías, éstas deberían ser visibles a simple vista después de completar la compactación.

Las áreas más frías típicamente muestran una textura más abierta antes y después de la compactación. Esta textura abierta se crea cuando la regla de la extendidora se topa con el material más frío. Dado que este material es más rígido no pueden rellenarse los huecos como si se tratase de un material caliente, de modo que no puede asumirse la densidad esperada. La eliminación

de estas zonas por completo no es posible sin el uso de un silo de transferencia de material para remezclar.

9.5 IMPORTANCIA DE LA EXTENSIÓN

Los firmes deben cumplir con una serie de características funcionales para proporcionar una superficie de rodadura segura y cómoda. Las principales características superficiales que los firmes deben reunir son una adecuada resistencia al deslizamiento, una buena regularidad superficial, un reducido nivel sonoro en la rodadura, unas propiedades de reflexión luminosa adecuadas para la conducción nocturna y un desagüe superficial rápido para evitar el hidroplaneo y las proyecciones de agua a otros vehículos.

La extensión y las operaciones previas a la misma inciden directamente en la calidad de la rodadura obtenida y, a su vez, en la seguridad, el confort y la durabilidad del pavimento. La construcción de pavimentos de baja regularidad es uno de los factores relacionados directamente con la longevidad del pavimento, por lo que es evidente que construir pavimentos inicialmente poco rugosos supone una mayor duración, un menor coste de mantenimiento y una reducción considerable de los costes de usuario.

Estudios llevados a cabo en el AASHTO Road Test demostraron que el 95% de la serviciabilidad del pavimento se controla a través de la rugosidad de la superficie de rodadura. La rugosidad afecta a los vehículos en movimiento y al deterioro de los mismos. La rugosidad inicial se asegura durante las etapas constructivas del pavimento, en cada capa colocada en cada operación de extendido. Por tanto, son fundamentales las reglas de buena práctica en la ejecución del nuevo pavimento.

CAPÍTULO 10

COMPACTACIÓN

10 COMPACTACIÓN

Los efectos perjudiciales de las bajas temperaturas de compactación y la segregación granulométrica han sido documentados durante los últimos cuarenta años. Las temperaturas más bajas de compactación están directamente relacionadas con el aumento en el contenido de huecos de aire, los cuales disminuyen la resistencia del pavimento. Incluso con un diseño perfecto de la mezcla, si la mezcla no está correctamente compactada, el producto final no durará el tiempo previsto.

Las tareas de compactación logran que la mezcla llegue a la densidad óptima requerida. Se recomienda que la extendidora produzca la máxima precompactación considerando en lo posible alcanzar cifras que superen el 90%. Precompactar es conveniente no solo porque se reduce el número de pasadas sino también porque se consigue una mejor regularidad de la superficie.

La compactación de una mezcla bituminosa en caliente tiene por objetivo la reducción del volumen de huecos de aire y el reacomodamiento de las partículas minerales a fin de obtener una mezcla transitable y durable.

La reducción del porcentaje de huecos de aire en una mezcla produce un aumento de la densidad, la cual está directamente relacionada con la resistencia. En definitiva, el porcentaje de huecos en mezcla es fundamental para lograr la máxima durabilidad del pavimento.

Los equipos de compactación son casi siempre rodillos tandem vibratorios. En la primera pasada el rodillo delantero no produce vibración y el rodillo trasero avanza vibrando. La segunda pasada se realiza marcha atrás y los dos rodillos avanzan sin vibrar. Posteriormente se pasa el rodillo estático de neumáticos para cerrar y lograr una buena apariencia superficial de la mezcla. Puesto que hay diversas formas de compactar, se debe ejecutar siempre un tramo de prueba, definiendo el procedimiento de compactación para cada capa, y que lo deben conocer perfectamente todos los operadores del tajo.

10.1 IMPORTANCIA DE LA COMPACTACIÓN

Las causas del deterioro en un pavimento asfáltico tienen relación con la densidad alcanzada de la capa o con un inadecuado empleo o regulación de los sistemas de compactación [11]. La densidad determina las características mecánicas y la durabilidad de la mezcla. Un pavimento que presente áreas con densidades fuera de especificaciones presentará daños prematuros. Estas zonas de baja densidad pueden ser susceptibles de una densificación posterior evolutiva bajo las cargas del tráfico, cuyo resultado conduce a una degradación de la regularidad superficial y aumento de las cargas dinámicas.

El volumen de aire en las mezclas asfálticas es de gran importancia dado que tiene un gran efecto sobre el comportamiento inicial y a largo plazo del pavimento. Como regla general, por cada aumento del 1% de huecos en una mezcla convencional aproximadamente se pierde un 10% de la vida en servicio del pavimento (Linden et al, 1989).

Roberts et al (1996) establecen que las mezclas densas no deben exceder del 8% de huecos in situ ni debajo del 3% durante su vida de servicio. Los huecos de aire de una mezcla compactada que resultan muy elevados o muy reducidos pueden causar una reducción significativa de la vida en servicio del pavimento.

Se definen unos huecos de aire óptimos, para los cuales la mezcla proporciona unas buenas características estructurales y funcionales, y unos huecos de aire pésimos para los cuales la mezcla pone en riesgo su durabilidad. Por ejemplo, para una mezcla bituminosa en caliente densa los huecos de aire óptimos en general se ubican entre el 3% y el 5%. Con un porcentaje de huecos menores al 2% y mayores al 8% se consideran huecos de aire pésimos dado que para

un porcentaje del 2%, la mezcla resulta inestable ante variaciones de tráfico y del clima —deformaciones permanentes, exudación, etc.— mientras que por encima del 8% la mezcla resulta permeable al agua y puede terminar en la desintegración de la misma.

El contenido de huecos de la mezcla determina buena parte de las patologías que se presentan en el pavimento. La compactación de las mezclas pretende no sólo alcanzar la densidad dentro del rango adecuado sino que también evitar que se produzcan alteraciones de la regularidad superficial del pavimento.

10.2 FACTORES Y VARIABLES A TENER EN CUENTA EN LA COMPACTACIÓN

La compactación de las mezclas bituminosas en caliente viene influida por numerosos factores: constructivos, geométricos, logísticos, medio ambiente, propiedades de la mezcla, etc. De todos los factores que intervienen en el proceso de compactación los constructivos son los más controlables.

Las variables de compactación que deben necesariamente ser respetadas son las secuencias y número de rodillos, la velocidad de los mismos y el número de pasadas sobre un área determinada. El éxito en la compactación se basa en el arte de dominar dichas variables en función del tipo de mezcla, de las capas estructurales y de la climatología presente en el momento de ejecución (velocidad del viento, humedad ambiente, radiación solar, etc.).

La vibración y compactación de la regla de extendido son esenciales para un primer acomodamiento de las partículas, para luego completarla con la compactación. La cantidad de compactación inicial así lograda varía con el modelo de la extendidora y depende de la mezcla, la temperatura y el espesor de capa.

CAPÍTULO 11

CONTROL DE CALIDAD

11 CONTROL DE CALIDAD

El control de calidad en la producción de mezclas bituminosas en caliente es fundamental en el proceso de fabricación en planta [12]. La elaboración de la mezcla de acuerdo con las especificaciones requeridas, la calidad del pavimento construido y los incentivos para el contratista dependen en gran parte de un plan de optimización de procesos que involucra la ejecución apropiada de los procedimientos de control de calidad.

La calidad de la mezcla se puede realizar en el momento de la carga del camión en planta, en las tolvas de almacenamiento o dentro del camión cuando se encuentra plenamente cargado.

El control de la temperatura de la mezcla bituminosa en caliente es importante para controlar su calidad. Una operación visual puede muchas veces detectar si la mezcla se encuentra o no dentro del rango apropiado de temperaturas. Cuando la mezcla presenta una emisión de humo azul dentro del camión, usualmente nos indica que hay un sobrecalentamiento. Si la temperatura de la mezcla es demasiado baja, la mezcla parece inerte y apelmazada y presenta

una distribución no uniforme de asfalto. Un pico anormal en la disposición de la mezcla sobre el camión puede indicar un calentamiento bajo de ésta.

Normalmente, la temperatura de la mezcla se toma dentro del camión. La forma más común de determinar la temperatura es con termómetros especiales que se insertan en la mezcla como mínimo 15 cm. Debido a que los medidores de temperatura detectan sólo el calor de la superficie, las lecturas no son precisas para el material que se encuentra en la mitad de la carga. Se puede utilizar el termómetro infrarrojo tipo pistola, el cual mide el calor reflejado desde la superficie. Los medidores térmicos infrarrojos pueden dar mediciones rápidas pero deben usarse con precaución en la determinación del cumplimiento de la especificación y deben ser calibrados frecuentemente.

Un pico anormal en la carga de la mezcla también puede ser indicio de que el contenido de ligante es demasiado bajo. Por otra parte, si la mezcla se esparce muy rápidamente dentro de la caja del camión puede ser indicativo de una excesiva cantidad de asfalto.

El programa de QA (Quality Assurance) del WSDOT para proyectos de pavimentación no recoge la importancia de las áreas de baja densidad en el pavimento acabado y estas áreas de baja densidad pueden afectar significativamente al comportamiento y vida del pavimento.

11.1 CONTROL DE RECEPCIÓN DE LA UNIDAD TERMINADA: MEJORA DEL IRI

11.1.1 Técnica tradicional mejorada: empleo de sistemas de nivelación de última generación

Alrededor de 1969 comenzaron a utilizarse tímidamente los equipos automáticos de nivelación en las extendedoras, en sustitución del control manual que hacían los “torniqueteros”. Aunque su fiabilidad inicial dejaba algo que desear, especialmente el sistema de control de pendiente transversal, en pocos años mejoró y se implantó esta forma de control de nivelación

A finales de la década de los 80, aparecieron los sensores de ultrasonidos, como alternativa a los palpadores electromecánicos. Su primera aplicación fue para automatizar el control de la cuchilla de las motoniveladoras.

El extendido tomando como referencia de cota la capa previamente extendida, con las tradicionales reglas situadas en el exterior de la regla de la extendidora, tiene el inconveniente de que al ser los anchos de las capas sensiblemente iguales, puede tomar la referencia sobre una zona de nivelación dudosa. Por esta razón, suele colocarse esta referencia solamente en el eje, cuando se trabaja con dos máquinas o en dos pasadas.

Sin embargo, cuando se trabaja en ancho completo con una sola máquina, el extendido con reglas laterales no tiene buena solución. Para evitar este problema, desde hace ya algunos años se ha popularizado el sistema de reglas largas articuladas.

Este conjunto nivelador, de una longitud total de unos 18 metros, funciona con dos tipos de apoyos: uno anterior, que desliza sobre la capa existente, a través de una viga de unos 9 m, dotada de 12 patines articulados; el otro, posterior, consta de otra viga de unos 6 m. y provista de 8 ruedas dobles que se apoyan sobre la capa recién extendida. Dos barras unen estas dos vigas a un pivote central situado sobre la plancha de la extendidora, o en uno de los brazos de arrastre, formando una "tijera" donde se sitúa un palpador o un sensor de ultrasonidos. Al subir o bajar la plancha, se abre o cierra la "tijera", siendo detectado este movimiento por el palpador, que envía la correspondiente señal de corrección.



Fig: reglas largas articuladas

De esta manera se obtiene una referencia promedio entre la rasante de la superficie subyacente y la recién extendida. Aparte de la ventaja ya citada de poder ir por dentro de la capa extendida, la nivelación de la capa que proporciona es excelente, cumpliendo sin problemas los resultados exigidos de la regularidad superficial.

Los requerimientos de mejores regularidades superficiales han hecho preciso la incorporación de un sistema de nivelación innovador que garantizara la obtención de valores del IRI por debajo de 1.5, según la reglamentación actual, y que hiciera frente a futuras exigencias mayores.

Una variante más moderna de la regla larga articulada consiste en una viga ligera de aluminio en la que se sitúan tres elementos sensores de ultrasonidos. Dos de ellos toman la referencia del suelo, es decir, de la capa anterior, y el

tercero de la capa recién extendida. Aunque existe una cierta vibración, el sistema la elimina, tomando la lectura media de distancias desde la viga a la referencia, sea esta el suelo o la capa extendida.

El resultado obtenido es comparable al de la regla articulada, con la ventaja de que no tiene contacto físico con el suelo ni con la capa extendida, eliminando los errores debidos a suciedad en el suelo (que no debería existir nunca) o material caliente que se pega a las ruedas.

Otra ventaja interesante respecto a las reglas articuladas es su facilidad de transporte y colocación en la extendidora, ya que se trata de una viga extensible muy ligera.



Fig: reglas largas con sensores de ultrasonidos

El control de calidad debe orientarse más a establecer controles preventivos de modo que las prácticas y técnicas aplicadas en el proceso de fabricación y puesta en obra eliminen o reduzcan el riesgo de su aparición.

CAPÍTULO 12

INCENTIVOS Y SANCIONES

12 INCENTIVOS Y SANCIONES

En los EEUU, se gastan cerca de 15 billones de dólares anualmente para mantener y construir carreteras para satisfacer los volúmenes y cargas cada vez mayores de tráfico. Las agencias de transporte con escaso presupuesto intentan exprimir el valor máximo de la inversión de la construcción de carreteras. La identificación de la segregación térmica como un parámetro clave que afecta a la vida en servicio, la eficacia probada de la combinación del análisis termográfico y la utilización de un dispositivo de transferencia de material para contrarrestar el problema es un resultado importante.

El fallo prematuro de las carreteras debido a las causas que se remontan en los métodos de construcción se ha convertido en un problema creciente que se está agregando significativamente a los presupuestos de mantenimiento de carreteras.

La reducción en los diferenciales de temperatura en las mezclas durante la operación de colocación debería reducir el número de irregularidades y

consecuentemente, disminuir las sanciones impuestas a los contratistas. El resultado incluye la mejora de la durabilidad y la regularidad del pavimento acabado, cuyo beneficio incide directamente sobre el usuario.

En el año 2000, el Transportation Research Board (TRB) público una recomendación en la que cualquier lote con evidencias de segregación debe ser pagado en base a las áreas segregadas ya que estas áreas controlan la totalidad de la vida del lote. La recomendación del TRB consistía en que si los niveles bajos de segregación están presentes dentro del lote, el factor de pago debe ser del 90%, en consonancia con un factor de pago para un pavimento con un 2% de aumento de los huecos de aire. Los niveles medios de segregación equivalen a pagar un factor del 80%, en consonancia con unos factores de pago para un incremento de huecos de aire del 4% y lotes con niveles elevados de segregación deben ser eliminados y reemplazados”.

12.1 DEFINICIÓN DE LOS NIVELES DE SEGREGACIÓN

En el año 2002 el Department of Transportation de New Jersey (NJDOT) desarrolló una tecnología para cuantificar la segregación de los pavimentos de mezcla bituminosa en caliente [14].

Como se ha comentado anteriormente el ROSANv parece ser el sistema más avanzado, con respecto a los algoritmos desarrollados, para determinar la textura en el pavimento. Sin embargo, en la realización de este estudio el DOT de New Jersey disponía sólo del dispositivo ARAN para la medición de la textura.

Los niveles de segregación para este estudio se definieron en base a los ratios de textura TR (*texture ratio*). Estos ratios fueron determinados en base a la detección y observación de los diferentes niveles de segregación. Para la definición de estos ratios de textura TR, el DOT de New Jersey se basó en el artículo 441 del NCHRP publicado por el Transportation Research Board [1] en el que se definían estos ratios de textura como la relación entre las texturas de las áreas segregadas respecto de las no-segregadas.

Los ratios de textura han sido utilizados en numerosos estudios para detectar y caracterizar la segregación en mezclas densas.

- Segregación baja: tendrá un ratio de textura entre 1.16 y 1.56. Generalmente, esto deberá ser consistente con un contenido de huecos hasta un 4%.
- Segregación media: tendrá un ratio de textura entre el 1.57 y el 2.09. Generalmente, esto deberá ser consistente con un contenido de huecos entre el 3 y el 6%.

- Segregación elevada: tendrá un ratio de textura superior a 2.09. Generalmente, esto deberá ser consistente con un contenido de huecos superior al 5%.

En resumen, los ratios de textura menores que 1.15 indican que no hay segregación, entre 1.16 y 1.56 están asociados con un nivel bajo de segregación, entre 1.57 y 2.09 están asociados con un nivel medio de segregación y, finalmente, ratios por encima de 2.09 indican niveles de segregación elevados.

12.2 ÍNDICE AREA PARA LA ACEPTACIÓN DEL LOTE

Cuando se observa la segregación en un pavimento, se debe tener una herramienta para identificar el nivel de segregación y el efecto de la segregación en la vida del pavimento. Generalmente, la extensión y severidad de la segregación determina la vida del pavimento y su comportamiento con el tiempo. Cuando la segregación excede un cierto nivel, se recomienda rechazar la sección para reducir el elevado mantenimiento futuro y los costes de rehabilitación. La metodología propuesta para determinar la aceptación o rechazo se discute en este apartado. El Departamento de Transporte de New Jersey define un índice llamado AREA que se relaciona tanto con el nivel como con la extensión de la segregación.

El índice AREA se define para determinar el efecto global de los niveles de severidad diferentes en una sección de pavimento observada. El porcentaje de área segregada de cada nivel de segregación se multiplica por unos coeficientes para determinar dicho índice.

$$AREA = A_{LOW} \cdot w_{LOW} + A_{MEDIUM} \cdot w_{MEDIUM} + A_{HIGH} \cdot w_{HIGH}$$

Siendo:

A_{LOW} : Porcentaje de área de segregación baja

A_{MEDIUM} : Porcentaje de área de segregación media

A_{HIGH} : Porcentaje de área de segregación elevada

Los coeficientes que multiplican estos porcentajes de áreas, se definen en la siguiente tabla para cada nivel de segregación:

Segregation Level	Weighing Factor
Low	1.00 (=W _{low})
Medium	1.43 (=W _{medium})
High	2.50 (=W _{high})

Tabla: coeficientes sugeridos para los distintos niveles de segregación

12.3 ÁREA DE CADA NIVEL DE SEGREGACIÓN

Después de determinar el nivel de segregación, la clase de segregación se determinada como se presenta en la siguiente tabla:

Segregation Class	Longitudinal Extent (mm)
1	Less than or equal to 200
2	Greater than 200 and less than or equal to 400
3	Greater than 400 and less than or equal to 800
4	Greater than 800 and less than or equal to 1600
5	Greater than 1600

Tabla: Clases de segregación

Para las áreas del pavimento de segregación continua, se toma el nivel del material de calidad más pobre presente en el área. La extensión de cada nivel de segregación en cada lote se calcula como un porcentaje tal y como se presenta en la siguiente ecuación. El área para cada tipo de segregación se calcula considerando que el área segregada se extiende en la totalidad del tercio del ancho de carril.

$$A_i = \frac{\sum_{n=1}^3 \sum_{k=1}^N l_{ink}}{A_{TOTAL}} \times \frac{W}{3} \times 100$$

Siendo:

A_i : porcentaje área de segregación en cada nivel (i = bajo, medio o alto)

l : longitud de un área segregada en metros

W : ancho del área de ensayo en metros

A_{total} : Área total del lote en metros cuadrados

n : considerado como la tercera parte del área de ensayo (línea de ensayo)

k : Número de identificación del área segregada

N : número total de áreas segregadas en cada línea de ensayo

Se define un valor umbral para la aceptación o no aceptación del lote del pavimento basado en el índice AREA. Una sección de pavimento es aceptada sólo si el índice AREA cae por debajo de 45.0. Si la segregación está presente en un lote aceptado basado en su índice AREA, deben ser evaluados los factores de ajuste de pago para los diferentes niveles de segregación. Si el índice AREA de cualquier lote es mayor de 45.0, el lote debe ser rechazado y el contratista está obligado a reconstruir la sección de pavimento.

12.4 FACTORES DE AJUSTE DE PAGO PROPUESTOS

El índice AREA se define sobre las secciones de pavimento identificadas para la aceptación o no aceptación basada en el nivel y la extensión de la segregación. Los factores de ajuste de pago apropiados deben ser utilizados para tener en cuenta la pérdida de la vida del pavimento debido a la

segregación. La pérdida de vida del pavimento debida a segregación depende del nivel y la extensión de la segregación presente en la sección de pavimento particular. Por lo tanto, el factor de ajuste de pago debe ser definido en base al nivel y la extensión de la segregación. Dado que el índice AREA tiene en cuenta el nivel y la extensión de la segregación, los factores de ajuste de pago pueden ser definidos en base al índice AREA. Los siguientes factores de ajuste de pago son propuestos para las secciones de pavimento con diferentes niveles de segregación basados en el índice AREA.

Table 8: Proposed Pay-adjustment Factors

Range of the AREA Index	Pay Adjustment Factor
0 – 5.0	105
5.0 – 15.0	95
15.0 – 25.0	85
25.0 – 35.0	65
35.0 – 45.0	25

Si la segregación está presente en una sección de pavimento aceptado sobre la base de su índice AREA, los factores de ajuste de pago propuestos se definen para determinar la reducción de incentivos por la pérdida de vida del pavimento debido a la segregación.

Combinando el nivel de segregación y la extensión de cada nivel de segregación, se desarrolló un índice AREA para determinar la aceptación o no aceptación de la sección de un pavimento. Los lotes de pavimento son aceptados sólo si el índice AREA es inferior a 45.0.

12.5 NORMATIVA ESPAÑOLA

La normativa española relativa a la regularidad superficial de las distintas capas bituminosas de un firme, está recogida en los artículos 542 (Mezclas bituminosas en caliente tipo hormigón bituminoso) y 543 (Mezclas bituminosas para capas de rodadura. Mezclas drenantes y discontinuas) del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes del PG-3. En los apartados 542.7.3 y 543.7.3 de los citados artículos se establece que el IRI deberá cumplir lo prescrito en las tablas 542.15 (firmes de nueva construcción), 542.16 (firmes rehabilitados estructuralmente), 543.13 (firmes de nueva construcción) y 543.14 (firmes rehabilitados estructuralmente) respectivamente. A continuación se muestran estas tablas:

Porcentaje de Kilómetros	Tipo de capa		
	Rodadura e intermedia		Otras capas bituminosas
	Tipo de vía		
	Calzada de autopistas y autovías	Resto de vías	
50	< 1,5	< 1,5	< 2,0
80	< 1,8	< 2,0	< 2,5
100	< 2,0	< 2,5	< 3,0

Tabla 542.15: Índice de regularidad internacional (IRI) (dm/hm) para firmes de nueva construcción

Porcentaje de Kilómetros	Tipo de vía			
	Calzada de autopistas y autovías		Resto de vías	
	Espesor de recrecimiento (cm)			
	> 10	≤10	> 10	≤10
50	< 1,5	< 1,5	< 1,5	< 2,0
80	< 1,8	< 2,0	< 2,0	< 2,5
100	< 2,0	< 2,5	< 2,5	< 3,0

Tabla 542.16: Índice de regularidad internacional (IRI) (dm/hm) para firmes rehabilitados estructuralmente

Porcentaje de Kilómetros	Tipo de vía	
	Calzada de autopistas y autovías	Resto de vías
50	< 1,5	< 1,5
80	< 1,8	< 2,0
100	< 2,0	< 2,5

Tabla 543.13: Índice de regularidad internacional (IRI) (dm/hm) para firmes de nueva construcción

Porcentaje de Kilómetros	Tipo de vía			
	Calzada de autopistas y autovías		Resto de vías	
	Espesor de recrecimiento (cm)			
	> 10	≤10	> 10	≤10
50	< 1,5	< 1,5	< 1,5	< 2,0
80	< 1,8	< 2,0	< 2,0	< 2,5
100	< 2,0	< 2,5	< 2,5	< 3,0

Tabla 543.14: Índice de regularidad internacional (IRI) (dm/hm) para firmes rehabilitados estructuralmente

Los citados Artículos 542 y 543 establecen la forma de evaluar la regularidad superficial de las capas de mezcla bituminosa construidas. Considera como lote, que se acepta o rechaza en bloque, al menor que resulte de aplicar los tres criterios siguientes a una sola capa de mezcla bituminosa en caliente:

- Quinientos metros (500 m) de calzada
- Tres mil quinientos metros (3.500 m²) cuadrados de calzada
- La fracción construida diariamente

La medida de la regularidad superficial se realizará a partir de las 24 horas de construida la capa analizada y siempre antes de la extensión de la capa siguiente. Se determinará el valor del IRI según la NLT-330, calculando un solo valor del IRI para cada hectómetro de perfil auscultado. Este valor se asignará a dicho hectómetro, realizándose el mismo proceso con el resto de hectómetros del tramo considerado como lote según la definición anterior.

Si los resultados de la regularidad superficial de la capa acabada exceden de los límites establecidos en las tablas anteriormente citadas, se procederá de la siguiente manera:

Artículo 542: para las mezclas bituminosas en caliente tipo hormigón bituminoso

Si los resultados de la regularidad superficial de la capa acabada exceden los límites establecidos en las tablas 542.15 y 542.16 en más del 10% de la longitud del tramo controlado o de la longitud total de la obra para capas de rodadura, se extenderá una nueva capa de mezcla bituminosa con el espesor que determine el Director de las Obras por cuenta del Contratista.

Si los resultados de la regularidad superficial de la capa acabada exceden los límites establecidos en las tablas 542.15 y 542.16 en menos del 10% de la longitud del tramo controlado o de la longitud total de la obra para capas de rodadura, se corregirán los defectos de regularidad superficial mediante

fresado por cuenta del Contratista. La localización de dichos defectos se hará sobre los perfiles longitudinales obtenidos en la auscultación para la determinación de la regularidad superficial.

Artículo 543: para las mezclas bituminosas para capas de rodadura. Mezclas drenantes y discontinuas

Si los resultados de la regularidad superficial de la capa acabada exceden los límites establecidos en las tablas 543.13 y 543.14, se demolerá el lote, se retirará a vertedero y se extenderá una nueva capa por cuenta del Contratista.

12.5.1 Incentivos

Los mencionados artículos 542 y 543 del PG-3, modificados en la Orden Circular 24/2008, han introducido una novedad referente a la posibilidad de incrementar el abono de la mezcla bituminosa utilizada en la capa de rodadura, en concreto un 5%, si se mejora la calidad de la regularidad superficial. Para poder efectuar este abono deben cumplirse las exigencias mínimas de regularidad superficial que marcan las especificaciones.

El criterio para realizar este incentivo, en el caso de mezclas tipo hormigón bituminoso (para las drenantes y discontinuas es análogo) es el siguiente: si los resultados de la regularidad superficial de capa de rodadura en tramos uniformes y continuos, con longitudes superiores a dos kilómetros (2 Km) mejoran los límites establecidos en las tablas 542.15 y 542.16 y cumplen los valores de la tabla 542.20a o 542.20b, según corresponda, se podrá incrementar el abono de la mezcla bituminosa según lo indicado en el apartado de 542.11 de medición y abono.

Porcentaje de Kilómetros	Tipo de vía	
	Calzada de autopistas y autovías	Resto de vías
50	< 1,0	< 1,0
80	< 1,2	< 1,5
100	< 1,5	< 2,0

Tabla 542.20a: Índice de regularidad internacional (IRI) (dm/hm) para firmes de nueva construcción, con posibilidad de abono adicional

Porcentaje de Kilómetros	Tipo de vía		
	Calzada de autopistas y autovías		Resto de vías
	Espesor de recrecimiento (cm)		
	> 10	≤10	
50	< 1,0	< 1,0	< 1,5
80	< 1,2	< 1,5	< 1,5
100	< 1,5	< 1,8	< 2,0

Tabla 542.20b: Índice de regularidad internacional (IRI) (dm/hm) para firmes rehabilitados estructuralmente, con posibilidad de abono adicional

En algunas Comunidades Autónomas se está trabajando en la medición y evaluación del IRI en sus carreteras, tanto en obras de nueva construcción como en obras de acondicionamiento y refuerzo. La Junta de Andalucía para las obras de rehabilitación estructural de firme, en función del espesor de refuerzo exige unos valores mínimos del IRI en la capa de rodadura del pavimento existente y que se va a reforzar, para conseguir los valores finales que establece y que son, en general análogos a los definidos en los Artículos 542 y 543 del PG-3. Para conseguir estos valores mínimos del IRI en la superficie antigua, establece la necesidad de ejecutar algún tratamiento previo (capa de regularización, microfresado, etc) adicionales al refuerzo necesario.

CAPÍTULO 13

ESTUDIO EXPERIMENTAL

13 INTRODUCCIÓN

Para realizar el estudio experimental la presente tesina incluye una parte de los trabajos que el laboratorio de Caminos de la UPC está realizando para el proyecto FENIX.

El laboratorio de Caminos de la UPC ha trabajado con testigos extraídos de zonas en las que se detectó una temperatura superficial de la mezcla por debajo de lo esperado. Estos testigos sirvieron para determinar las propiedades mecánicas de la mezcla extendida mediante ensayos mecánicos de laboratorio.

13.1 PLANTEAMIENTO

En la presente tesina se analiza una mezcla del tipo G-20 en la que se observa como afecta la segregación térmica producida durante el extendido a las propiedades de la mezcla bituminosa. Las características de la mezcla proporcionadas por la planta de asfalto se pueden observar en el Anejo II de la presente tesina.

Mediante el uso de termografía infrarroja se controló la uniformidad de la temperatura superficial de las mezclas durante el extendido. En aquellas zonas en las se detectaron segregaciones térmicas se realizó un sondeo de densidades mediante el aparato PQI y se procedió a la extracción de testigos, tanto dentro como fuera de la zona que presentaba el diferencial de temperatura, diferenciando para cada zona un área fría y un área caliente.

La obtención de testigos se llevó a cabo en tres zonas distintas con diferencial térmico acusado:

- Zona 1: Se corresponde con una zona aislada de material más frío



Fig 1: zona 1

- Zonas 2 y 3: se corresponden con zonas de parada de la extendedora



Fig 2: zona 2



Fig 3: zona 3

Para caracterizar la mezcla se preparó una batería de ensayos tales que permitieran obtener información sobre sus propiedades mecánicas. Las características a determinar fueron la cohesión y el módulo y para ello se emplearon los ensayos de tracción indirecta y módulo de rigidez.

A continuación se va a realizar una breve descripción de los ensayos realizados.

13.2 ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA

El ensayo consiste en cargar una muestra cilíndrica, igual a la definida para el ensayo Marshall, con una carga de compresión diametral a lo largo de dos generatrices opuestas (Figura 1a.). Esta configuración de carga, que puede ser sencilla o repetida, provoca un esfuerzo de tracción relativamente uniforme en todo el diámetro del plano de carga vertical y esta tracción es la que agota la probeta y desencadena la rotura en el plano diametral.

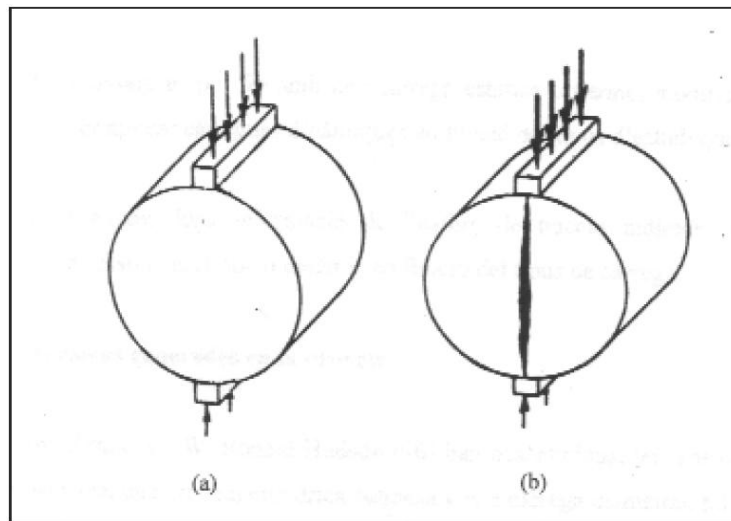


Figura 1: Configuración de la carga (a) y rotura del ensayo de tracción indirecta (b).

El parámetro a medir es la carga de rotura de la probeta, tal como se ilustra en la Figura 2. También se puede determinar el desplazamiento vertical y la deformación horizontal del diámetro de la probeta durante la realización del ensayo si se dispone de los sistemas necesarios para medirlos. El procedimiento se usa tanto para probetas fabricadas en laboratorio como para testigos extraídos del pavimento.

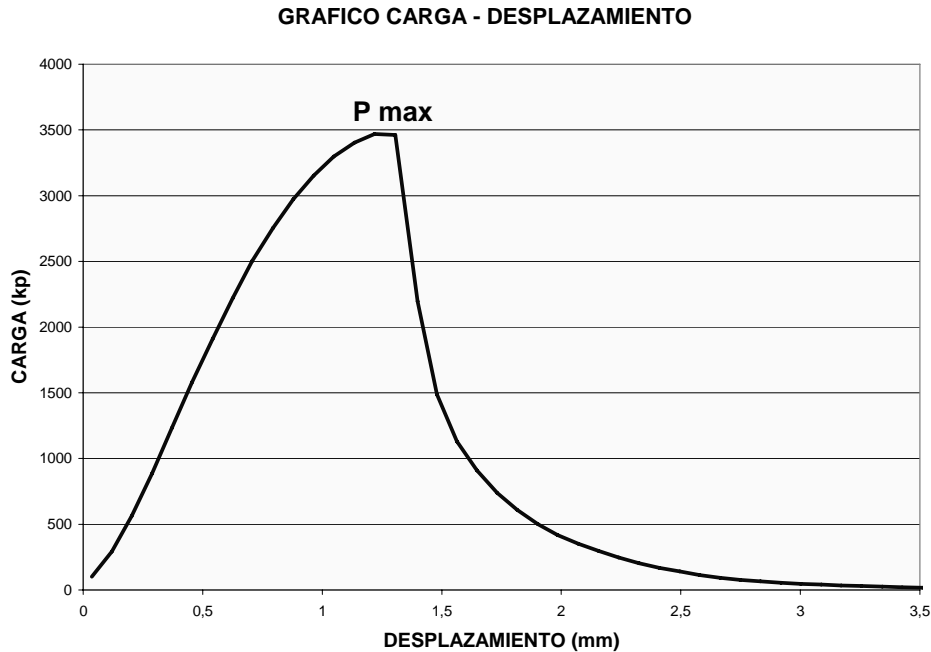


Figura 2: Curva carga-desplazamiento resultante del ensayo de tracción indirecta.

Para realizar el ensayo a carga estática se ha utilizado la norma europea UNE-EN 12697-23 Determinación de la resistencia a la tracción indirecta de probetas bituminosas a 15°C y a una velocidad de 50 mm/min.

13.3 ENSAYO DE DETERMINACIÓN DEL MÓDULO RESILIENTE MEDIANTE COMPRESIÓN DIAMETRAL

El término módulo resiliente fue definido como la magnitud del esfuerzo desviador repetido en compresión triaxial dividido entre la deformación axial recuperable.

En el ensayo de módulo resiliente por compresión diametral, se obtienen dos módulos resilientes, uno instantáneo y otro total, debido a que se registran dos deformaciones durante el ciclo de carga, una al finalizar el pulso de carga aplicado (deformación instantánea) y la otra al terminar el período de relajación (deformación total).

Se presenta a continuación un esquema del ensayo de compresión diametral para la determinación del módulo resiliente con el montaje del aparato de medición de deformación, Figura 3, y la configuración de la carga aplicada y la deformación resultante, Figura 4.

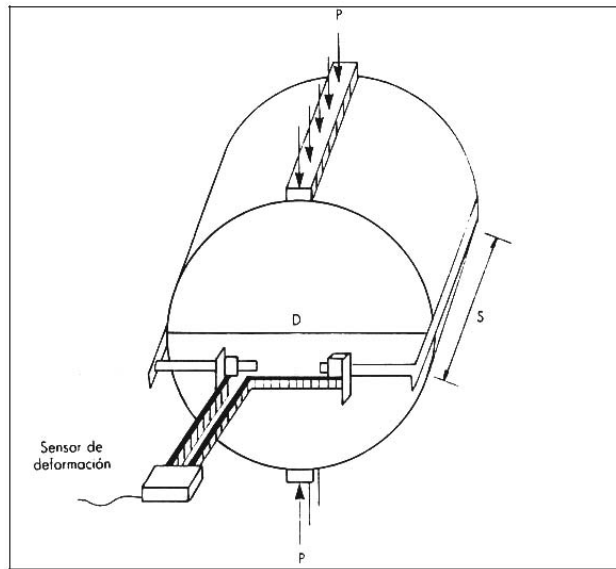


Figura 3: Ensayo de compresión diametral y montaje del aparato

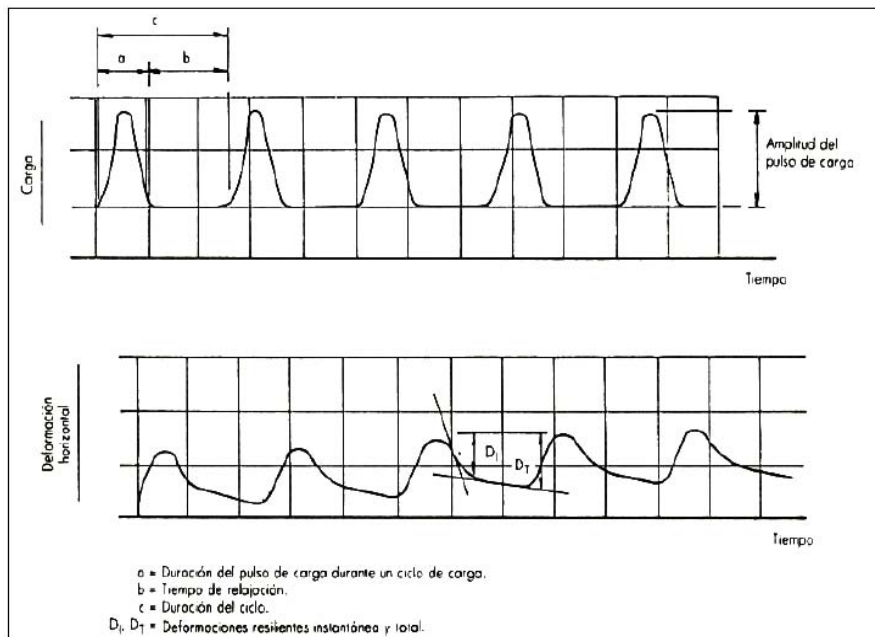


Figura 4: Funciones de carga y deformación versus tiempo

Para realizar el ensayo a carga dinámica se ha utilizado la Norma de ensayo NLT- 360/91 Determinación del módulo resiliente, en mezclas bituminosas, mediante el ensayo de compresión diametral.

13.4 ENSAYO DE DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE RIGIDEZ A TRACCIÓN INDIRECTA

El módulo de rigidez de los materiales bituminosos es una de las propiedades más importantes a la hora de caracterizar mecánicamente estos materiales. Esta magnitud es fundamentalmente la relación existente entre la deformación que sufre una material al aplicarle una fuerza determinada y la propia fuerza. El montaje experimental del ensayo es el que se muestra en las Figura 5 y 6.

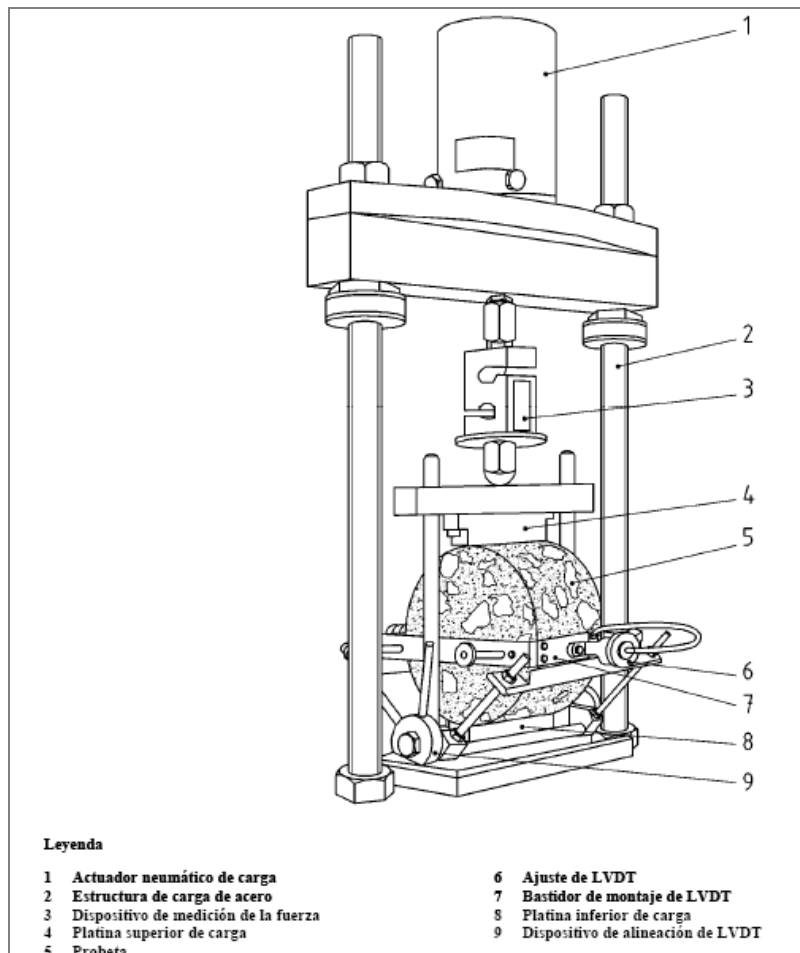


Figura 5: Montaje experimental del ensayo de determinación del módulo de rigidez a tracción indirecta

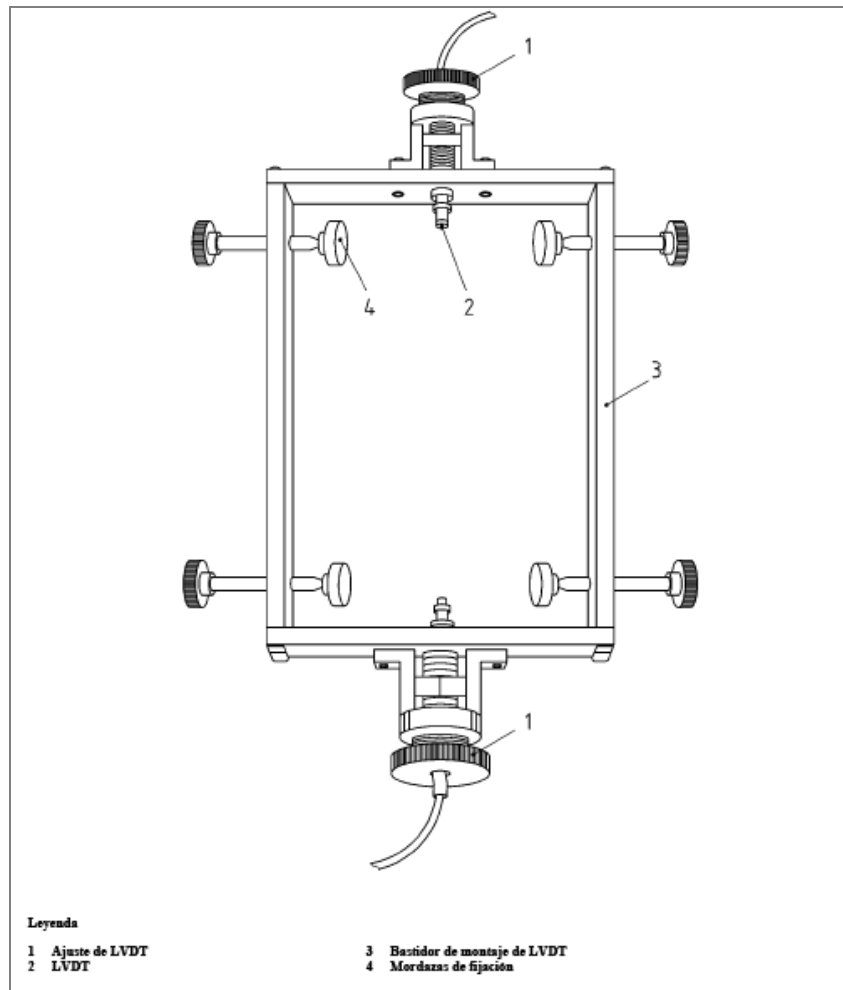


Figura 6: Dispositivo de medición de la deformación diametral horizontal

Las muestras ensayadas deben ser cilíndricas de diámetro cercano a 101.6 mm y cuya altura puede estar comprendida entre 50 mm y 70 mm. Estas muestras pueden ser probetas fabricadas en laboratorio o testigos extraídos del pavimento.

El procedimiento de ensayo consiste en aplicar un pulso de carga de forma semisenoidal seguida de un periodo de reposo (Figura 7), y registrar la deformación horizontal que sufre la muestra.

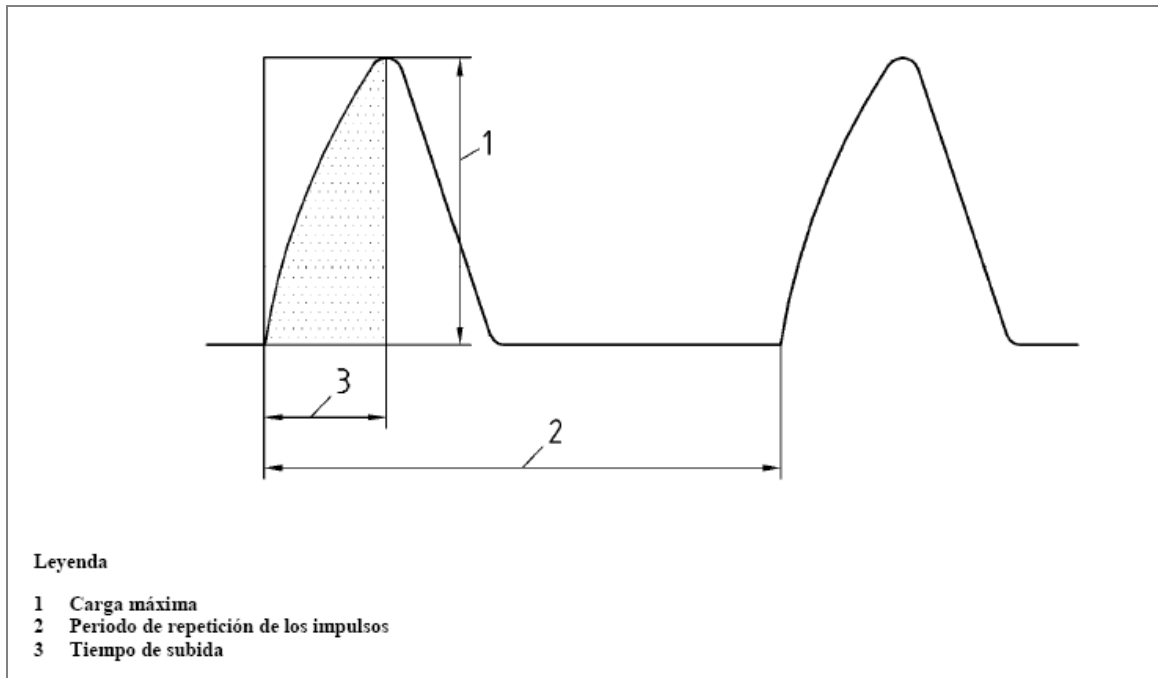


Figura 7: Forma del impulso de carga, mostrando el tiempo de subida y la carga máxima

Con los valores registrados y empleando la ecuación 4 es posible determinar el módulo de rigidez del material que compone la muestra ensayada.

$$S_m = \frac{F(\nu + 0,27)}{z \cdot h} \quad (\text{Ec. 1})$$

siendo:

S_m : Módulo de rigidez.

F: Valor máximo de la carga vertical aplicada

ν : Coeficiente de Poisson.

H: Espesor de la probeta.

Z: Amplitud de la deformación horizontal.

Sobre cada muestra se aplican un total de 10 pulsos de carga, 5 a lo largo de un diámetro y 5 más después hacer rotar la probeta 90° grados. En total se obtienen 10 valores para el módulo rigidez y se considera como resultado final el promedio de estos.

Para realizar el ensayo se ha utilizado la norma europea UNE-EN 12697-26:2006 Anexo D.

13.5 RESULTADOS OBTENIDOS

A continuación se van a mostrar los resultados obtenidos para las densidades de los testigos en las distintas zonas de estudio. El objetivo de este estudio ha sido determinar la influencia de las segregaciones térmicas del extendido en las propiedades mecánicas y la densidad final de la mezcla.

13.5.1 Densidad

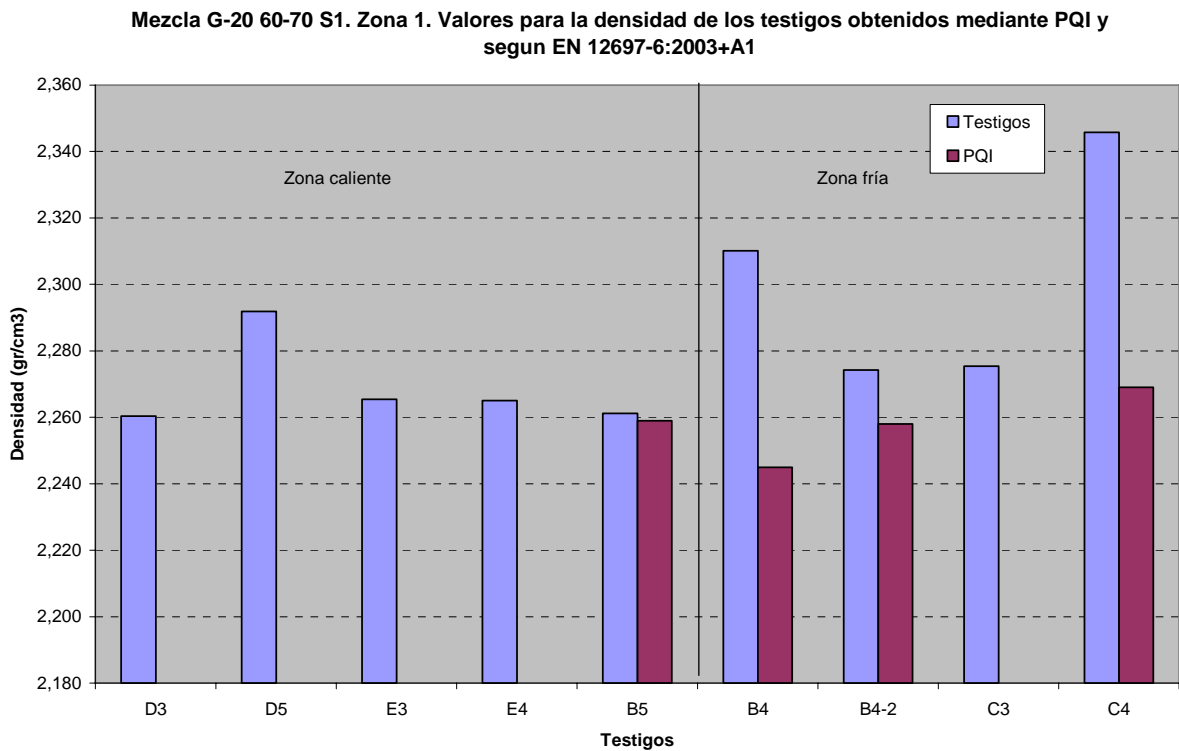


Gráfico 1: Densidad de los testigos procedentes de la zona 1.

Mezcla G-20 60-70 S1. Zona 2. Valores para la densidad de los testigos obtenidos mediante PQI y según EN 12697-6:2003+A1

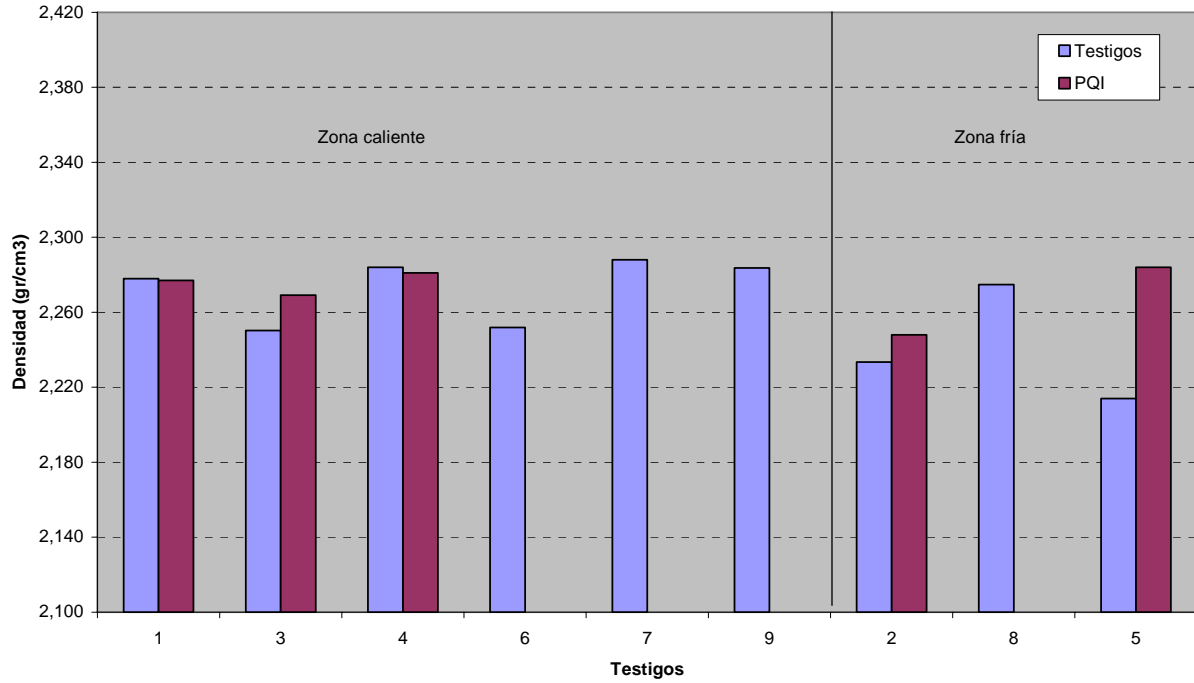


Gráfico 2: Densidad de los testigos procedentes de la zona 2

Mezcla G-20 60-70 S1. Zona 3. Valores para la densidad de los testigos obtenidos mediante PQI y según EN 12697-6:2003+A1

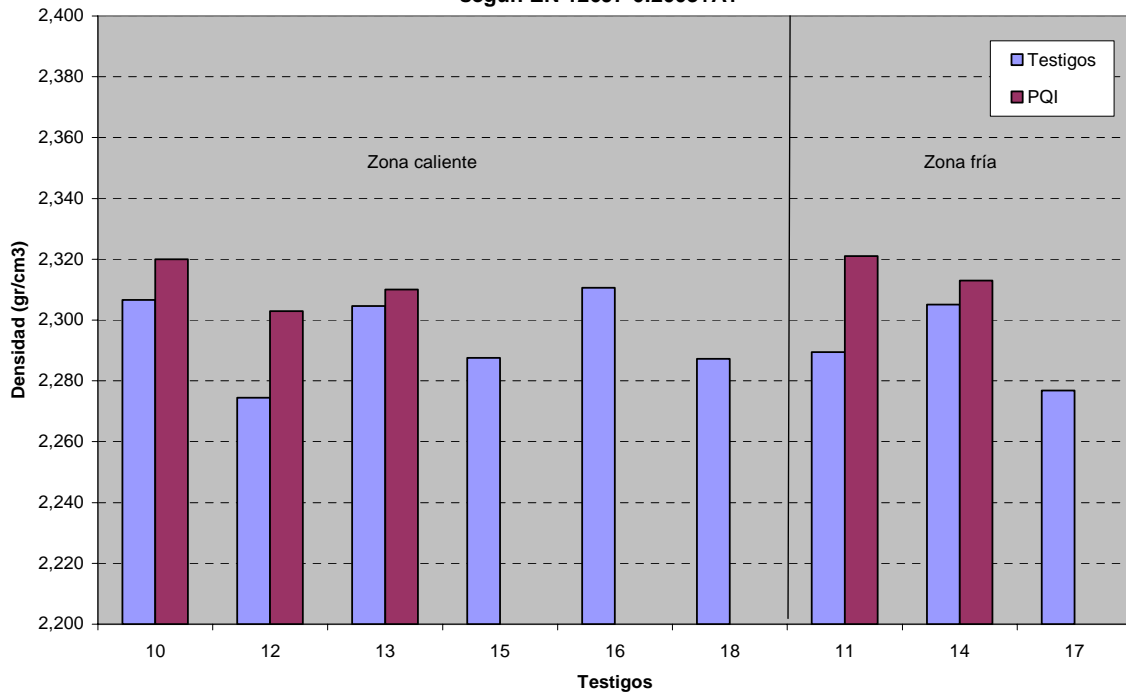


Gráfico 3: Densidad de los testigos procedentes de la zona 3

En los gráficos anteriores se muestran los valores obtenidos para la densidad de los testigos procedentes de la mezcla de estudio. Como se muestra en los gráficos anteriores no se observaron diferencias significativas entre las áreas compactadas a temperatura normal de extendido y las áreas segregadas térmicamente. Con la excepción de dos testigos pertenecientes al área fría de la primera zona estudiada, los valores aportados por el PQI han sido cercanos a los valores obtenidos mediante el cálculo de la densidad de los testigos según la norma EN 12697-6:2003+A1.

13.5.2 Ensayo a tracción indirecta

Para el ensayo a tracción indirecta sólo se han proporcionado los datos correspondientes para la zona 1.

Testigos G-20 60-70 S1. Zona 1. Área caliente.
Resistencia a tracción indirecta en seco a 15°C.

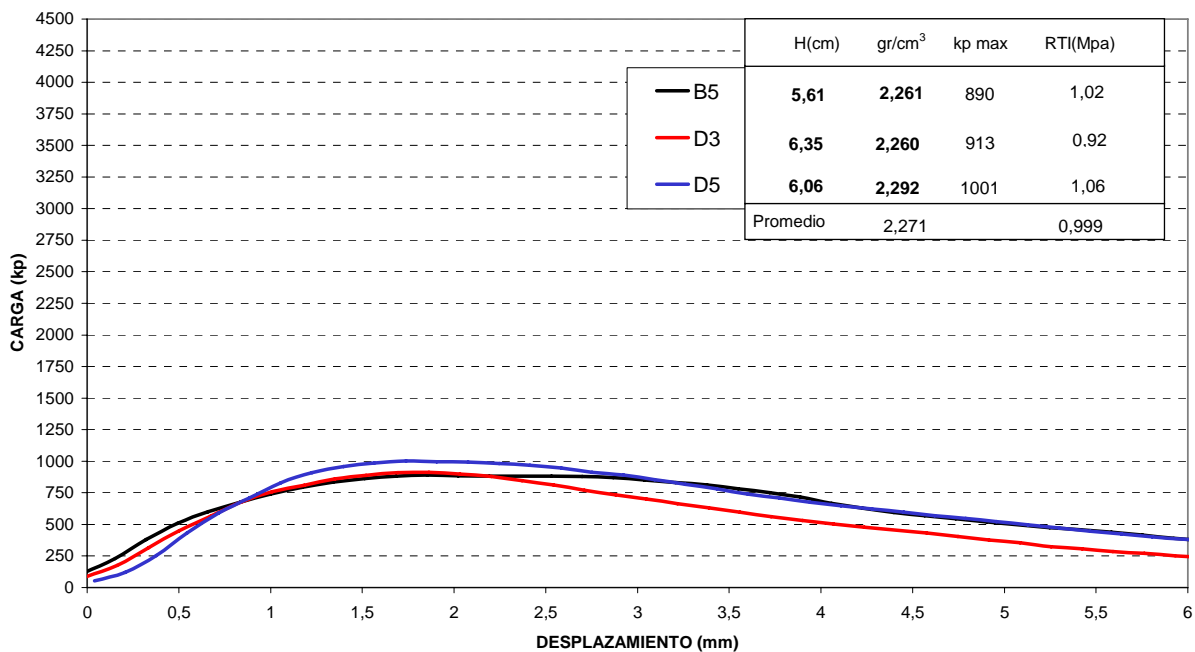


Gráfico 4: Gráfica carga – desplazamiento obtenida en el ensayo de tracción indirecta en seco a 15°C. Mezcla G-20 60-70 S1. Zona 1. Área caliente.

Testigos G-20 60-70 S1. Zona 1. Área fría.
Resistencia a tracción indirecta en seco a 15°C.

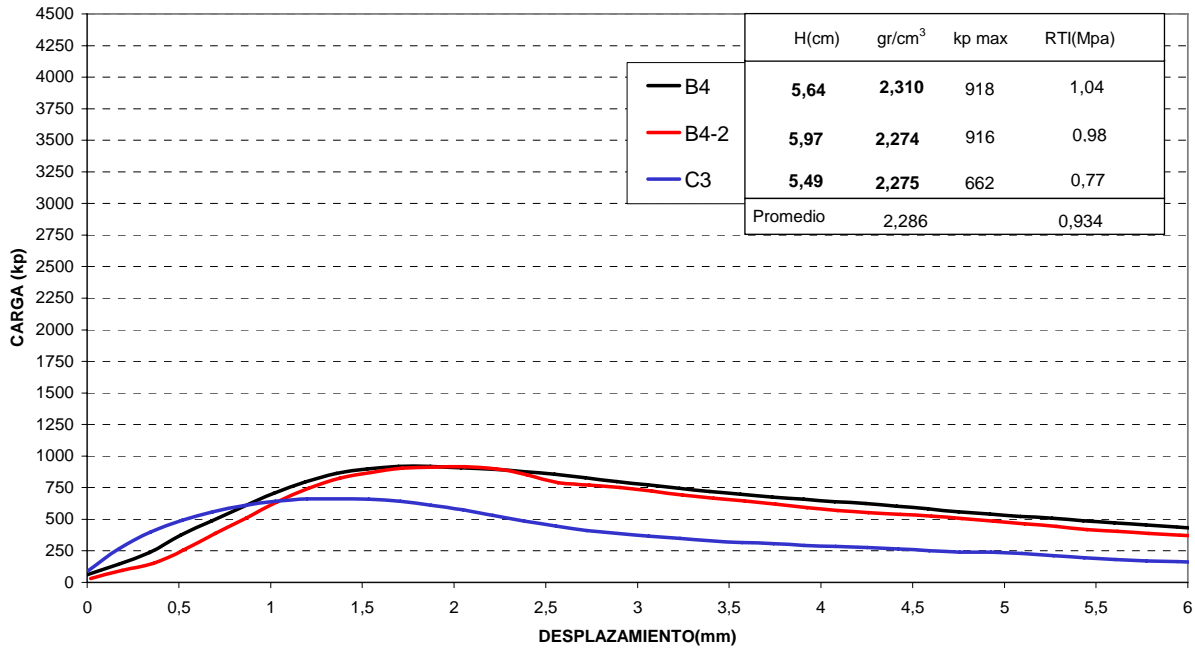


Gráfico 5: Gráfica carga – desplazamiento obtenida en el ensayo de tracción indirecta en seco a 15°C. Mezcla G-20 60-70 S1. Zona 1. Área fría.

De forma análoga a los valores de densidad de los testigos, las diferencias en el comportamiento de los testigos pertenecientes a las áreas con diferentes temperaturas superficiales han sido en general mínimas para la mezcla G-20. Se observa que para uno de los testigos del área fría se ha mostrado un valor ligeramente inferior para la resistencia a tracción indirecta.

13.5.3 Ensayo de determinación del módulo resiliente mediante compresión diametral

A continuación se muestran los resultados obtenidos para cada uno de los testigos en las distintas zonas.

Testigos G-20 60-70 S1. Módulo Resiliente Total.
Frecuencia: 0,33 (Hz). Temperatura: 20°C.

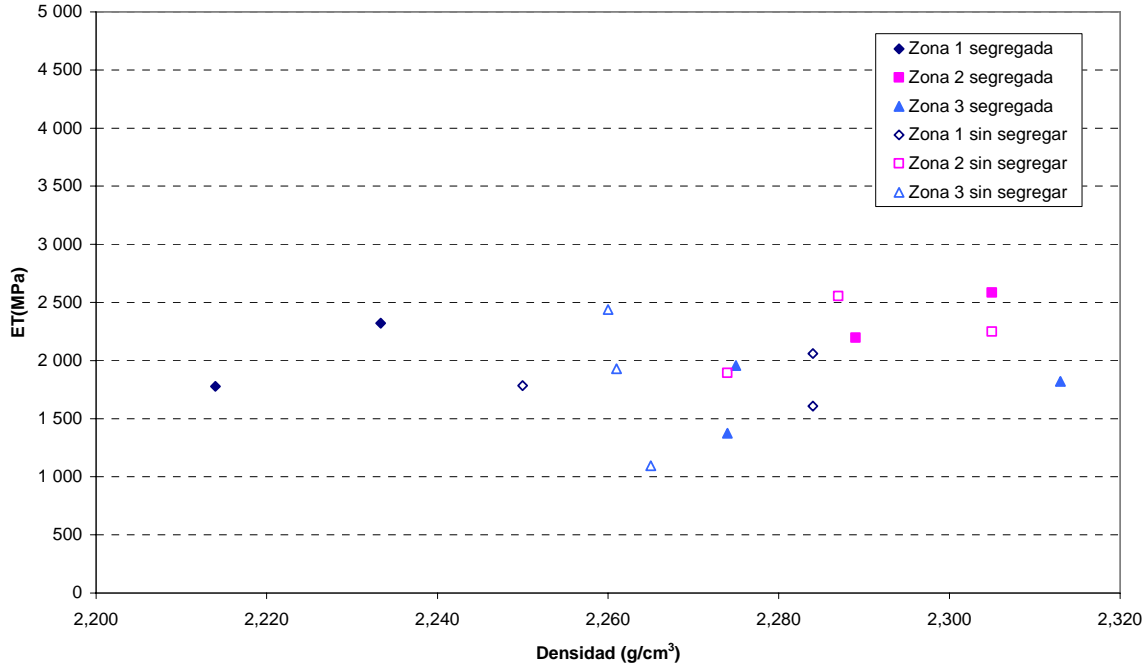


Gráfico 6: Representación gráfica del módulo resiliente total para los testigos procedentes de la mezcla G-20 60-70 S1

Del gráfico anterior no es posible diferenciar los testigos según si proceden de un área caliente o de un área fría. El análisis de los resultados obtenidos para el módulo lleva a la conclusión que para las mezclas G-20 apenas se ven afectadas por la temperatura de compactación.

CAPÍTULO 14

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

14 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

14.1 RECOMENDACIONES SOBRE LOS MÉTODOS DE IDENTIFICACIÓN

En general no existen sistemas que permitan determinar y cuantificar los niveles de segregación durante la puesta en obra por lo que se recomienda la utilización conjunta de varios métodos.

En primer lugar, para localizar las áreas segregadas se recomienda el uso de una cámara de termografía de infrarrojos para determinar el diferencial de temperatura en esas áreas.

La medición de la textura de la superficie se determina mediante el sistema ROSANv para obtener los cambios en la textura de la superficie con varios niveles de segregación. El dispositivo nuclear evalúa el cambio en la densidad y el contenido de asfalto a través del contenido de hidrógeno.

14.2 RECOMENDACIONES SOBRE EL TRANSPORTE DE LA MEZCLA

El transporte de la mezcla puede tener un gran impacto en la calidad y eficiencia de la construcción del pavimento. Las características de la mezcla tales como la temperatura de entrega, la segregación granulométrica y los diferenciales de temperatura están determinadas en gran medida por las prácticas de transporte. Las consideraciones clave en el transporte de la mezcla son:

- limpieza y lubricación de la caja del camión
- técnicas de carga de la mezcla adecuadas con el objeto de prevenir la segregación granulométrica
- distancia de recorrido y temperatura de la mezcla
- descarga de la mezcla oportuna y descarga de la mezcla correcta

Si está correctamente gestionado, el transporte de la mezcla puede mover con éxito la mezcla desde la planta de producción al sitio de pavimentación con muy poco cambio o nada en las características de la mezcla.

Las reglas de buena práctica juegan un papel principal en el proceso de pavimentación. Incluso con diferenciales de temperatura elevados, las reglas de buena práctica pueden eliminar estos diferenciales de densidad elevados. Por el contrario una mala ejecución del pavimento puede causar diferencias de densidad elevadas en zonas en las que los diferenciales de temperatura no son elevados.

14.3 RECOMENDACIONES EN EL USO DE LA EXTENDEDORA

Aun cuando se haya procesado material con éxito en planta y se haya cargado de forma uniforme en el camión, todavía es posible que se produzca la segregación en la extendedora. El uso incorrecto de la extendedora puede causar diversos grados de segregación. A continuación se ofrecen sugerencias que deben tomarse en cuenta si se produce segregación en la extendedora:

No vaciar la tolva completamente entre una carga del camión y la siguiente. El árido grueso tiende a rodar hacia cada lado de la caja del camión y por ello rueda directamente hacia las secciones laterales de la tolva. Al dejar cierta cantidad de material en la tolva, el material grueso tiene mayor probabilidad de mezclarse con el material fino antes de ser vaciado sobre el pavimento.

Descargar las secciones laterales de la tolva sólo según sea necesario para nivelar la carga de material en la tolva. La descarga elimina las hendiduras ("valles") en el material, reduciendo al mínimo la rodadura del material durante la descarga. Esto permite que la compuerta trasera del camión se abra completamente para llenar la tolva con la carga.

Descargar el camión de manera que se inunde la tolva. Con la tolva lo más llena posible, el material tiende a salir justo debajo del camión y se reduce la tendencia a la rodadura del árido al descargarlo en la tolva.

Abrir las compuertas de la tolva hasta donde sea posible para asegurarse que los sinfines se llenen. Si se cierran las compuertas y se alimentan los sinfines con una cantidad insuficiente de mezcla, el material más fino caerá directamente sobre el suelo, haciendo que los sinfines transporten el material más grueso hacia los lados.

Hacer funcionar la extendedora del modo más continuo posible. Arrancar y parar sólo según sea necesario. Ajustar la velocidad de la extendedora de modo correspondiente a la tasa de producción de la planta.

Hacer funcionar los sinfines de modo continuo. La velocidad de los sinfines debe ajustarse de modo que se obtenga un flujo continuo y lento de material. Los sinfines que funcionan a velocidades altas tienen que arrancarse y pararse continuamente, lo cual contribuye a la segregación en la extendedora. Si los sinfines funcionan a velocidad excesiva, el centro del pavimento tendrá deficiencia de material, lo cual generalmente produce un pavimento áspero. La instalación de deflectores evita que los materiales gruesos rueden delante de la caja de engranajes de sinfines y que causen segregación por la línea central. Si se instalan los deflectores, los sinfines entonces desvían el material de modo uniforme hacia el centro. Si los bordes exteriores de los sinfines de la extendedora tienen una cantidad insuficiente de material, se pueden producir franjas ásperas en los bordes exteriores del pavimento puesto que el árido grueso rueda hacia el exterior.

En las extendedoras más nuevas se han llevado a cabo dos modificaciones importantes para reducir la segregación y eliminar la necesidad de instalar deflectores:

1. El espacio entre las cintas transportadoras en el centro de la tolva es menor.
2. Las ruedas de las orugas están más cerca de los sinfines.

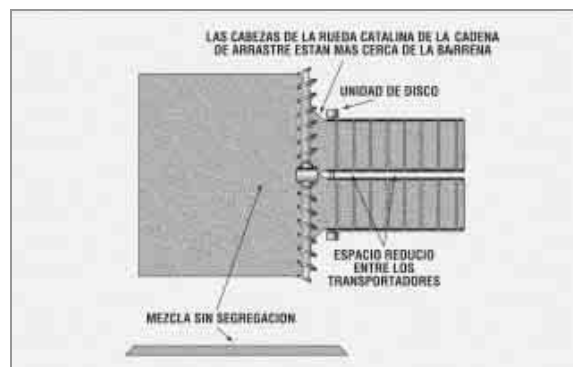


Fig: Modificaciones en las nuevas extendedoras

14.4 PLANIFICACIÓN DE LAS OPERACIONES DE EXTENDIDO Y COMPACTACIÓN

Las operaciones de extensión y compactación de todas los tipos de mezclas asfálticas en caliente responden a un fin común: alcanzar un equilibrio volumétrico entre sus distintos componentes de manera de que los huecos de aire totales aseguren un comportamiento en servicio satisfactorio.

La planificación de las operaciones de extendido y compactación puede sintetizarse como la organización de las tareas propias de estas operaciones en función de los objetivos de proyecto, especificaciones técnicas y las reglas de buena práctica. El planeamiento de estas tareas debe ser suficientemente flexible de manera que se vayan incorporando mejoras desde el primer día de trabajo hasta establecer un buen programa de tareas coordinadas.

La planificación de las tareas se realiza principalmente por las siguientes razones: para reducir o eliminar la incertidumbre o el riesgo de terminar con un producto no aceptable, para mejorar la eficiencia de las operaciones y para proporcionar una intervención continua de los procesos y el control de calidad de los mismos. Los procesos de extendido y compactación deben controlados exhaustivamente en todo momento. En definitiva, todo proceso de compactación tiene por objetivo establecer un porcentaje de huecos de aire uniforme.

La planificación comienza en la planta asfáltica pasando por el ciclo de transporte de material, el extendido y la compactación con una secuencia detallada y ordenada. Una buena planificación contribuye a la reducción o eliminación de las zonas segregadas.

14.5 RELACIÓN ESPESOR DE CAPA Y TAMAÑO MÁXIMO DE ÁRIDO

Una de las cuestiones fundamentales en la aplicación de una mezcla asfáltica es determinar el espesor mínimo necesario para alcanzar una adecuada compactación bajo un esfuerzo de compactación razonable. En muchos casos el empleo de mezclas delgadas en espesores menores a tres veces su tamaño máximo de árido ha conllevado serias dificultades para alcanzar un porcentaje de huecos de aire adecuado al tipo de mezcla empleada.

Los resultados de una reciente investigación llevada a cabo por el NCAT (National Center for Asphalt Technology, Brown et al 2005) indicaron un alto impacto en la relación espesor de capa/ tamaño máximo de árido (e/t_{ma}) en la compactabilidad de las mezclas. Para una mejor compactabilidad recomiendan una relación e/t_{ma} de por lo menos 3 para mezclas finas y 4 para mezclas gruesas. Capas de menor espesor se pueden todavía compactar, pero requieren de un mayor esfuerzo de compactación para obtener una

densificación adecuada. En mezclas delgadas (4 cm o menos) es más difícil obtener la densidad y porcentaje de huecos adecuados debido al enfriamiento rápido de las mismas. Por tanto, para capas delgadas es muy importante que los rodillos estén bien próximos a la extendedora y respetando la relación e/tma señalada anteriormente. En el NCAT han comprobado que una capa de 2,5 cm de espesor se enfría dos veces más rápido que una de 4 cm.

14.6 NOVEDADES EN LA COMPACTACIÓN

Como novedades en la compactación de las MBC se pueden mencionar: los rodillos de alta vibración, la compactación oscilatoria, la compactación inteligente y la denominada Smart Drug Technology SDT.

La alta vibración se refiere a rodillos con hasta 4000 rpm que aparecieron por primera vez en 1999, de esta manera los equipos pueden compactar a mayor velocidad sin causar irregularidades superficiales. Son equipos de mayor potencia además de brindar mayor frecuencia de impactos, por lo cual el operario debe estar bien entrenado a fin de evitar daños a la mezcla a compactar y de alcanzar resultados óptimos.

La compactación por oscilación está siendo introducida en el mercado de los EEUU y permite mantener un contacto permanente con la capa asfáltica para obtener una compactación más efectiva. El rodillo oscilante tiene dos masas excéntricas rotando en la misma dirección causando un movimiento alrededor del eje del rodillo. Se transmiten fuerzas horizontales al pavimento en lugar de las fuerzas verticales de los rodillos vibratorios. Una ventaja de estos rodillos es que no se produce ni sobrecompactación ni rotura de partículas dejando una rodadura excelente.

En la compactación inteligente se incorporan sistemas de monitoreo continuo de temperatura y densidad durante el proceso. Miden la temperatura debajo del rodillo mientras verifican la reacción del mismo sobre la superficie que se está densificando.

En la tecnología SDT se establecen unidades con ocho amplitudes diferentes cada una de las cuales es ajustada automáticamente a la máxima frecuencia para la amplitud especificada. Como resultado se obtiene en una sola máquina altas frecuencias con baja amplitud apropiado para capas delgadas, y bajas frecuencias con alta amplitud para capas espesas y mezclas rígidas o poco trabajables.

Los altos valores de precompactación proporcionados por algunos modelos de extendedoras atenúa los efectos de los diferenciales térmicos.

14.7 CONCLUSIONES DEL ESTUDIO EXPERIMENTAL

En base a los resultados obtenidos se desprenden las siguientes más significativas:

- Para la obtención de las densidades in situ se ha utilizado el método PQI, cuyos valores obtenidos han sido notablemente cercanos a las densidades de los testigos.
- Los diferenciales térmicos detectados durante el proceso de extendido de la mezcla no han sido suficientemente significativos como para afectar a las propiedades mecánicas ni las densidades de la mezclas tipo G.
- Las mezclas tipo G no reflejan los diferenciales térmicos superficiales ya que tanto la densidad como sus propiedades mecánicas apenas se ven afectadas por la temperatura de compactación.

El análisis de los resultados obtenidos lleva a la conclusión que las mezclas tipo G no ven afectadas sus propiedades por la presencia de segregaciones térmicas durante el extendido. Este tipo de mezclas presentan más huecos y por lo tanto menos energía de compactación es necesaria para obtener una mezcla de calidad.

Por lo tanto, se concluye que las mezclas tipo G no reflejan la influencia de estos diferenciales térmicos durante el extendido de la mezcla.

14.8 CONCLUSIONES

La segregación se ha acabado convirtiendo en un problema persistente en las mezclas bituminosas en caliente y es problema que disminuye la vida útil de los firmes ya que conduce a una disminución de la densidad y un aumento de la permeabilidad.

En general no existen sistemas que permitan determinar y cuantificar los niveles de segregación durante la puesta en obra por lo que se recomienda la utilización conjunta de varios métodos. La utilización de determinados procedimientos de construcción o “reglas de buena práctica” demuestra que elimina o reduce las segregaciones y sus efectos negativos sobre el firme.

La extensión y la compactación de las mezclas bituminosas en caliente termina siendo un problema volumétrico en el que el porcentaje de huecos debe alcanzar un balance inicial que asegure un comportamiento en servicio adecuado desde la puesta en servicio hasta el final del período de vida útil estimada. En EEUU el método del Superpave diseña mezclas asfálticas para el volumen de tráfico final estimado para la mezcla a utilizar a diferencia de todos los otros métodos hasta ahora empleados.

El silo de transferencia está capacitado para almacenar aglomerado con una particularidad que lo hace único: puede desvincular la extendedora de los camiones y garantizar un avance regular y sin paradas y una reducción del número preciso de camiones, consiguiendo una homogeneidad elevadísima, eliminando las segregaciones térmicas y granulométricas.

Actualmente, las administraciones están empezando a incorporar en sus requerimientos para la adjudicación de contratos la utilización de silos de transferencia en el extendido de la mezcla

Su capacidad para almacenar aglomerado, a diferencia de los simples transferidores de material, permite desvincular la extendedora de los camiones y garantizar un avance regular y sin paradas de esta y una reducción del número preciso de camiones. Además de mejorar el IRI, aumenta la producción del equipo de extendido y reduce el número de camiones necesarios.

Este dispositivo elimina las segregaciones térmicas y granulométricas que se han producido durante el transporte a obra, restituyendo la calidad del aglomerado a la que tenía al salir de la planta. Esta homogeneización elimina los puntos fríos y consigue que se alcance, en toda la extensión del firme, la máxima densidad y sus máximas prestaciones. Se eliminan de este modo los deterioros prematuros debidos al enfriamiento del aglomerado que se detectaban en los cambios de camiones durante el extendido.

Además reduce los costes de transporte ya que elimina la demora de los camiones, mejorando la calidad del pavimento y haciendo de la operación de pavimentación más eficiente.

Una preocupación actual que sigue siendo una necesidad en la industria de la pavimentación con asfalto es el desarrollo de un método para seleccionar las temperaturas de mezclado y compactación de las mezclas asfálticas, las cuales tienen gran influencia en el resultado final. Estas temperaturas están relacionadas con el tipo de ligante empleado, el tipo de mezcla y con la trabajabilidad de la misma.

En cuanto al tipo de mezcla es fundamental entender que las exigencias de compactación son diferentes para los tipos de mezcla. Lo mismo acontece si el espesor de capa es elevado o delgado, si la mezcla es rica en ligante y el tipo de ligante. En cualquier caso las reglas de buena práctica son esenciales para lograr un pavimento de una calidad y durabilidad adecuadas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). (1997). *Segregation: Causes and Cures for Hot Mix Asphalt*. Publication by the Joint Task Force on Segregation of AASHTO Subcommittee on Construction; AASHTO Subcommittee on Materials; and National Asphalt Pavement Association. AASHTO. Washington, D.C.
- [2] Stroup-Gardiner, M. & Brown, E.R. (2000). National Cooperative Highway Research Program Report 441: *Segregation in Hot Mix Asphalt Pavements*. Transportation Research Board, National Research Council. Washington, D.C.
- [3] Williams, R.C.; Duncan, G. & White, T.D. (1996). *Hot-Mix Asphalt Segregation: Measurement and Effects*. In Transportation Research Record 1543. Transportation Research Board, National Research Council. Washington, D.C. pp. 97-105.
- [4] Cross, Stephen A.; and Brown, E. R. (1993). *Effect of Segregation on Performance of Hot-Mix Asphalt*. Transportation Research Record 1417. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C. pp. 117-126.
- [5] Willoughby, K A; Mahoney, J P; Pierce, L M; Uhlmeyer, J S; Anderson, K W. (2002). *Construction-related asphalt concrete pavement temperature and density differentials*. In Transportation Research Record 1813. Transportation Research Board, National Research Council. Washington, D.C. pp. 68-76.
- [6] Gilbert, K. (2005). *Thermal Segregation*. Final Report. Colorado Department of Transportation. Research Branch.
- [7] Sebesta, S. & Scullion, T. (2003). Application of Infrared Imaging and Ground- Penetrating Radar to Detect Segregation in Hot-Mix Asphalt Overlays. Transportation Research Record 1861. Transportation Research Board, National Research Council. Washington, D.C. pp. 37-43.
- [8] Willoughby, K., S.A. Read, J.P. Mahoney, S.T. Muench, L.M. Pierce, T.R. Thompson, J.S., Uhlmeyer, R. Moore, and K.W. Anderson (2001). *Construction-Related Asphalt Concrete Pavement Temperature Differentials and the Corresponding Density Differentials*. Report WA-RD 476.1. Washington Department of Transportation.
- [9] Smith, K.L., Smith K.D., Evans, L.D., Hoerner, T.E., Darter, M.I. & Woodstrom, J.H. (1997). *Smoothness specification for pavements*. Final Report. NCHRP Web Document 1 (Project 1-31). Transportation Research Board; Washington.

- [10] Leslie Ann Myers, Ph.D.; James Mahoney; and, Jack E. Stephens, Ph.D., P.E. (2001). *Application of Infrared Thermographic Imaging to Bituminous Concrete Pavements*– Interim Report. University of Connecticut Connecticut Advanced Pavement Laboratory
- [11] Stroup-Gardiner M., Carter A., Das T. & Bowman B. (2005). *Initial Ride Quality of Hot-Mix Asphalt Pavements*. In Transportation Research Record 1907. Transportation Research Board, National Research Council. Washington, D.C. pp. 105-112.
- [12] Ervin, R. D., et al. (1983). *Influence of Truck Size and Weight Variables on Stability and Control Properties of Heavy Trucks*. University of Michigan Transportation Research Institute UMTRI-83-10/2, Federal Highway Administration, FHWA-RD-83- 030, 1983, 179 p.
- [13] Saarenketo, T. (1997). *Using GPR and Dielectric Probe Measurements in Pavement Density Quality Control*. Transportation Research Record 1577. Transportation Research Board, National Research Council. Washington, D.C. pp. 37-44.
- [14] Chmiel, Anthony et al, (2002) *Correlation of Surface Texture, Segregation, and Measurement of Air Voids*. New Jersey Department of Transportation Bureau of Research and U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration. FHWA-NJ-2002-026
- [15] Meegoda, Jay N. et al (2003). *Detection of Surface Segregation using LASER*. TRB 2003 Annual Meeting CD
- [16] Adams, Jerome et al (2001). *Investigation of Construction-Related Asphalt Concrete Pavement Temperature Differentials*. Published by: Minnesota Department of Transportation
- [17] Williams, Christopher R., Gary Duncan, Jr., and Thomas D. White. 1996a. "Hot-Mix Asphalt Segregation: Measurement and Effects." *Transportation Research Record* 1543: 97-105. Washington, D.C.: Transportation Research Board, National Research Council.

ANEJO I

OBSERVACIONES DE CAMPO

OBSERVACIONES DE CAMPO

Observaciones generales

El Departamento de Transporte de Minnesota realizó estudios en base al análisis de imágenes infrarrojas y mediciones de densidad con métodos nucleares en varios proyectos de pavimentación desde septiembre a noviembre del año 2000. A continuación se van a presentar una serie de figuras pertenecientes a este estudio. En las siguientes imágenes de la capa asfáltica se van a mostrar los distintos patrones de diferenciales térmicos que se observaron durante el estudio.

Las figuras 1 y 1A muestran una capa típica pavimentada usando un elevador de material en cordón con temperaturas uniformes. Los diferenciales de temperatura transversales sobre las líneas LI01 y LI02 son ambos de 11°F.

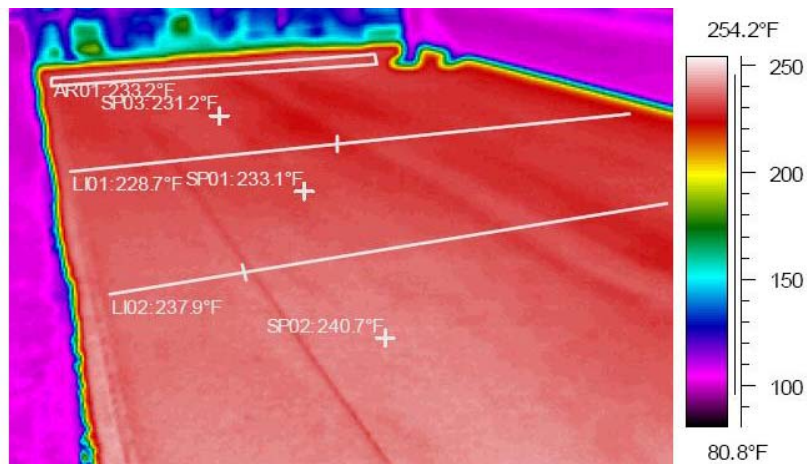


Figura 1: temperaturas uniformes durante la pavimentación usando un elevador de material en cordón (imagen infrarroja)



Figura 1A: temperatura uniforme durante la pavimentación usando un elevador de material en cordón (imagen digital)

Las figuras 2 y 2A son un ejemplo de temperatura uniforme de la capa pavimentada usando vertido directamente sobre camión. La línea LI01 tiene un diferencial de temperatura transversal de 18°F. La línea LI02 tiene un diferencial de temperatura de 33°F. Esta diferencia en diferenciales es debido al enfriamiento que presenta el borde de la capa.

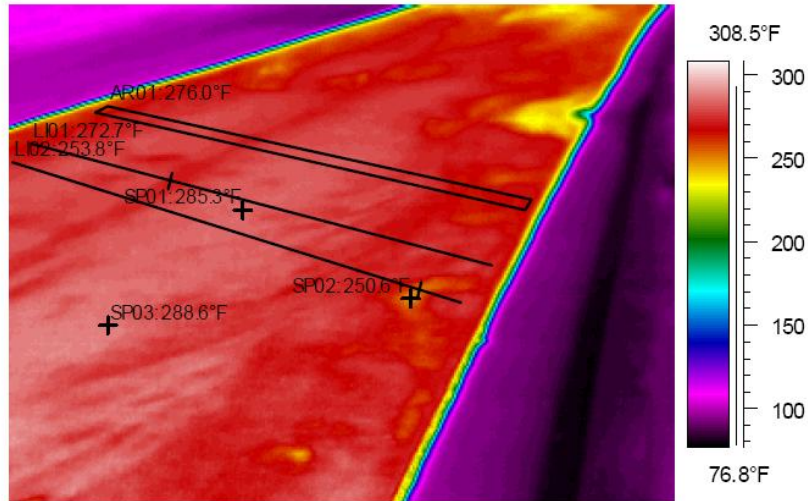


Figura 2: temperaturas uniformes durante la pavimentación de vertido directo desde camión (imagen infrarroja)



Figura 2A: temperatura uniforme durante la pavimentación de vertido directo desde camión (imagen digital)

Las figuras 3 y 3A muestran un ejemplo de los diferenciales de temperatura longitudinales durante el proceso de pavimentación. La formación de esta veta longitudinal es fruto de un mal ajuste de la extendedora. Para este caso se presentaron diferenciales de temperatura desde 30°F a 50°F.

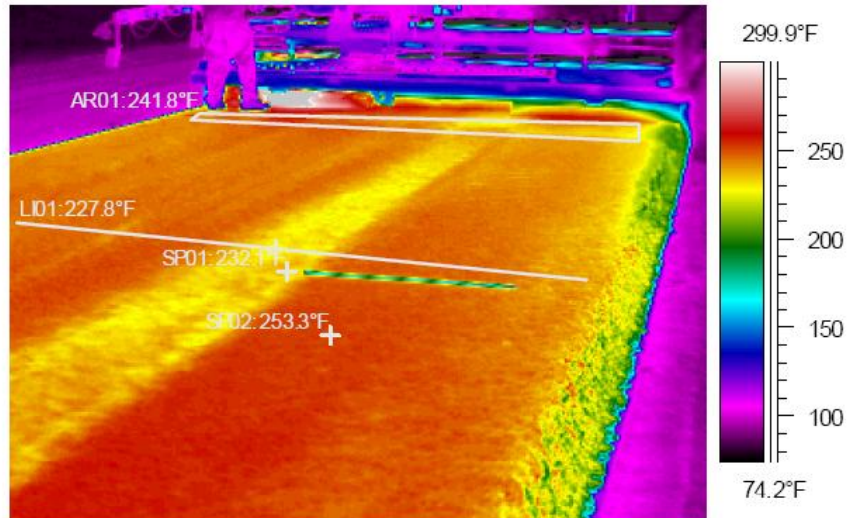


Figura 3: Veta longitudinal (imagen infrarroja)



Figura 3A: Veta longitudinal (imagen digital)

La figura 4 muestra las zonas frías asociadas con el material más frío pasando a través de la extendidora o material más frío que ha caído en frente de la extendidora no se ha mezclado con el nuevo material. Los diferenciales de temperatura causados por estas zonas frías son alrededor de 50°F. La severidad del diferencial de temperatura varía con cada camión.

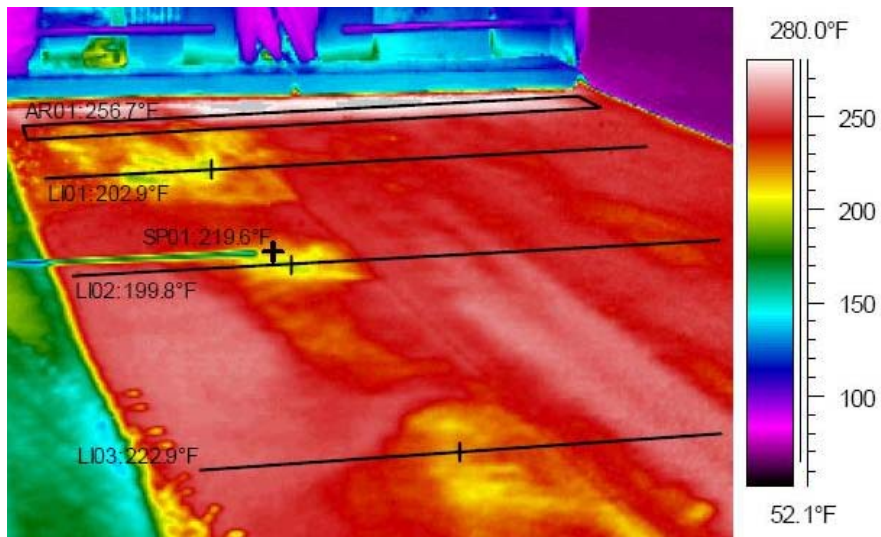


Figura 4: Manchas frías (imagen infrarroja)

Las figuras 5 y 5A muestran un punto típico de parada/ arranque de la extendidora. La diferencia en la temperatura entre la nueva capa y el anterior es de casi 40°F. En este caso, la extendidora esperó durante cinco minutos a un nuevo camión de mezcla

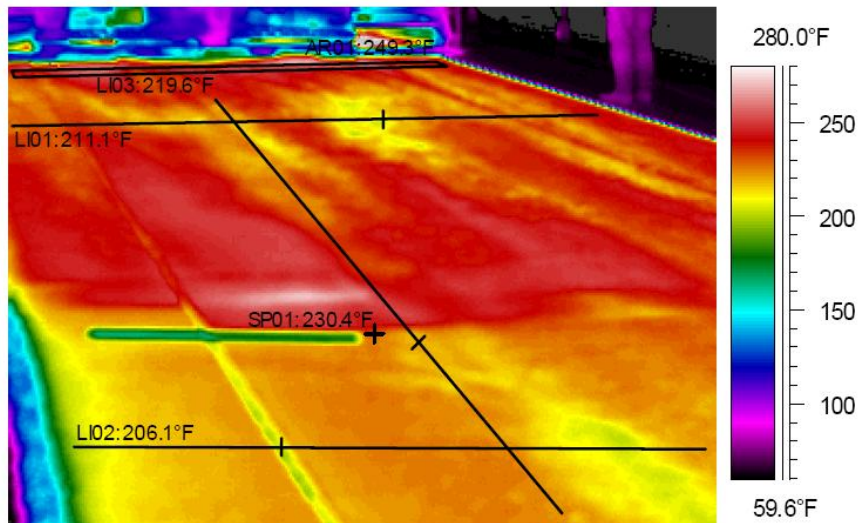


Figura 5: punto típico de parada/ arranque de la extendidora (imagen infrarroja)



Figura 5A: punto típico de parada/ arranque de la extendedora (imagen digital)

Las figuras 6 y 6A muestran una parada/ arranque de la extendedora de 30 minutos usando un elevador de material en cordón. El diferencial de temperatura entre la nueva capa y la anterior es de casi 77°F.

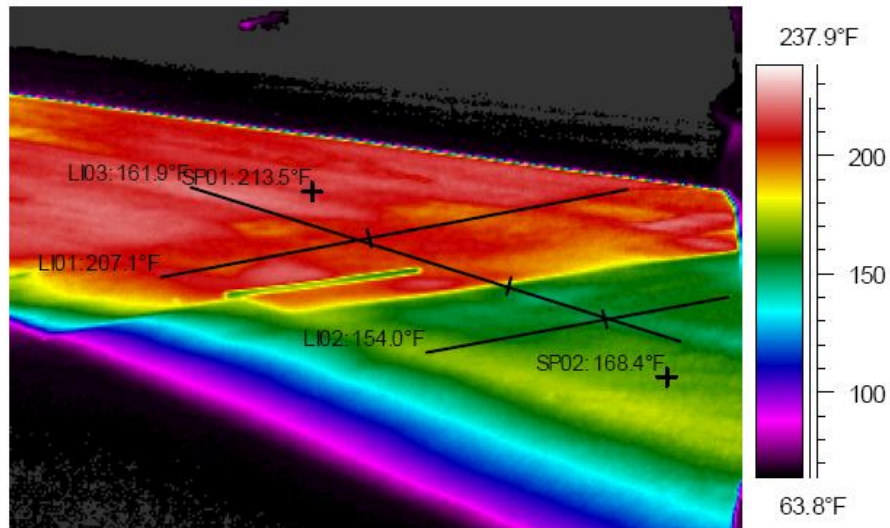


Figura 6: punto parada/arranque de la extendedora de 30 minutos (imagen infrarroja)



Figura 6A: punto parada/ arranque de la extendedora de 30 minutos (imagen digital)

Las figuras 7 y 7A muestra un cordón de material mientras la extendedora está parada y está a la espera de una nueva carga de mezcla. Las zonas SP01 y SP02 muestran temperaturas de 131°F y 172°F respectivamente.

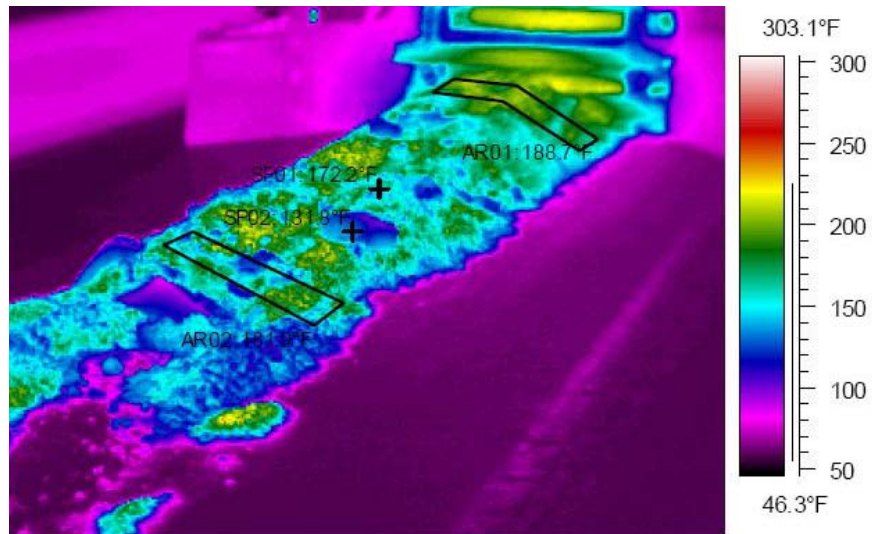


Figura 7: Cordón de material antes de la extendedora (imagen infrarroja)



Figura 7A: Cordón de material frío antes de la extendedora (imagen digital)

Las figuras 8 y 8A muestran un patrón frío que fue causado por la extendedora consumiendo el final del cordón de material mostrado en las figuras 7 y 7A. La extendedora presenta un patrón frío con una temperatura mínima de 198°F y un diferencial de temperatura transversal de 40°F.

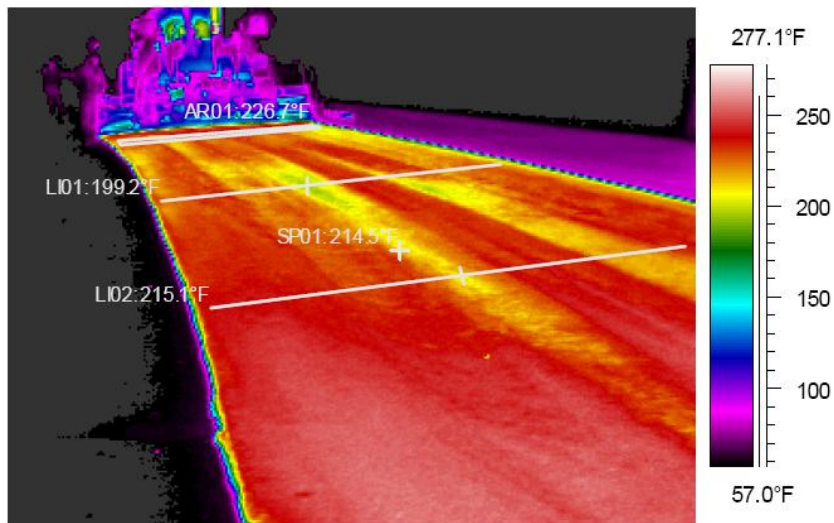


Figura 7A: Cordón de material frío después de la extendedora (imagen infrarroja)



Figura 7A: Cordón de material frío después de la extendidora (imagen digital)

Las figuras 8 y 8A son un ejemplo de punto/ arranque de la extendidora durante el cual el operario de la extendidora vacía completamente la tolva de la extendidora por elevación de las alas justo antes de detenerse. La extendidora se detuvo en SP01. Los diferenciales de temperatura transversal en las líneas LI01 y LI02 son de 77°F y de 57°F respectivamente.

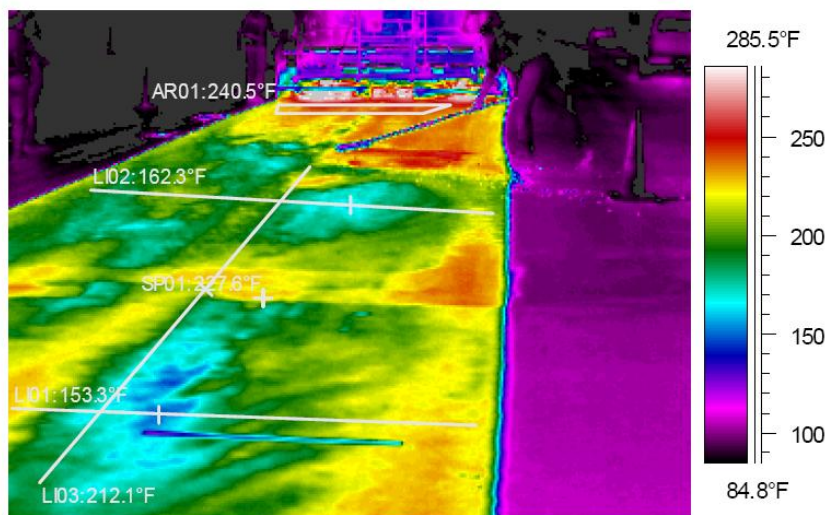


Figura 8: Vaciando la extendidora durante la pavimentación (imagen infrarroja)



Figura 8A: Vaciado la extendedor durante la pavimentación (imagen digital)

Las figuras 9 y 9A muestran un patrón típico causado por la elevación de las alas de la tolva de la extendedora con el fin de consumir el estancamiento de mezcla asfáltica fría que se acumula en las alas, efecto conocido como *clamshelling*. La temperatura más baja en las zonas más frías es de alrededor de 180°F. El diferencial de temperatura transversal a través de la capa asfáltico es de 56°F. Una vez que se consume la mezcla estancada, la extendedora de nuevo llega a ser consistente con un diferencial de temperatura transversal de 18°F.

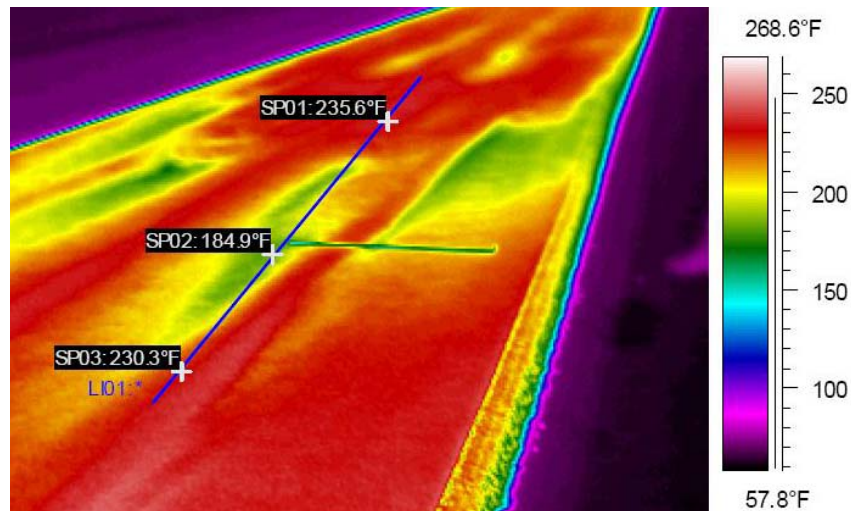


Figura 9: Efectos del clamshelling sobre la capa (imagen infrarroja)



Figura 9A: Efectos del clamshelling sobre la capa (imagen digital)

Realización del estudio

Para identificar las variaciones de temperatura se utilizó una cámara de infrarrojos. En este estudio se observó que la segregación granulométrica no fue un problema significativo, sin embargo todas las zonas de estudio presentaron áreas con segregación térmica. En casi cada perfil de densidad hubo una reducción de densidad asociada a las zonas frías.

En general se observó que las densidades disminuían aproximadamente cerca de 3lb/ft^3 en la zona fría respecto de la zona de la capa asfáltica circundante. Esta observación sugirió que obviamente estas zonas más frías tienen un impacto directo sobre las densidades.

Se observó que las operaciones de elevación de material en cordón presentaron temperaturas más uniformes con menos anomalías visuales que las operaciones mediante el vertido tradicional desde camión. El elevador de material puede mantener la extendedora moviéndose a un ritmo constante eliminando la necesidad de parada de la extendedora para recibir una carga de mezcla a la tolva de la extendedora.

En las operaciones de vertido de camión, la extendedora para cada vez que la mezcla es consumida para el intercambio de camiones. Este ciclo conduce a la ocurrencia de más zonas frías en la capa asfáltica.

Después de comparar variables tales como el tipo de mezcla, el tiempo de carga y el tipo de operación de pavimentación, se llegó a la conclusión que ninguna de estas variables individualmente parece tener un impacto significativo en el proceso de pavimentación, sin embargo, todas ellas en conjunto desempeñan un papel importante en el proceso de pavimentación.

Luego, la segregación parece ser una variable que es difícil de cuantificar y en la cual las reglas de buena práctica desempeñan un papel importante. Incluso en diferenciales de temperatura elevados se pueden alcanzar diferenciales de densidad bajos con reglas de buena práctica y en diferenciales de temperatura bajos se pueden desarrollar diferenciales de densidad elevados con reglas de mala práctica.

En cuanto a los resultados, si los diferenciales de temperatura están por debajo de 25°F en estas zonas más frías de la capa se observó que no experimentarán un gran cambio de densidad respecto de las zonas circundantes.

Relativo a los 16 proyectos estudiados, se observó que hay causas específicas que causan segregación térmica o capas con temperaturas no uniformes. En lugares donde estas causas específicas fueron minimizadas o eliminadas, la capa asfáltica presentó constantemente temperaturas uniformes con un mínimo de zonas frías. A continuación se analizan cada una de estas causas específicas:

1. Falta de remezcla de la mezcla asfáltica entre la entrega de la carga y la tolva de la extendedora

Se observó que la corteza fría que se formaba durante el transporte no se mezclaba de forma uniforme con el resto de la mezcla en caliente interior en el momento de transferir directamente a la tolva de la extendedora. El resultado es la aparición de zonas frías en la capa asfáltica.

2. Falta de uso de lonas en los camiones de entrega de asfalto

En uno de los proyectos se utilizaron lonas para cubrir la mezcla durante el transporte de la misma. La corteza de asfalto en el camión estará fría varios grados dependiendo de las condiciones climáticas y la cantidad de tiempo que la mezcla se encuentre en la caja del camión. La diferencia de temperatura entre la corteza y el interior de la mezcla llegó a alcanzar los 90°F.

Estas observaciones sugirieron que reducir el grado de enfriamiento del asfalto minimizará la severidad y la aparición de manchas frías en la capa asfáltica.

3. Permitir la parada de la extendedora

Se observó que en todos los puntos en los que se paraba la extendedora se presentaba un patrón frío en la capa. En algunas operaciones de final de camión donde los camiones estaban parados sólo el tiempo suficiente para incorporarse a la extendedora, se observó que esos patrones fríos se minimizaron considerablemente. Los diferenciales de temperatura en la capa en los puntos de parada/ arranque de la extendedora llegaron a alcanzar temperaturas de 70°F y 90°F. Estas observaciones sugirieron que limitando el número de paradas de la extendedora y su duración se

minimizarán los diferenciales de temperatura en los puntos de parada/ arranque de la extendidora

4. Configuración de la extendidora mal ajustada

Se observó que algunas zonas de estudio presentaban capas con vetas longitudinales. Estas observaciones sugirieron que la manera en que el operario tiene la extendidora ajustada y la manera en que la maneja durante la colocación de la capa asfáltica eran importantes para obtener temperaturas uniformes. Una extendidora ajustada correctamente es necesaria para limitar las variaciones de temperatura que ocurren en la capa.

5. Vaciar completamente la tolva de la extendidora y/o elevando las alas de la tolva con el fin de consumir la mezcla estancada que se acumula en las alas

Se observó que es muy común la acumulación de la mezcla en las alas de la tolva, y que los operarios de la extendidora elevarán las alas de la tolva con el fin de verter la mezcla sobre la cinta transportadora longitudinal a la regla de extendido. Cuando esto ocurre una zona fría se formará sobre la capa creando un patrón en forma de mariposa o abanico. Estas observaciones sugieren que la mezcla estancada en las alas de la tolva no debe ser vertida en la capa asfáltica. Lo ideal sería que las tolvas de las extendedoras estuvieran diseñadas para eliminar el estancamiento de la mezcla.

6. Vertido de asfalto frío en la tolva de la extendidora

Se observó que la corteza en el final del cordón de material presentaba una disminución de temperatura de 100°F. Esta mezcla produce un patrón frío en la capa con grandes diferenciales de temperatura. Estas observaciones sugieren que en ningún momento debe ser vertido este cordón de material hacia la tolva de la extendidora.

Conclusiones del estudio

Se determinó que la segregación térmica puede ser fácilmente identificada con el uso de una cámara infrarroja. Las áreas más frías parecen tener un impacto directo en las lecturas de densidad efectuadas en la zona.

Se observó que factores como el tipo de mezcla, las condiciones medioambientales, la temperatura del aire, entre otros, no contribuyen por sí solos a originar grandes diferenciales de temperatura.

Los perfiles de densidad se deben completar con perfiles adicionales de acompañamiento en áreas adyacentes de temperatura y textura uniforme. Lo ideal sería tomar un mínimo de 6 perfiles de densidad, de los cuales, 3 en las áreas afectadas y 3 en áreas de temperatura uniforme. Muchas veces este planteamiento puede no ser viable debido a las limitaciones de tiempo, pero debe hacerse un esfuerzo para completar el mayor número de perfiles de acompañamiento como sea posible.

ANEJO II

PROPIEDADES DE LA MEZCLA DE ENSAYO

1. Introducción

A continuación se indican los resultados obtenidos en los ensayos realizados en el estudio de Mezclas Bituminosas en caliente de la mezcla tipo G-20.

El trabajo se basa en los ensayos citados en el artículo 542 del PG-3 (actualizado en la OM de marzo de 2004). El método empleado es el ensayo Marshall que se describe en la NTL-159: "Resistencia a la deformación plástica de mezclas bituminosas empleando el aparato Marshall".

Se indican resultados de los ensayos que complementan el citado Marshall (

2. Materiales

Áridos

Los áridos utilizados proceden de una cantera de árido porfídico y filler calizo. Las referencias y fracciones a emplear son:

Referencia	Fracción
Grava gruesa	Árido 19-25 mm porfídico
Grava gruesa	Árido 12-19 mm porfídico
Gravilla	Árido 6-12 mm porfídico
Arena	Árido 0-6 mm porfídico
Filler de aportación	Filler calizo

Los resultados que se adjuntan en este estudio son los valores medios de los ensayos realizados sobre estos materiales durante el control de fabricación y acopio de los mismos.

Ensayos del árido grueso (> 2mm)

Ensayo/Fracción	6-12 mm	12-18 mm	19-25 mm
Granulometría UNE EN 933-1 (resultado expresado en % que pasa)			
25	-	100	100
20	-	94	21
12,5	100	32	0,5
8	68	2	-
4	2	1	-
2	1	-	-
0,063	0,4	0,4	0,2
Índice de lajas UNE EN 933-3 (resultado expresado en %)			
Valor de lajas	13	12	9
Partículas trituradas UNE EN 933-5 (resultado expresado en %)			
Total trituradas	100	100	100
Trituradas	100	100	100
Redondeadas	-	-	-
Total redondeadas	-	-	-
Limpieza superficial UNE 146130 anexo C (expresado en %)			
Valor LS	0,2	0,2	0,2
Desgaste de los Ángeles UNE EN 1097-2 (expresado en % de pérdida)			
Valor DLA	10		
Coeficiente de Pulimento Acelerado UNE 146130 anexo D			
Valor CPA	0,55		
Densidad Relativa y absorción de áridos gruesos NLT-153 (expresado en g/cm ³ y %)			
Valor densidad	2,71	2,71	2,71
Valor absorción	0,3	0,3	0,2

Ensayos del árido fino (2 - 0,063 mm)

Ensayo/Fracción	0-6 mm
Granulometría UNE EN 933-1 (resultado expresado en % que pasa)	
8	100
4	80
2	51
0,5	24
0,25	18
0,125	13
0,063	9

Equivalencia de arena UNE EN 933-8	
Valor EA	67
Densidad Relativa y absorción de áridos gruesos NLT-154 (expresado en g/cm ³ y %)	
Valor densidad	2,68
Valor absorción	2,7

El ensayo de equivalente de arena se ha realizado con la fracción 0-4 mm de la arena (anexo A. Normativa de la UNE EN 933-8).

Ensayos del polvo mineral (< 0,063 mm)

Ensayo/Fracción	F. Recuperación	F. Aportación
Granulometría UNE EN 933-1 (resultado expresado en % que pasa)		
0,5	100	100
0,25	90	95
0,125	80	85
0,063	65	65
Densidad del filler en tolueno NLT-176 (expresado en g/cm ³)		
Valor densidad	0,7	0,55

Las fracciones de filler ensayadas han sido previamente separadas por el tamiz 0,063 (polvo mineral).

Ligante

El ligante utilizado es el betún convencional 60-70. Los resultados de los ensayos más significativos son los que aparecen a continuación.

Ensayos del ligante

Ensayo	NLT	Resultado
Penetración a 25°C, 100 g, 5s	124	63
Punto anillo y bola (°C)	125	50,8
Índice de penetración	181	-0,4
Densidad relativa (g/cm ³)	122	1,03

3. Ensayos de la mezcla

Dosificación

La proporción de los áridos (en la alimentación en frío) empleada para este tipo de mezcla es la siguiente:

Fracción y acopio	Dotación
Grava 19-25 mm porfídico	20%
Grava 12-19 mm porfídico	25%
Gravilla 6-12 mm porfídico	15%
Arena 0-6 mm porfídico	38%
Filler de aportación	2%

La dosificación en caliente de esta mezcla se regulará en las instalaciones de fabricación en función de los sistemas de cribado de la planta y captación de polvo mineral.

Curva de la mezcla de áridos

Con la dosificación empleada y teniendo en cuenta el efecto de los ciclones en la planta, la fórmula de trabajo resultante aparece en la tabla siguiente:

Tamices U.N.E.	Fòrmula de trabajo	Huso G-20	
		Mínimo	Máximo
25	100	100	100
20	87	75	95
12,5	64	55	75
8	51	40	60
4	34	25	42
2	22	18	32
0,5	11	7	18
0,25	8	4	12
0,125	5	3	8
0,063	4	2	5

Densidad en aceite de parafina

Se realiza este ensayo según la NTL-167 con la mezcla de áridos producto de la composición granulométrica fijada en la fórmula de trabajo.

Características Marshall (NLT-159). Densidad y huecos en mezclas bituminosas compactadas (NLT-168)

Se realizan varias series de probetas con porcentajes crecientes de ligante comprendidos entre el 3 y el 6% sobre el peso de los áridos. Los resultados obtenidos en cada serie son los siguientes:

Dato	Unidad	Serie 1	Serie 2	Serie 3	Serie 4
L/árido	%	3	4	5	6
L/mezcla	%	2,91	3,85	4,76	5,66
Densidad	g/cm ³	2,357	2,381	2,394	2,378
Dens. áridos	g/cm ³	2,72			
Dens. Ligante	g/cm ³	1,03			
H. mezcla	%	9,2	6,9	5,1	4,5
H. árido	%	15,9	15,8	16,2	17,5
Estabilidad	kN	13,5	15,1	15,3	14,2
Deformación	mm	2,1	2,5	2,9	3,3

Las densidades de las probetas han sido calculadas siguiendo el procedimiento descrito en el apartado 4.2 de la NLT-168 (Procedimiento con la muestra saturada superficie seca).

Gráficos del ensayo Marshall

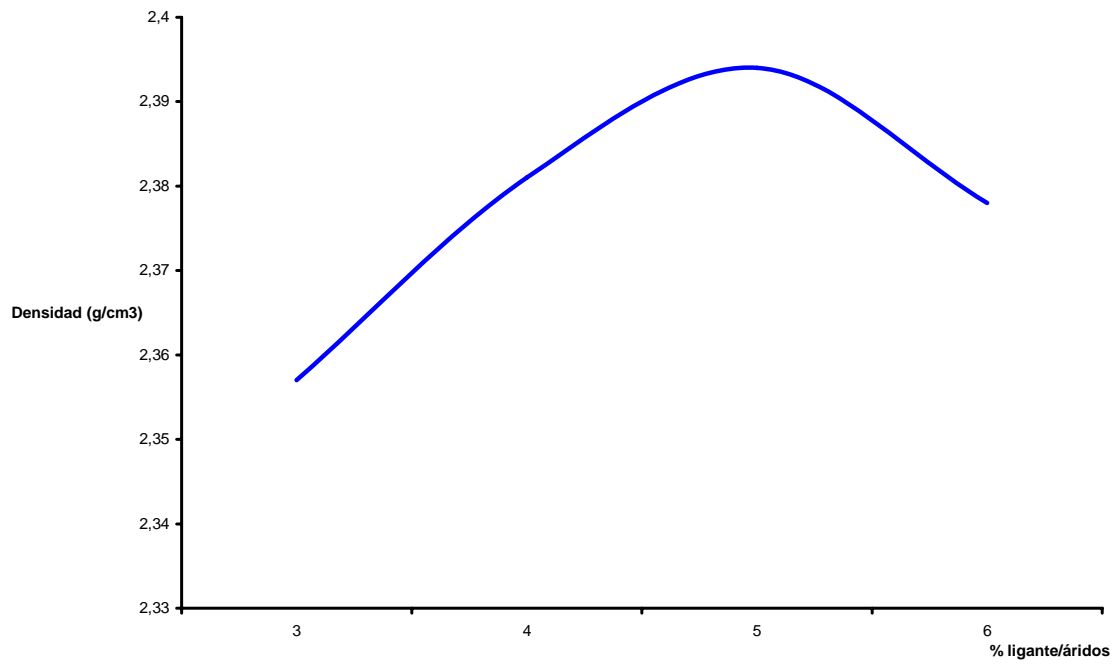


Gráfico 1: Densidad respecto de la relación ligante/áridos

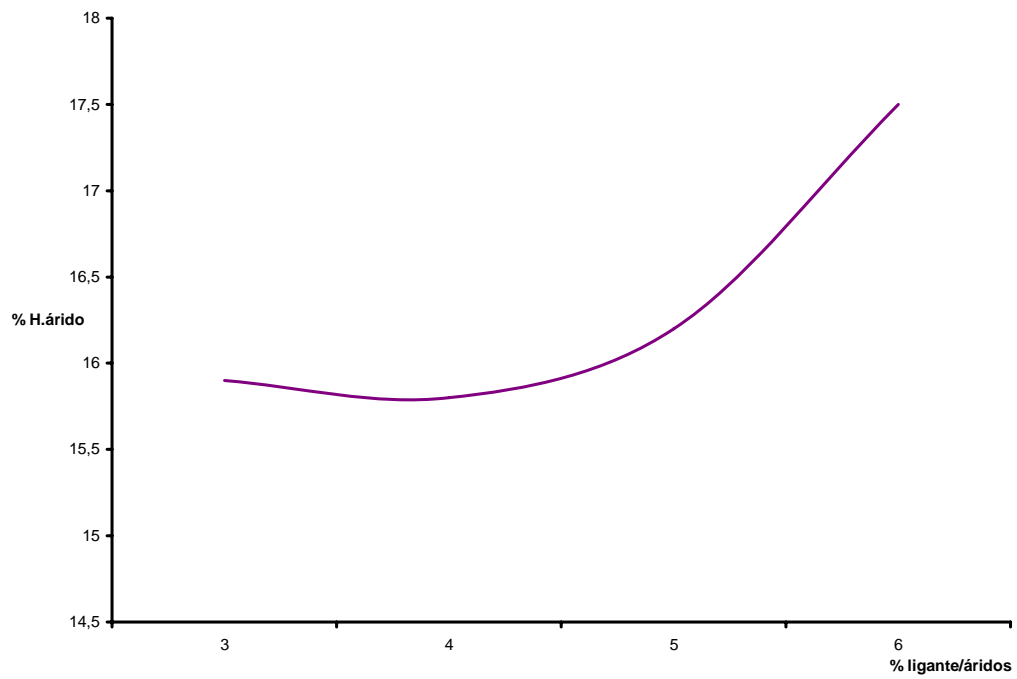


Gráfico 2: Porcentaje de huecos en los áridos respecto de la relación ligante/áridos

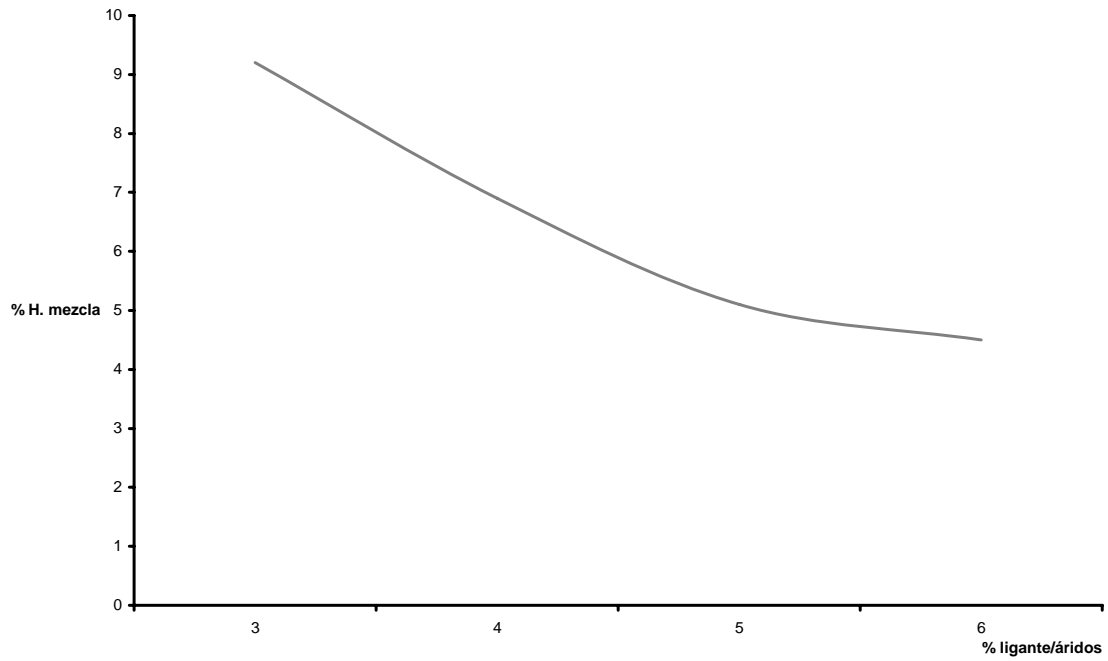


Gráfico 3: Porcentaje de huecos en mezcla respecto de la relación ligante/áridos

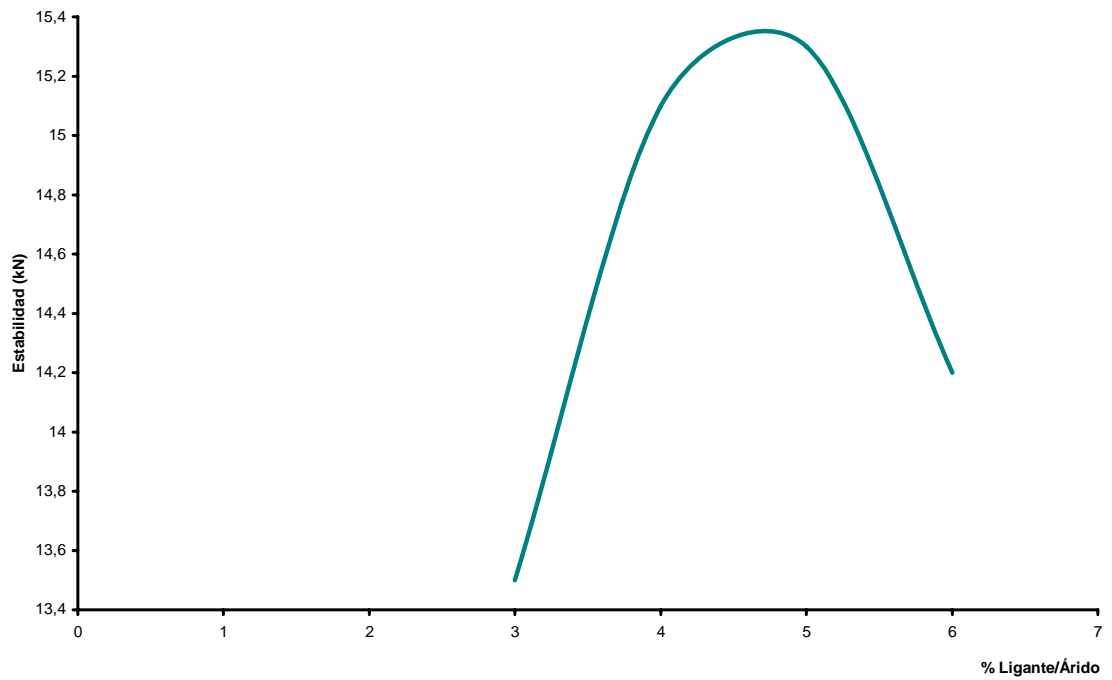


Gráfico 4: Estabilidad Marshall respecto de la relación ligante/áridos

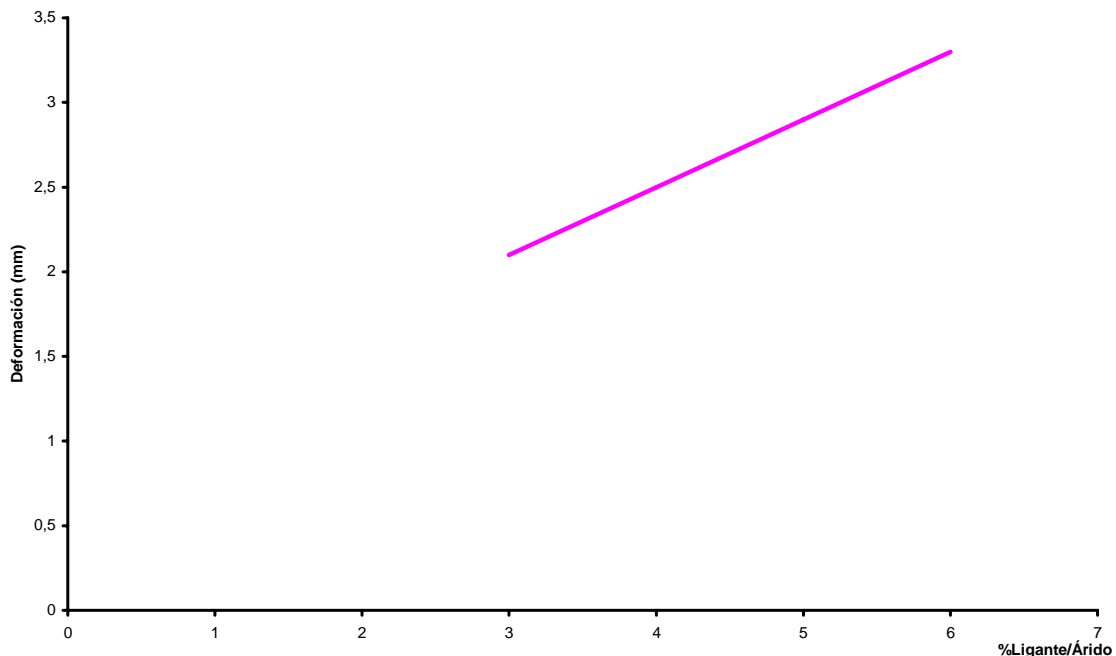


Gráfico 5: Deformación respecto de la relación ligante/áridos

Recomendación del porcentaje óptimo de ligante.

A la vista de los resultados obtenidos (representados en los gráficos), consideramos como óptimo de ligante el 4,1% sobre el peso de los áridos que corresponde con un 3,9% sobre el peso de la mezcla.

Con el porcentaje de ligante recomendado y el porcentaje de polvo de mineral obtenido en la curva de mezcla de los áridos, la relación polvo mineral/ligante obtenida es de 1.

Todos los resultados obtenidos en el laboratorio, deberán ser comprobados a escala industrial con las primeras fabricaciones en la planta.

Ensayo de inmersión-compresión (NLT-161 y 162)

Para realizar este ensayo se han seguido las siguientes normas de ensayo: Resistencia a compresión simple de mezclas bituminosas (NLT-161) y efecto del agua sobre la cohesión de las mezclas bituminosas compactadas (NLT-162).

El cálculo de las densidades se ha efectuado según la NLT-168: Densidad y huecos en mezclas bituminosas compactadas (apartado 4.2: procedimiento con la muestra saturada superficie seca)

Se ha realizado el ensayo con el porcentaje óptimo recomendado de ligante (4,1 % de ligante sobre el peso de áridos). Los resultados son los que se indican a continuación:

Características	Resultado
Densidad media de probetas (g/cm ³)	2,35
Resistencia de probetas no sumergidas (kgf/cm ²)	21,1
Resistencia tras inmersión (kgf/cm ²)	16,6
Índice de resistencia conservada (%)	78,7

Las condiciones del ensayo han sido las que se indican en el punto 3.2.2 de la Norma: Procedimiento nº2 mediante la inmersión de 24 horas a 60°C.

Temperaturas y tiempos de mezclado en planta y extendido

En la planta	Mínimo	Máximo
Temperatura de los áridos	150°C	185°C
Temperatura del ligante	150°C	165°C
Temperatura de la mezcla	150°C	180°C
Tiempo de envuelta en seco	6 s	
Tiempo de envuelta en húmedo	35 s	
En la obra	Mínimo	Máximo
Descarga en la extendidora	120°C	-
Inicio de la compactación	110°C	-
Terminación de la compactación	75°C	-

ANEJO III
TERMOGRAFÍAS

1. Introducción

A continuación se van a mostrar las termografías correspondientes a las zonas 1, 2 y 3 correspondientes al estudio experimental.

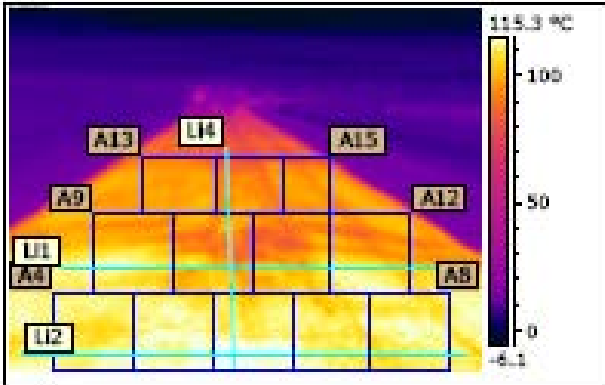
Fotografía:



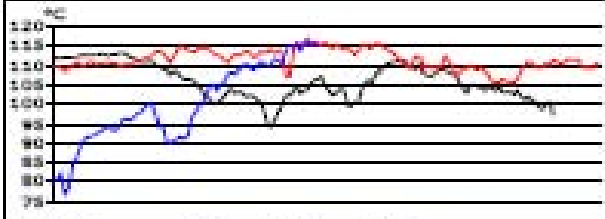
Extendido

Ubicación	15+900 Margen derecha.
-----------	------------------------

Termograma IR_1274.jpg :



Parámetro de objeto	Valor
Emissividad	0.97
Etiqueta	Valor
L11: Máx.	113.3 °C
L12: Máx.	116.9 °C
L14: Máx.	116.4 °C
A4: Máx.	114.7 °C
A5: Máx.	116.5 °C
A6: Máx.	117.5 °C
A7: Máx.	115.4 °C
A8: Máx.	114.6 °C
A9: Máx.	113.3 °C
A10: Máx.	109.8 °C
A11: Máx.	110.6 °C
A12: Máx.	113.3 °C
A13: Máx.	101.0 °C
A14: Máx.	98.8 °C
A15: Máx.	98.6 °C



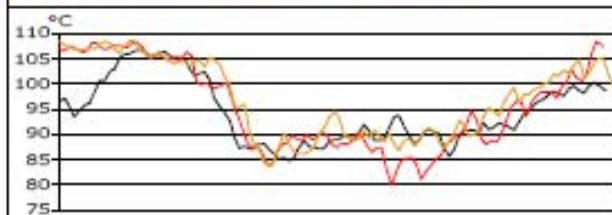
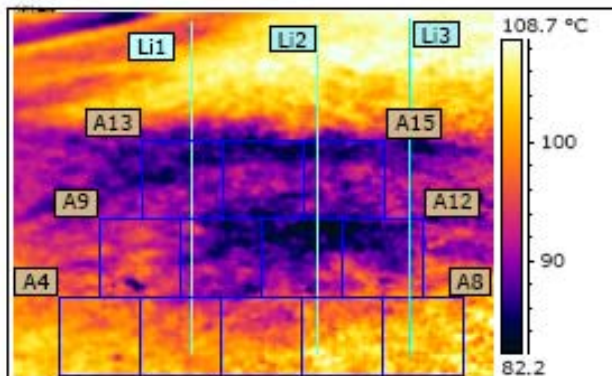
Etiqueta	Mín.	Máx.	Med.
L11	94.0	113.3	105.8
L12	105.4	116.9	111.4
L14	76.6	116.4	100.0

Fotografía:



Extendido	
Ubicación	15+630 Margen derecha

Termograma IR 1226.jpg :



Etiqueta	Min.	Máx.	Med.
<input checked="" type="checkbox"/> Li1	84.6	108.6	94.2
<input checked="" type="checkbox"/> Li2	79.8	108.2	95.3
<input checked="" type="checkbox"/> Li3	83.5	108.5	96.9

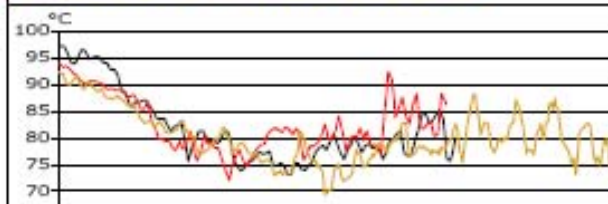
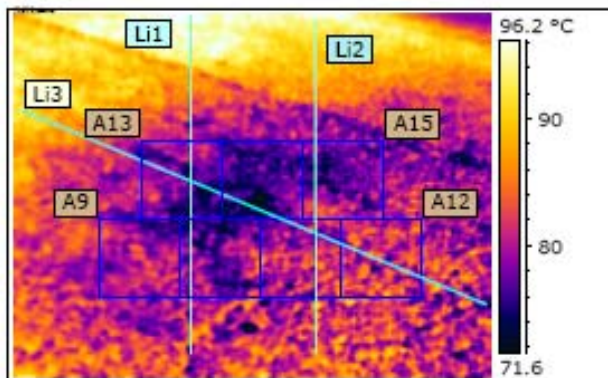
Parámetro de objeto	Valor
Emisividad	0.97
Etiqueta	Valor
Li1: Máx.	108.6 °C
Li2: Máx.	108.2 °C
Li3: Máx.	108.5 °C
A4: Máx.	106.5 °C
Ar5: Máx.	104.8 °C
Ar8: Máx.	106.0 °C
Ar7: Máx.	109.7 °C
A8: Máx.	108.8 °C
A9: Máx.	98.5 °C
Ar10: Máx.	96.2 °C
Ar11: Máx.	97.8 °C
A12: Máx.	101.6 °C
A13: Máx.	93.8 °C
Ar14: Máx.	93.2 °C
A15: Máx.	94.4 °C

Fotografía:



Extendido	
Ubicación	15+678 Margen derecha

Termograma IR_1236.jpg



Etiqueta	Min.	Máx.	Med.
<input checked="" type="checkbox"/> Li1	73.0	97.2	81.7
<input checked="" type="checkbox"/> Li2	72.0	93.7	82.4
<input checked="" type="checkbox"/> Li3	69.3	92.3	80.0

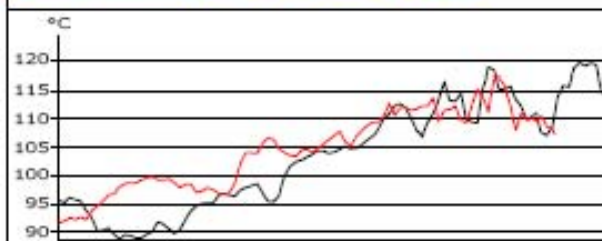
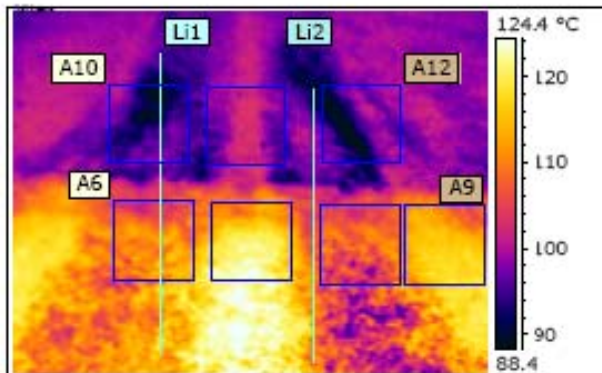
Parámetro de objeto	Valor
Emisividad	0.97
Etiqueta	Valor
Li1: Máx.	97.2 °C
Li2: Máx.	93.7 °C
Li3: Máx.	92.3 °C
A9: Máx.	85.5 °C
Ar10: Máx.	89.1 °C
Ar11: Máx.	89.3 °C
A12: Máx.	89.7 °C
A13: Máx.	85.4 °C
Ar14: Máx.	83.0 °C
A15: Máx.	85.2 °C

Fotografía:



Extendido	
Ubicación	15+658 Margen derecha

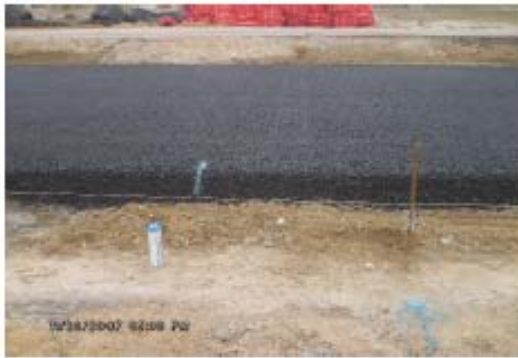
Termograma IR_1232.jpg :



Etiqueta	Min.	Máx.	Med.
<input checked="" type="checkbox"/> Li1	88.6	119.4	103.4
<input checked="" type="checkbox"/> Li2	91.4	117.0	104.5

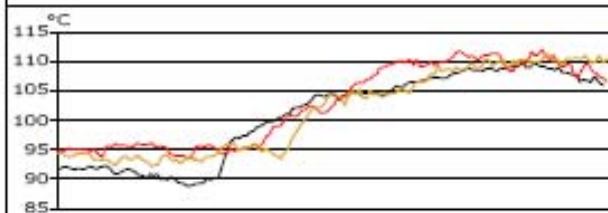
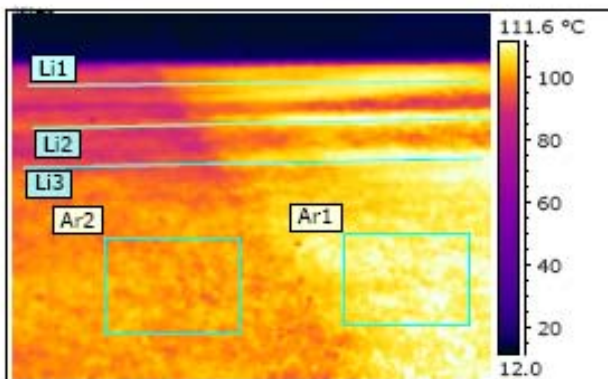
Parámetro de objeto	Valor
Emisividad	0.97
Etiqueta	Valor
Li1: Máx.	119.4 °C
Li2: Máx.	117.0 °C
A6: Máx.	117.6 °C
Ar7: Máx.	124.9 °C
A8: Máx.	112.9 °C
A9: Máx.	120.1 °C
A10: Máx.	101.2 °C
Ar11: Máx.	103.9 °C
A12: Máx.	102.1 °C

Fotografía:



Extendido	
Ubicación	15+858 Margen derecha

Termograma IR_1233.jpg



Etiqueta	Min.	Máx.	Med.
<input checked="" type="checkbox"/> Li1	88.7	109.8	100.7
<input checked="" type="checkbox"/> Li2	93.4	111.9	102.7
<input checked="" type="checkbox"/> Li3	92.1	111.3	101.5

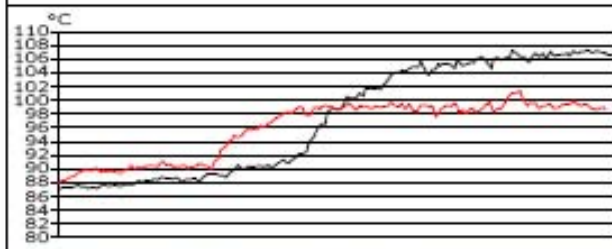
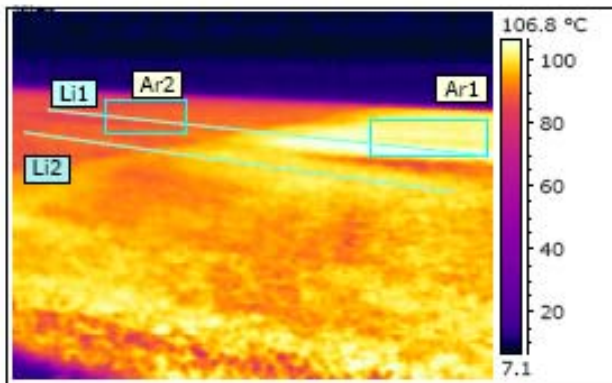
Parámetro de objeto	Valor
Emisividad	0.97
Etiqueta	Valor
Li1: Máx.	109.6 °C
Li2: Máx.	111.9 °C
Li3: Máx.	111.3 °C
Ar1: Máx.	114.3 °C
Ar2: Máx.	104.7 °C

Fotografía:



Extendido	
Ubicación	15+675 Margen derecha.

Termograma IR_1249.jpg :



Parámetro de objeto	Valor
Emisividad	0.97
Etiqueta	Valor
Li1: Máx.	107.2 °C
Li2: Máx.	101.3 °C
Ar1: Máx.	108.0 °C
Ar2: Máx.	92.6 °C

Etiqueta	Min.	Máx.	Med.
<input checked="" type="checkbox"/> Li1	86.9	107.2	97.2
<input checked="" type="checkbox"/> Li2	87.9	101.3	95.9