



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA  
BARCELONATECH

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental

# SISTEMA DE CATEGORIZACIÓN INTEGRAL DE MEZCLAS ASFÁLTICAS PARA CAPAS FINAS Y ULTRAFINAS EN PAVIMENTOS

---

## TESIS POR COMPENDIO DE PUBLICACIONES

Doctorando: **LIVIA GARCIA GIL**

Director de tesis: **Dr. RODRIGO MIRÓ RECASENS**

Programa de Doctorado en Ingeniería e Infraestructura del Transporte

E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona

Universidad Politécnica de Cataluña – BarcelonaTech

*Barcelona, Mayo 2019*



UNIVERSITAT POLITÈCNICA  
DE CATALUNYA  
BARCELONATECH

## *Sistema de categorización integral de mezclas asfálticas para capas finas y ultrafinas en pavimentos*

**Livia Garcia Gil**

**ADVERTIMENT** La consulta d'aquesta tesi queda condicionada a l'acceptació de les següents condicions d'ús: La difusió d'aquesta tesi per mitjà del repositori institucional UPCommons (<http://upcommons.upc.edu/tesis>) i el repositori cooperatiu TDX (<http://www.tdx.cat/>) ha estat autoritzada pels titulars dels drets de propietat intel·lectual **únicament per a usos privats** emmarcats en activitats d'investigació i docència. No s'autoritza la seva reproducció amb finalitats de lucre ni la seva difusió i posada a disposició des d'un lloc aliè al servei UPCommons o TDX. No s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a UPCommons (*framing*). Aquesta reserva de drets afecta tant al resum de presentació de la tesi com als seus continguts. En la utilització o cita de parts de la tesi és obligat indicar el nom de la persona autora.

**ADVERTENCIA** La consulta de esta tesis queda condicionada a la aceptación de las siguientes condiciones de uso: La difusión de esta tesis por medio del repositorio institucional UPCommons (<http://upcommons.upc.edu/tesis>) y el repositorio cooperativo TDR (<http://www.tdx.cat/?locale-attribute=es>) ha sido autorizada por los titulares de los derechos de propiedad intelectual **únicamente para usos privados enmarcados** en actividades de investigación y docencia. No se autoriza su reproducción con finalidades de lucro ni su difusión y puesta a disposición desde un sitio ajeno al servicio UPCommons No se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a UPCommons (*framing*). Esta reserva de derechos afecta tanto al resumen de presentación de la tesis como a sus contenidos. En la utilización o cita de partes de la tesis es obligado indicar el nombre de la persona autora.

**WARNING** On having consulted this thesis you're accepting the following use conditions: Spreading this thesis by the institutional repository UPCommons (<http://upcommons.upc.edu/tesis>) and the cooperative repository TDX (<http://www.tdx.cat/?locale-attribute=en>) has been authorized by the titular of the intellectual property rights **only for private uses** placed in investigation and teaching activities. Reproduction with lucrative aims is not authorized neither its spreading nor availability from a site foreign to the UPCommons service. Introducing its content in a window or frame foreign to the UPCommons service is not authorized (*framing*). These rights affect to the presentation summary of the thesis as well as to its contents. In the using or citation of parts of the thesis it's obliged to indicate the name of the author.



*A Víctor, por su apoyo en todos mis proyectos*



## Agradecimientos

Quisiera agradecer a mi director de tesis, Dr. Rodrigo Miró, su inestimable ayuda, orientación y dedicación. Gracias por su infinita paciencia en los momentos más delicados y su motivación constante, sin su perseverancia no habría logrado mantenerme firme en alcanzar este objetivo.

Al Dr. Félix E. Pérez Jiménez por su valiosa orientación y su interés por los avances conseguidos.

A la Dra. Adriana Martínez por estar siempre dispuesta a brindarme su inestimable ayuda durante toda la tesis doctoral.

A José Amorós y Jordi Martín, sin su ayuda no hubiese podido desarrollar la etapa experimental de laboratorio.

A Eva y Miriam, por su valiosa ayuda.

A la empresa COMSA SAU por brindarme la oportunidad de realizar este doctorado industrial enmarcado en el proyecto de investigación “Reducción de la siniestralidad en el tráfico mediante pavimentos sostenibles de capas finas y ultrafinas de ciclo de vida extendido”, en especial Joan Peset por empujarme a esta aventura.

A mi familia, por su paciencia infinita y por prestarme su apoyo en los momentos más complicados. Gracias por ayudarme a perder el miedo al fracaso.

Por último, agradecer al Ministerio de Economía y Competitividad de España la cofinanciación de esta investigación, a través de la convocatoria RETOS-COLABORACIÓN 2015 del Programa Nacional de Investigación, Desarrollo e Innovación para enfrentar los desafíos de la Sociedad (RTC-2015-4025-4), dentro del Plan Nacional de Investigación e Innovación Científica y Técnica para el período 2013-2016; y a la Unión Europea, a través de los fondos FEDER. También agradecer la financiación recibida por la Agencia de Gestión de Becas Universitarias y de Investigación del Gobierno de Cataluña a través del Plan de Doctorados Industriales (2015 DI 0012).



## Resumen

Los procedimientos para el diseño de mezclas asfálticas habitualmente utilizados en España se basan en parámetros volumétricos y en el cumplimiento de ciertas propiedades mecánicas y estructurales, y no tienen en cuenta otras propiedades tan importantes como la resistencia a la fisuración, o no potencian el empleo de tecnologías sostenibles.

Con el objetivo de hacer frente a estas barreras y encontrar el equilibrio entre las distintas propiedades durante el diseño y la selección de las mezclas, en esta tesis doctoral se ha desarrollado un sistema integral de categorización de mezclas bituminosas para capas de rodadura finas y ultrafinas en función de su rendimiento mecánico, funcional y ambiental. La herramienta desarrollada no solamente permite evaluar los distintos atributos de las mezclas, sino también comparar entre ellas, y por lo tanto seleccionar la mezcla óptima para cada situación.

El desarrollo de este sistema supuso la generación de una extensa base de datos acerca de las propiedades mecánicas, funcionales y ambientales; la falta de información sobre algunas propiedades hizo necesario tener que completarla con los resultados de un trabajo experimental de laboratorio y un trabajo de campo. A partir de la base de datos, se diseñó la metodología a seguir para la catalogación de cualquier mezcla bituminosa para capas finas y ultrafinas. La metodología propuesta fue diseñada con suficiente flexibilidad para ser adaptada a los requisitos particulares de otros países puesto que la normativa y especificaciones, procedimientos constructivos, tipologías de mezclas, materiales empleados, climatología, tráfico, edad del pavimento, etc. difieren de un país a otro.

Para materializar dicho sistema, se particularizó en el caso español puesto que los datos recopilados pertenecían a la red viaria española. Los resultados obtenidos muestran cómo la categorización de cualquier mezcla bituminosa es factible siguiendo la metodología propuesta, y permite comparar rendimientos entre distintas mezclas, demostrándose el potencial del presente desarrollo.



## Abstract

Traditional design procedures of asphalt mixtures are based on volumetric parameters and the compliance with certain mechanical and functional properties, and do not provide minimum requirements in terms of cracking resistance, a property that plays a major role in the durability of the pavement, and neither promote the use of sustainable technologies.

In order to overcome these barriers and seek the balance between properties, this doctoral thesis aims to develop a multi-labelling scheme for asphalt mixtures for thin asphalt wearing courses according to their mechanical, functional and environmental performance. The developed labelling system allows the comparison and benchmarking of different asphalt mixtures, providing the chance to choose the most safety and environmentally demanding option for each specific situation.

The development of this tool involved the generation of an extensive database on mechanical functional and environmental performance of bituminous mixture; the lack of information about some properties made it necessary to carry out a laboratory testing and a monitoring phase to complete the database. Once all the data was collected, the labelling strategy for evaluating the performance of thin asphalt wearing courses was designed.

The approached methodology is flexible enough to be tailored to suit countries' specific requirements because construction techniques, used materials, traffic, weather conditions, age of the pavement, preservation techniques, etc., differ from one country to another.

In order to realize the potential of the developed tool, the study was focused on the Spanish case because different Spanish IMs were involved and all the collected data belongs to the Spanish road network. The findings in this research clearly demonstrate that the developed labelling scheme shows promise; it allows not only the assignation of performance labels to any asphalt mixture based on its attributes but also the comparison of features between different asphalt mixtures for thin asphalt wearing courses.



## Índice de contenido

Agradecimientos .....	3
Resumen.....	4
Abstract .....	5
Introducción y objetivos.....	10
1.1. Planteamiento general del problema y justificación de la investigación.....	10
1.2. Objetivos de la investigación.....	12
1.3. Estado actual del conocimiento .....	12
Metodología.....	17
2.1. ESTRUCTURA DEL TRABAJO.....	17
2.2. Desarrollo de la base de datos .....	18
2.3. Sistema de categorización.....	25
Discusión resultados y conclusiones .....	32
3.1. Resultados obtenidos.....	32
3.2. validación de resultados.....	35
3.3. Conclusiones.....	38
3.4. Futuras líneas de investigación .....	40
Artículos .....	41
4.1. Publicación de artículos.....	41
4.2. Otras actividades de divulgación.....	42
Referencias.....	43
Compendio de publicaciones .....	47
Garcia-Gil, L., Miró, R., Pérez-Jiménez, F.E., New approach to characterize cracking resistance of asphalt binders .....	48
Garcia-Gil, L., Miró, R., Pérez-Jiménez, F.E., Evaluating the role of aggregate gradation on cracking performance of asphalt concrete for thin overlays .....	49
Garcia-Gil, L., Miró, R., Labelling strategy for evaluating the performance of thin asphalt wearing courses .....	50



## Índice de Figuras

Figura 1 Modelo de etiqueta eficiencia energética .....	14
Figura 2 Resultado del sistema de etiquetado del proyecto <i>Labelling road surfaces in the Netherlands</i> .....	15
Figura 3 Esquema del ensayo y curva carga-desplazamiento obtenida a partir del ensayo Fénix .....	19
Figura 4 Curva carga-desplazamiento obtenida a una temperatura de 5°C.....	20
Figura 5 Curva carga-desplazamiento obtenida en el estudio de los finos a una temperatura de 5°C.....	21
Figura 6 Curva carga-desplazamiento obtenida en el estudio de los áridos máximos a una temperatura de 5°C .....	21
Figura 7 Datos sobre la resistencia a la fisuración a 20°C: resistencia a tracción vs. desplazamiento al 50% postpico.....	22
Figura 8 Detalles del equipo de medición del “Splash & Spray” de Euroconsult.....	23
Figura 9 Resultados de la medición del número de gotas y su correlación con la textura .....	23
Figura 10 Detalles del equipo de medición del ruido de rodadura de LA2IC-UCLM.....	23
Figura 11 Resultados de la auscultación acústica en el tramo C-243a entre los PK 1+000 y PK 2+500.....	24
Figura 12 Resultados de la medición del CRT y textura en el tramo BP-2121 entre los PK 4+000 y PK 6+094 (Applus+).....	24
Figura 13 Calificación global final de cada mezcla .....	25
Figura 14 Niveles de rendimiento .....	26
Figura 15 Función de densidad del indicador macrotextura y definición de los límites de los niveles de rendimiento .....	26
Figura 16 Esquema del proceso de categorización o etiquetado .....	28
Figura 17 Valores recopilados de CRT en mezclas tipo hormigón bituminoso .....	29
Figura 18 Comprobación de la normalidad de la muestra CRT.....	29
Figura 19 Definición de los límites en la curva de densidad del CRT .....	30





Figura 20 Definición de los límites en la curva de densidad de la estabilidad Marshall .....	31
Figura 21 Etiquetas para la estabilidad Marshall en mezclas tipo AC (izquierda), mezclas tipo F (centro) y la etiqueta general (derecha) .....	33
Figura 22 Etiqueta para la deformación Marshall en mezclas AC.....	33
Figura 23 Etiquetas para la pérdida de partículas en mezclas tipo discontinuas (izquierda), mezclas tipo drenantes (centro) y la etiqueta general (derecha).....	33
Figura 24 Etiquetas para la resistencia conservada en mezclas tipo AC y drenantes (izquierda), mezclas tipo discontinuas (centro) y la etiqueta general (derecha) .....	33
Figura 25 Etiqueta para la resistencia a la fisuración.....	34
Figura 26 Etiquetas para la macrotextura en mezclas tipo AC (izquierda), mezclas tipo BBTM A y drenantes (centro) y mezclas tipo BBTM B (derecha).....	34
Figura 27 Etiqueta general de la macrotextura.....	34
Figura 28 Etiquetas para la resistencia al deslizamiento a en mezclas tipo AC (izquierda), mezclas tipo BBTM A y drenantes (centro) y mezclas tipo BBTM B (derecha).....	34
Figura 29 Etiqueta general de la resistencia al deslizamiento .....	34
Figura 30 Etiqueta para el efecto splash&spray.....	35
Figura 31 Etiquetas para las propiedades ambientales .....	35
Figura 32 Niveles de rendimiento globales.....	35
Figura 33 Etiquetas de la pérdida de partículas y la resistencia conservada para mezclas discontinuas .....	36
Figura 34 Etiquetas de macrotextura y resistencia al deslizamiento para mezclas tipo BBTM B36	
Figura 35 Etiquetas de ruido de rodadura y temperatura de mezclado.....	36
Figura 36 Niveles de rendimiento globales.....	37
Figura 37 Catalogación final de la mezcla 1 .....	38
Figura 38 Catalogación final de la mezcla 2 .....	38



## Índice de tablas

Tabla 1 Datos recogidos a partir de los ensayos de control de las Administraciones .....	18
Tabla 2 Tramos auscultados .....	22
Tabla 3 Listado de propiedades a considerar en cada categoría .....	25
Tabla 4 Límites de las etiquetas para la CRT en mezclas tipo hormigón bituminoso .....	30
Tabla 5 Límites de las etiquetas para la estabilidad Marshall en mezclas tipo hormigón bituminoso para T1 y T2.....	31
Tabla 6 Parámetros de diseño y propiedades de las mezclas 1 y 2 .....	36
Tabla 7 Proceso de etiquetado de las mezclas.....	37
Tabla 8 Posición de la revistas elegidas .....	42



# Capítulo 1

## Introducción y objetivos

*En este capítulo inicial se expondrán las razones que justifican la presente investigación y los objetivos establecidos para dar respuesta a la necesidad detectada.*

### **1.1. PLANTEAMIENTO GENERAL DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN**

El transporte por carretera genera un importante impacto a su alrededor; no sólo la construcción de la propia infraestructura supone una fuerte afectación al territorio, sino que el diseño de la misma afecta tanto a los usuarios (resistencia al deslizamiento, visibilidad, desgaste de neumáticos, consumo de carburante, etc.), como a los residentes locales (ruido de rodadura, emisiones de gases contaminantes, etc.).

Los firmes no sólo deben soportar las sollicitaciones del tráfico, sino que al mismo tiempo han de proporcionar una superficie de rodadura cómoda y segura para la circulación de los vehículos. De hecho, estudios de seguridad vial indican que aproximadamente el 20% de los accidentes de carretera ocurren en días lluviosos [1]. La acumulación de agua en el pavimento puede generar un efecto de hidroplaneo que conlleva una pérdida de la adherencia entre los neumáticos del vehículo y el pavimento, y un efecto de proyección y pulverización de agua que provoca una disminución de la visibilidad de los conductores [2].

Asimismo, una de las principales fuentes de emisión de contaminantes del transporte de carretera es la construcción y conservación de pavimentos flexibles, lo que justifica los esfuerzos que se están realizando en el desarrollo de tecnologías que reduzcan la huella ambiental de las mezclas bituminosas [3].



Por todo ello, el diseño de las mezclas bituminosas debería consistir en lograr un balance entre las propiedades mecánicas, funcionales y ambientales a través de una combinación óptima de los distintos materiales que las conforman.

No obstante, a día de hoy, los procedimientos de diseño de las mezclas bituminosas están basados en parámetros volumétricos y en el cumplimiento de ciertas características mecánicas, mientras que las propiedades funcionales y ambientales reciben menor atención. De hecho, la mayoría de Administraciones de Carreteras sólo establecen unos requisitos mínimos de cumplimiento y no valoran rendimientos por encima los de mínimos especificados.

En el caso particular de España, para el diseño de mezclas bituminosas para capas de rodadura el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3) especifica unos parámetros volumétricos (curva granulométrica, dotación mínima de ligante hidrocarbonado, contenido de huecos, etc.) y unos valores mínimos de ciertas propiedades mecánicas (sensibilidad al agua, resistencia a la deformación, pérdida de partículas, etc.) de obligado cumplimiento para la aceptación de la mezcla [4][5][6]. Además, la normativa también establece unos requisitos mínimos de macrotextura, resistencia al deslizamiento y regularidad superficial que deben comprobarse en campo una vez la mezcla se haya extendido. No obstante, el PG-3 no especifica valores mínimos para la resistencia a la fisuración, aun tratándose de una de las principales causas de deterioro de los pavimentos, o no potencian el empleo de tecnologías sostenibles.

Existe una necesidad social, cada vez más urgente, de mejorar la sostenibilidad, la seguridad y la vida útil de las infraestructuras, tal y como lo viene reconociendo la Unión Europea en su programa de actuación Horizonte 2020 y sus diferentes estados miembros en los últimos años [7]. En Europa se está haciendo una gran labor para fomentar la sostenibilidad y seguridad de las infraestructuras a través de la implementación de herramientas como el denominado “*Green Public Procurement*” o “*Contratación Sostenible*” a través de la cual se favorecen los proyectos con menor impacto ambiental en los procesos de licitación [8]. Además, la creciente preocupación por la economía sostenible también ha provocado un giro en las prioridades de las administraciones de carreteras, minimizándose la construcción de nuevas infraestructuras y centrándose en el mantenimiento y renovación de las existentes.

En el caso español, nos encontramos con una red de carreteras consolidada con una adecuada capacidad estructural, pero que se encuentra en un estado deficiente por la falta de inversión en conservación de los últimos años [9]. Las administraciones de carreteras han tenido que



optimizar sus actuaciones ante una disposición de recursos limitada, y una de las actuaciones de conservación a destacar es el extendido de capas finas y ultrafinas. Se trata de una solución cada vez más utilizada que consiste en extender capas de rodadura finas, por debajo de los 3cm de espesor, que permiten restaurar las características superficiales de los pavimentos que se han degradado con el tiempo por el paso de los vehículos y las acciones climáticas, e incluso mejorar la capacidad estructural del firme, a la vez que aumentar su ciclo de vida [10]. Las capas finas y ultrafinas tienen importantes ventajas respecto a otras técnicas de rehabilitación como un coste de ciclo de vida bajo y una mínima afectación al tráfico [11].

En vista de esta situación, se identifica una necesidad de disponer de una herramienta que permita evaluar y comparar distintas mezclas bituminosas, integrando su rendimiento mecánico, funcional y medioambiental. El desarrollo de dicha herramienta favorecerá el empleo de mezclas bituminosas con mayor valor para la sociedad y el entorno, e incluso podría convertirse en un incentivo para la Industria de cara al diseño de mezclas más seguras y sostenibles.

## **1.2. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN**

El objetivo principal de esta tesis doctoral es desarrollar un sistema integral de categorización o etiquetaje de mezclas bituminosas empleadas en capas de rodadura finas y ultrafinas en función de sus prestaciones. Dicho sistema no sólo incorporará propiedades mecánicas, sino que por primera vez, además de criterios de durabilidad, también incluirá criterios ambientales y de seguridad.

Además de las propiedades habituales en los pliegos de prescripción, se buscará incluir aspectos como la resistencia a la fisuración, el ruido de rodadura o el fenómeno de proyección y pulverización de agua, *splash&spray*, que se produce en situaciones de mala climatología, entre otros.

## **1.3. ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO**

El desarrollo de una herramienta flexible que permita a las Administraciones de Carreteras una rápida evaluación del comportamiento mecánico, funcional y ambiental de la mezcla diseñada promoverá la optimización de las superficies de rodadura. El desarrollo de un sistema de categorización en función del rendimiento supondrá un cambio en la toma de decisiones de los



distintos actores, tal y como lo hicieron las etiquetas energéticas de los electrodomésticos hará unos años [12][13].

Originalmente, creado en Alemania a finales de los años 70, el etiquetado ecológico ha desempeñado un papel importante en la expansión de bienes respetuosos con el medio ambiente. Se trata de una herramienta cuyo principal objetivo es alentar a los consumidores a reducir el consumo masivo y hacer un uso sostenible de los recursos [14]. Las etiquetas ecológicas deben brindar al comprador información sobre los impactos ambientales de los productos y permitir comparar entre ellos [15][16]. De hecho, pueden ayudar a cambiar patrones de consumo estimulando compras más sostenibles y al mismo tiempo, promover el incremento de los estándares ambientales en la industria [17].

En el caso de las etiquetas energéticas, no fue hasta el año 1995 cuando finalmente se implantaron a raíz de una propuesta de la Unión Europea para incidir en la decisión de compra de los consumidores de electrodomésticos, aparatos de climatización y calderas, con la finalidad de promover aquellos que sean más eficientes energéticamente [18]. Inicialmente la clasificación iba de la letra A (más eficiente) a la G (menos eficiente), y la etiqueta proporcionaba información acerca de la clasificación de la eficiencia energética, el consumo (kWh) y el ruido generado (dB). Con los años, la demanda creciente de productos cada vez más sostenibles fomentó un incremento de la eficiencia energética en la industria y esto supuso la creación de nuevas categorías (A+++ , A++ y A+) [19]. De hecho, desde la introducción de estas nuevas categorías, el sistema de etiquetado ha resultado mucho más efectivo en la concienciación entre consumidores durante la adquisición de productos eficientes [20] [21]. Sin duda, la introducción de las etiquetas energéticas ha aumentado decisivamente la competitividad en la industria y su impacto en la innovación [22] [23].

Un factor a destacar en el éxito de este sistema ha sido el uso de recursos nemotécnicos y esquemáticos en el diseño de la etiqueta, compuesta por una escala de color y letras para indicar la categoría de eficiencia energética, que ha facilitado el entendimiento del etiquetado entre usuarios (ver Fig. 1) [24].

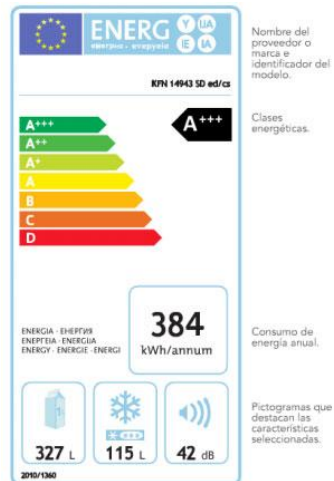


Figura 1 Modelo de etiqueta eficiencia energética

Otro factor importante ha sido la participación de gran parte de los actores interesados (representantes de los distintos fabricantes, autoridades europeas, organizaciones sociales, etc.) en los procesos de toma de decisiones relacionados con el sistema de etiquetado. Esto ha resultado de gran valor para el proceso de diseño del sistema, fomentando la transparencia, el debate sobre estas prácticas y el acceso a información [25]. Este instrumento no sólo ha supuesto un beneficio económico entre los consumidores, sino que la industria ha mejorado su competitividad y ha aumentado su innovación, y el medio ambiente se ha beneficiado del uso de electrodomésticos con menores impactos ambientales [26].

Por todo ello, no es de extrañar que el número de sistemas de etiquetado haya ido en aumento desde sus orígenes, partiendo de una docena en la década de los 90 hasta más de 435 etiquetas en la actualidad [17].

En la industria de la construcción, uno de los sistemas de etiquetado más relevantes es el sistema de clasificación de edificios sostenibles que promueve el uso de soluciones sostenibles tanto en la fase de diseño y construcción, como en la de operación y mantenimiento de nuevos edificios. La edificación representa entre el 30 y 40% del consumo energético total, y este porcentaje crece año tras año debido al crecimiento de la población, el aumento de los servicios y la búsqueda de un mayor confort. Por este motivo, se están aplicando medidas para intentar aumentar la eficiencia energética de los edificios, entre las que destaca la aplicación de políticas que incentivan a los promotores a obtener la certificación energética de sus nuevos proyectos (por ejemplo la obtención de permisos de forma más rápida, subvenciones del gobierno, incentivos fiscales, etc.) [27]. De hecho, los primeros sistemas de certificación

fueron el *Energy Star* y el *Leadership in Energy and Environmental Design (LEED)* en el año 2000, y desde entonces el número de proyectos certificados no ha parado de crecer [28].

A pesar de que la utilidad de esta herramienta está probada, existen muy pocos intentos con éxito de desarrollos de sistemas de etiquetado en la industria de la carretera, probablemente porque se deben considerar múltiples factores que a menudo son difíciles de medir. Uno de estos casos es el proyecto de investigación en curso conocido como *Labelling road surfaces in the Netherlands* [29]. El objetivo de este proyecto es proponer un sistema de etiquetado de capas de rodadura en función de cuatro indicadores: la resistencia al deslizamiento, el ruido de rodadura, la resistencia al rodamiento y la vida útil (ver Fig. 2). De hecho buscan sinergias con el etiquetado de los neumáticos. El proyecto propone hasta 7 categorías, desde la clase A hasta la G, y se centra en las características de los pavimentos holandeses.

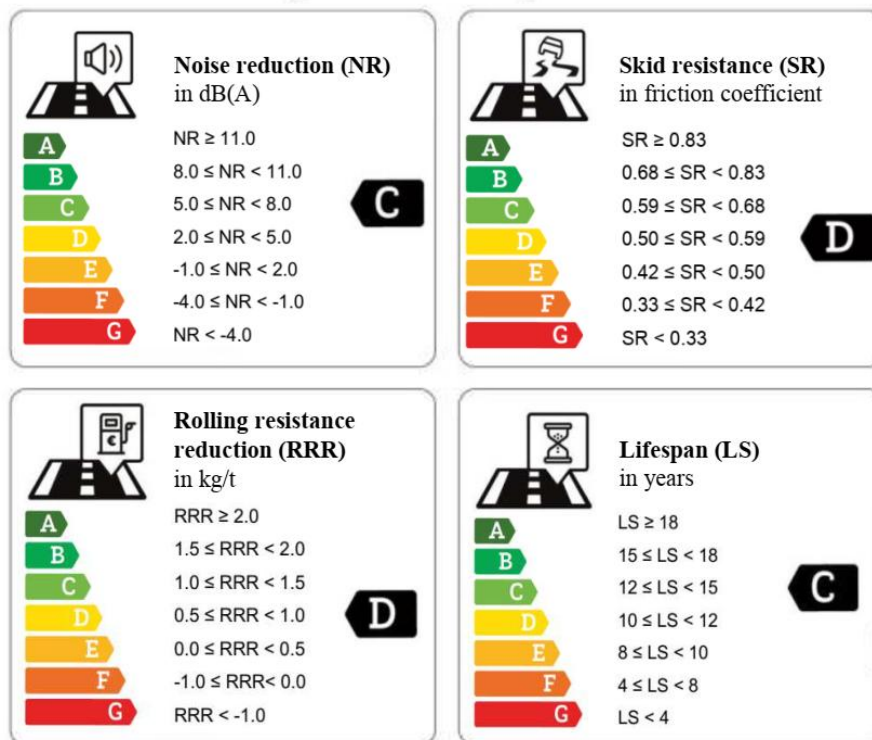


Figura 2 Resultado del sistema de etiquetado del proyecto *Labelling road surfaces in the Netherlands*

Por otro lado, el proyecto de investigación LCE4ROADS pretende establecer un sistema que permita certificar la sostenibilidad de los procesos relacionados con la construcción y explotación de infraestructuras viarias [30]. El proyecto busca desarrollar una metodología que certifique cualquier carretera considerando los tres pilares de la sostenibilidad (ambiental, social y económico) y el desempeño técnico de la misma en función de unos indicadores





establecidos; y que resulte en un documento pre-normativo a nivel europeo sobre la sostenibilidad de las carreteras.

El desarrollo de un sistema de categorización de mezclas bituminosas de acuerdo a su rendimiento mecánico, funcional y ambiental representará una herramienta muy útil en la toma de decisiones por parte de las Administraciones de Carreteras y estimulará el diseño y construcción de pavimentos flexibles con menor coste para la sociedad, puesto que les permitirá ajustar los requisitos de la capa de rodadura a cada situación (por ejemplo mejorar las características superficial en zonas lluviosas).

De hecho, en los últimos años las Administraciones Públicas están dispuestas a reconocer aquellas actuaciones cuya calidad supera los umbrales requeridos por las especificaciones y reconocer estas buenas prácticas en los procesos de licitación [31]. Por ello, este sistema de categorización debería diseñarse de tal forma que permita tanto la valoración positiva como la negativa, que permita la asignación de distintos niveles de aceptación, y que gráficamente resulte sencillo de comprender.



# Capítulo 2

## Metodología

*En este capítulo se expondrá de forma breve el procedimiento seguido para el diseño del sistema de categorización de mezclas bituminosa. Una vez diseñado, se particularizará para el caso Español.*

### **2.1. ESTRUCTURA DEL TRABAJO**

La presente tesis doctoral se centraba en el desarrollo de un sistema de categorización integral de mezclas bituminosas para capas de rodadura finas y ultrafinas que incluya aspectos mecánicos, funcionales y medioambientales. Para lograr dicho objetivo se establecieron cuatro etapas claramente diferenciadas.

En una primera etapa fue necesario generar una extensa base de datos de parámetros estructurales, funcionales y ambientales de las distintas tipologías de mezclas empleadas en capas de rodadura finas y ultrafinas. Para ello, se recopiló información procedente del control de calidad de mezclas puestas en obra en diferentes carreteras proporcionadas por diferentes Administraciones de Carreteras. Durante esta etapa se detectó que no se disponía de información de una propiedad tan importante como la resistencia a la fisuración, dada la falta de un ensayo normalizado para su evaluación.

Por ello, se inició una segunda etapa de trabajo centrada en la evaluación en laboratorio de la resistencia a la fisuración de este tipo de mezclas mediante la utilización de un ensayo específico, el ensayo Fénix.

Aunque de los datos recopilados en la primera etapa se disponía de información sobre la macrotextura y la resistencia al deslizamiento, no se tenían datos sobre otros parámetros que



diferencia el comportamiento de estas mezclas respecto otras convencionales: su capacidad de favorecer la drenabilidad superficial y su capacidad para reducir el ruido de rodadura. Por este motivo se inició una tercera etapa consistente en la auscultación de estas propiedades en tramos de carretera en servicio.

Finalmente, la cuarta y última etapa consistió en analizar estadísticamente todos los datos obtenidos y establecer la metodología de catalogación de mezclas.

## 2.2. DESARROLLO DE LA BASE DE DATOS

Para el desarrollo del sistema de catalogación resultaba indispensable disponer de una extensa base de datos que contemplara todas las posibles prestaciones mecánicas, funcionales y ambientales de las distintas mezclas bituminosas empleadas en capas de rodadura finas y ultrafinas.

Por ello se contactó con distintas Administraciones de Carreteras, tanto a nivel local como estatal, para recoger información procedente del control de calidad de las mezclas puestas en obra tanto en nuevos tramos de carretera como en tareas de renovación.

Los datos recopilados incluían más de 1.500 de controles de calidad en 73 carreteras españolas. Dichos datos incluían tanto información acerca de los parámetros de diseño de las mezclas, como información acerca de sus prestaciones mecánicas y funcionales (ver Tabla 1).

**Tabla 1** Datos recogidos a partir de los ensayos de control de las Administraciones

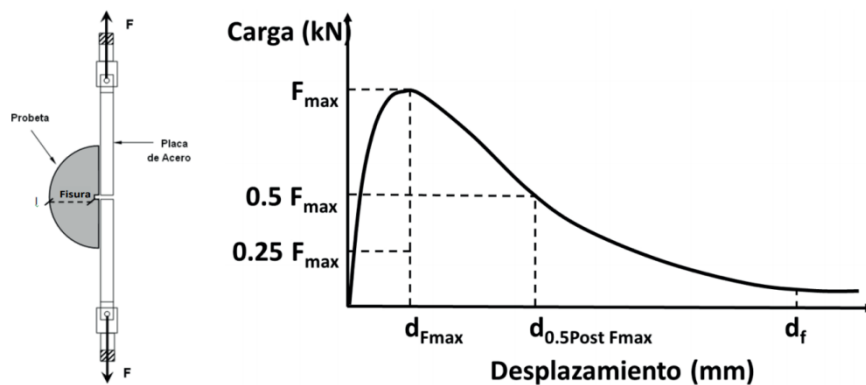
<b>Parámetros de diseño</b>	<b>Propiedades mecánicas y funcionales</b>
Tipología del ligante	Estabilidad y deformación Marshall
Dotación del ligante	Sensibilidad al agua
Naturaleza de los áridos	Pérdida de partículas
Curva granulométrica	Macrotextura
Contenido de filler	Resistencia al deslizamiento
Contenido de huecos	
Densidad de la mezcla	

No obstante, y como era de esperar, no se disponían de datos acerca de la resistencia a la fisuración de las mezclas, el efecto *splash&spray* u otros resultados relativos a sus prestaciones medioambientales, como por ejemplo las emisiones de ruido de rodadura, el empleo de materiales reciclados o de la temperatura de fabricación de la mezcla, puesto que el PG-3 no exigía su control en los criterios de aceptación de la puesta en obra de las mezclas.

Para obtener información de estas propiedades fue necesario planificar un trabajo experimental de laboratorio y de campo.

El objetivo del trabajo experimental de laboratorio consistía en evaluar la resistencia al fallo por fisuración de distintas mezclas para capas de rodadura finas y ultrafinas. Para ello, se estudió la influencia del tipo de ligante bituminoso y la influencia del esqueleto mineral en la resistencia a la fisuración de la mezcla. Se aplicó el ensayo Fénix, desarrollado por el Laboratorio de Caminos de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC), a distintos tipos de mezclas [32].

El ensayo Fénix es un ensayo a tracción en el que una probeta semicircular es sometida a un esfuerzo de tracción directa mediante la aplicación de un desplazamiento a una velocidad constante de 1mm/min hasta llegar a la rotura total, obteniendo una curva carga-desplazamiento a partir de la cual se pueden obtener distintos parámetros relacionados con la resistencia a la fisuración, como pueden ser la energía de fractura, el índice de rigidez a tracción, el desplazamiento al 50% postpico, la resistencia a tracción o el índice de tenacidad (ver Fig. 3) [33].



**Figura 3** Esquema del ensayo y curva carga-desplazamiento obtenida a partir del ensayo Fénix

El primer artículo publicado, titulado “*New approach to characterize cracking resistance of asphalt binders*”, presenta los resultados de la primera fase del trabajo experimental, el estudio de la influencia del tipo de betún en las mezclas bituminosas y su envejecimiento. En particular, para aislar el efecto del ligante en la resistencia a fisuración de una mezcla se diseñó una mezcla patrón con mismo tipo y granulometría de áridos, sin finos ni filler, y un contenido fijo de betún, con un alto contenido de huecos, de manera que la cohesión de la mezcla la proporcionara solamente el ligante. Así, variando el tipo de betún podrá observarse el efecto de éste sobre la resistencia a fisuración. Se estudiaron hasta cinco tipos distintos de ligante

(cuatro ligantes convencionales B160/220, B70/100, B35/50 y B15/25, y un ligante modificado con polímeros PMB 45/80-65) a distintas temperaturas, e incluso dos de ellos fueron sometidos a envejecimiento para detectar posibles cambios de comportamiento (B35/50 y PMB 45/80-65).

Los resultados obtenidos demostraron las grandes diferencias de comportamiento entre los distintos ligantes en función de su índice de penetración y su susceptibilidad térmica (ver Fig. 4); y por lo tanto la importancia de seleccionar una tipología adecuada de ligante en función de las características ambientales del entorno en el que se extenderá la mezcla.

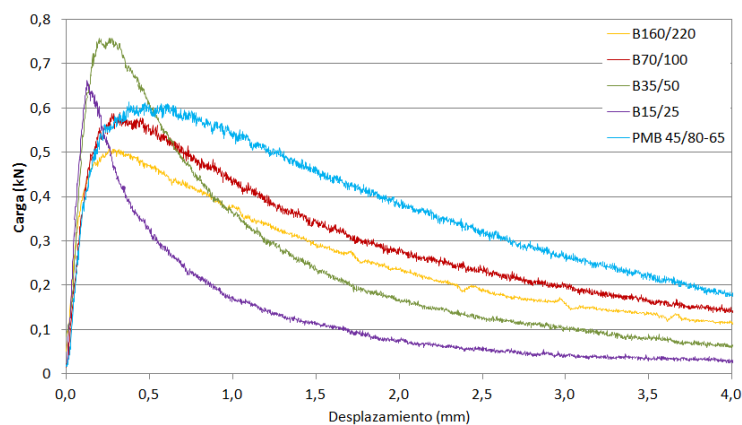


Figura 4 Curva carga-desplazamiento obtenida a una temperatura de 5°C

Además se constató cómo el envejecimiento de los ligantes bituminosos provoca un aumento de la rigidez lo que conlleva una reducción de la resistencia a la fisuración, siendo este efecto más pronunciado en los ligantes con mayor índice de penetración. Asimismo, el envejecimiento de los ligantes también supone una disminución de su susceptibilidad térmica.

El segundo artículo, titulado *"Evaluating the role of aggregate gradation on cracking performance of asphalt concrete for thin overlays"*, recoge los resultados del estudio de la influencia del esqueleto mineral en la resistencia a la fisuración de las mezclas. En particular este estudio se dividió en dos líneas de investigación: (1) el estudio de la influencia del contenido de finos y (2) el estudio del efecto del tamaño máximo de árido, y se intentó hallar correlaciones entre los distintos parámetros de fisuración y las distintas variables independientes (tipología de betún, temperatura, contenido de finos y tamaño máximo).

En el caso de la estudio del efecto del contenido de finos se diseñaron y ensayaron hasta seis mezclas diferentes con tres granulometrías distintas (denominadas F1, F2, F3) con mismo tamaño máximo de árido y dos tipologías de ligante (B35/50 y PMB 45/80-65), pero con el mismo contenido (ver Fig. 5). Por otro lado, en el estudio de la influencia del tamaño máximo,

se diseñaron hasta ocho mezclas distintas con cuatro granulometrías distintas (denominadas S1, S2, S3 y S4) con mismo contenido de finos y dos tipologías de ligante (B35/50 y PMB 45/80-65), pero con el mismo contenido (ver Fig. 6).

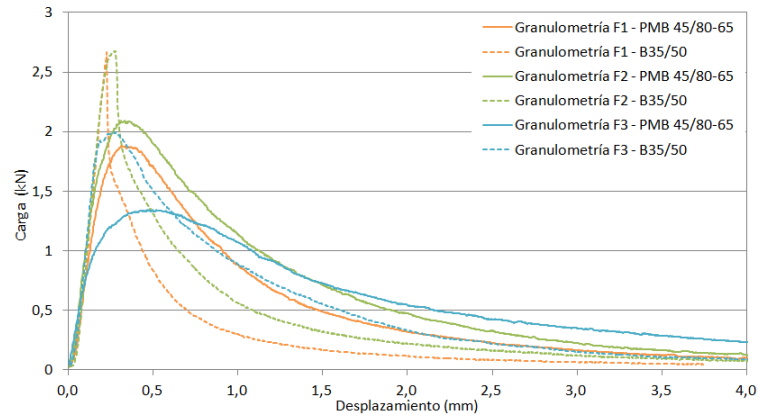


Figura 5 Curva carga-desplazamiento obtenida en el estudio de los finos a una temperatura de 5°C

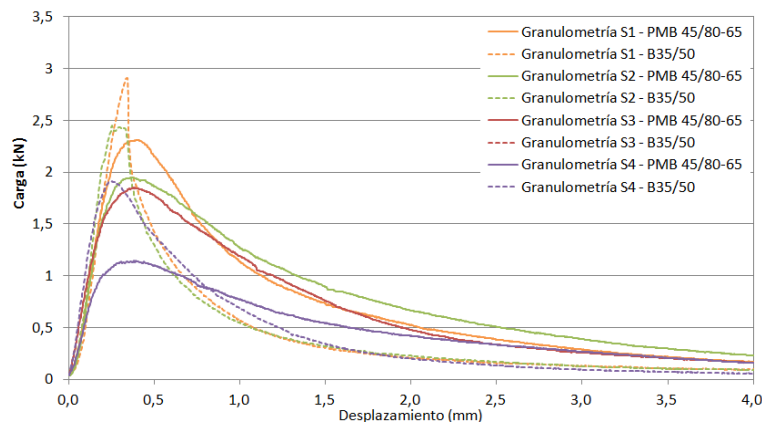
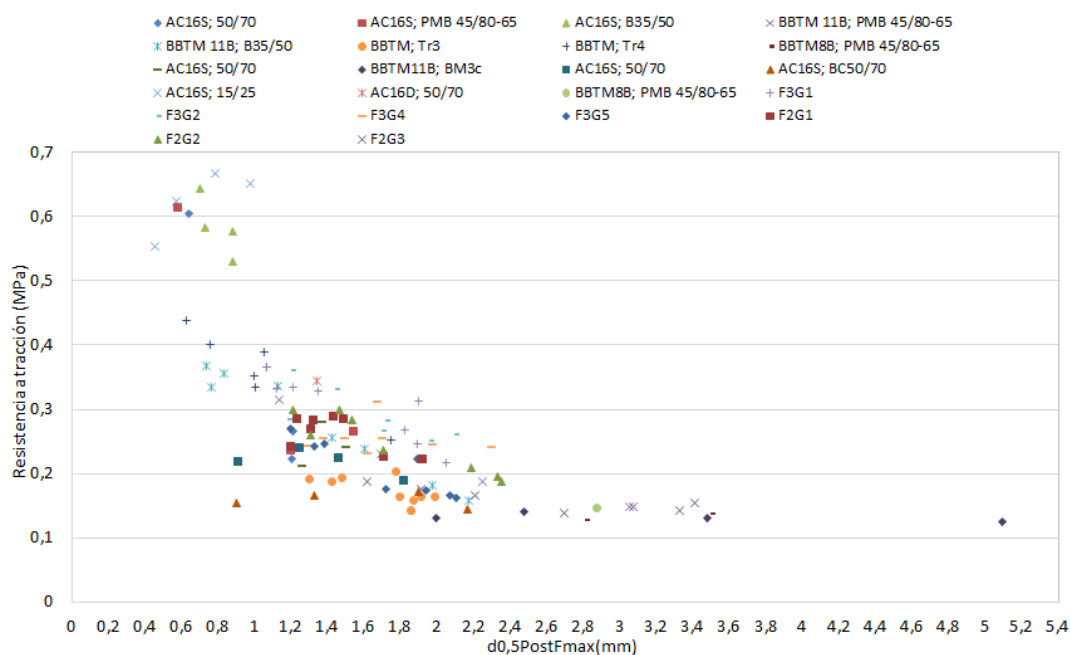


Figura 6 Curva carga-desplazamiento obtenida en el estudio de los áridos máximos a una temperatura de 5°C

Las correlaciones obtenidas demostraron que no sólo la temperatura y la tipología de ligante bituminoso afectan a la resistencia a la fisuración de las mezclas, sino que el contenido de finos y el tamaño máximo de áridos también ejercen una importante influencia a tener en cuenta. De hecho se observó que a menor contenido de finos la mezcla presentaba mayor ductilidad, y a medida que se incrementa el tamaño máximo también lo hacía la rigidez de la mezcla.

Con todo esto, se pudo disponer de datos sobre la resistencia a fisuración, no presentes en los resultados de control de calidad proporcionados por las Administraciones. En la figura 7 se grafican los valores de dos de los parámetros obtenidos del ensayo Fénix. En el eje vertical se representan los datos de la resistencia a tracción, que da idea de la cohesión proporcionada por el mástico asfáltico a la mezcla, mientras que en el eje horizontal se representa el desplazamiento al 50% postpico, que da una idea de la ductilidad de la mezcla.



**Figura 7** Datos sobre la resistencia a la fisuración a 20°C: resistencia a tracción vs. desplazamiento al 50% postpico

Por otro lado, el trabajo de campo consistió en auscultar diversos tramos de carretera, fabricados con distintas mezclas bituminosas en la capa de rodadura, para obtener información acerca de su respuesta a la drenabilidad superficial o a la proyección (splash) y pulverización de agua (spray), así como su generación de ruido de rodadura. Además se aprovechó para obtener información sobre su macrotextura y resistencia al deslizamiento para complementar la base de datos. Se seleccionaron tramos con tráfico y edades similares que pertenecían a la red de carreteras de la Diputación de Barcelona con mezclas bituminosas muy distintas (mezclas densas, mezclas discontinuas y mezclas especiales (Rugofir®) (ver Tabla 2).

**Tabla 2** Tramos auscultados

Carretera	Mezcla	PK inicial (m)	PK final (m)	Tramo
BP-2121	F-10	1+000	7+000	Vilafranca del Penedès - Pacs del Penedès
C-1414	Rugofir®	3+000	1+000	Esparreguera – Olesa de Montserrat
C-243a	S-12	0+000	3+000	Sant Sadurní d’Anoia – Vilafranca del Penedès
C-17	M-10	15+000	21+000	Parets del Vallés – La Garriga

La medición del “Splash&spray” se realizó con el equipo desarrollado por Euroconsult y la UPC basado en el principio de medida del drenómetro a velocidad de tráfico [34]. El equipo está formado por un tanque remolcado que libera un caudal de agua constante justo delante de

una rueda estándar, y mediante una cámara de alta resolución se registra el número de gotas que cruzan cierto plano marcado por un láser (ver Fig. 8).



Figura 8 Detalles del equipo de medición del “Splash & Spray” de Euroconsult

En la siguiente figura se muestran la evolución del número de gotas a medida que se ausculta el tramo de carretera.

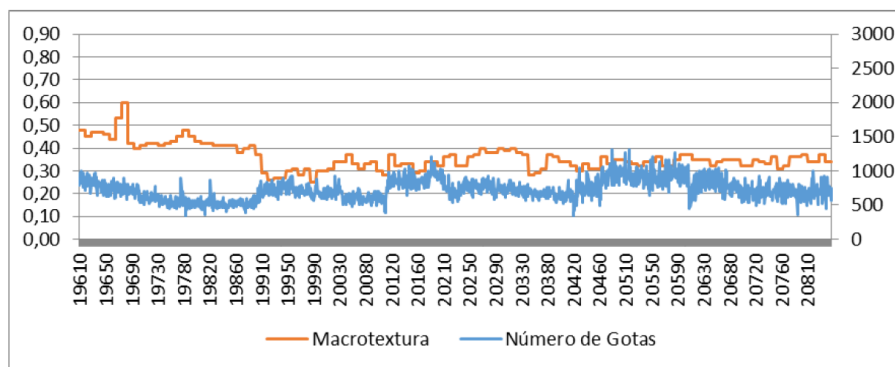


Figura 9 Resultados de la medición del número de gotas y su correlación con la textura

La medición del ruido se realizó siguiendo el método Close Proximity (CPX) con el equipo desarrollado por el Laboratorio de Acústica Aplicada a la Ingeniería Civil de la Universidad de Castilla La-Mancha (LA<sup>2</sup>IC-UCLM) (ver Fig. 10) [35].



Figura 10 Detalles del equipo de medición del ruido de rodadura de LA2IC-UCLM

En la figura 11 se muestran los resultados obtenidos, tanto de niveles sonoros como textura, durante la auscultación del tramo de la carretera C-243a.



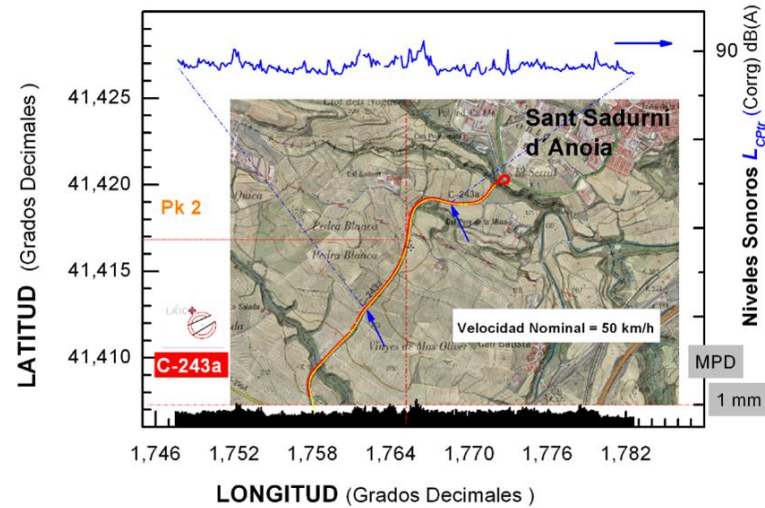


Figura 11 Resultados de la auscultación acústica en el tramo C-243a entre los PK 1+000 y PK 2+500

Por otro lado, la resistencia al deslizamiento y macrotextura se midieron con el equipo SCRIM de Applus+. La siguiente figura muestra los datos recogidos durante la medición en un tramo de la carretera BP-2121; se puede apreciar que a pesar de que se trata un tramo recientemente renovado la media de macrotextura se sitúa por debajo los 1,1mm requeridos por el PG-3.

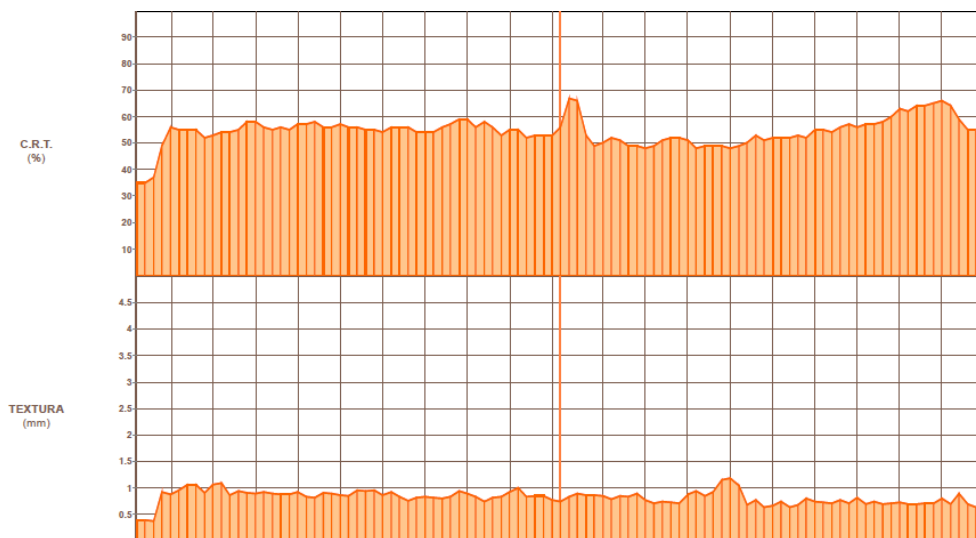


Figura 12 Resultados de la medición del CRT y textura en el tramo BP-2121 entre los PK 4+000 y PK 6+094 (Applus+)

A partir de toda la información obtenida, tanto del trabajo de laboratorio como la recopilada en las tareas de auscultación, se completó la base de datos generada.

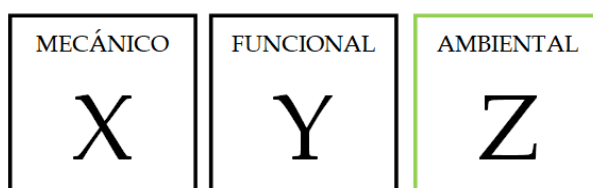
### 2.3. SISTEMA DE CATEGORIZACIÓN

Una vez completada la base de datos se procedió al diseño del sistema de categorización. Para ello, el primer paso fue clasificar cada propiedad en la categoría correspondiente (ver Tabla 3).

**Tabla 3** Listado de propiedades a considerar en cada categoría

Categoría	Propiedades	Indicadores
Rendimiento mecánico	Estabilidad	Estabilidad Marshall Deformación Marshall
	Pérdida de partículas	Pérdida de partículas (%)
	Sensibilidad al agua	Resistencia conservada (%)
	Resistencia a la fisuración	Resistencia a tracción (kN) Desplazamiento al 50% postpico
Rendimiento funcional	Macrotextura superficial	MTD (mm)
	Resistencia al deslizamiento	CRT (%)
	Splash & spray	Número de gotas
Rendimiento ambiental	Ruido de rodadura	Coefficiente de absorción acústica (dBA)
	Temperatura de producción de la mezcla	Temperatura de mezclado (°C)
	Reciclado de pavimentos asfálticos (RAP)	Porcentaje de RAP utilizado (s/m) (%)
	Uso de material reciclados	Sí / No

El objetivo final del sistema desarrollado es categorizar cualquier mezcla bituminosa para capas finas y ultrafinas en función de su rendimiento, obteniéndose así un calificativo compuesto de tres etiquetas que representan el comportamiento mecánico, funcional y ambiental respectivamente (ver Fig. 13).



**Figura 13** Calificación global final de cada mezcla

El procedimiento de categorización se basa en la obtención previa del nivel de rendimiento de cada una de las propiedades de estudio, para posteriormente obtener una etiqueta global de todas las propiedades que conforman cada categoría.

Se eligió un sistema de categorización similar al etiquetado energético de los electrodomésticos pero con cuatro niveles distintos de rendimiento (ver Fig. 14).

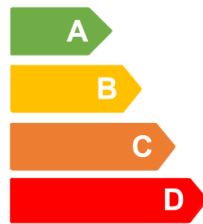


Figura 14 Niveles de rendimiento

La categoría A representa la excelencia, la B implica buenas prácticas, la C un nivel aceptable y la categoría D implica que no se alcanzan los niveles mínimos exigidos.

Previo al establecimiento de los límites de cada nivel de etiqueta, los datos de todas las propiedades fueron tratados estadísticamente para detectar y eliminar valores anómalos, conocer rango de valores y establecer su distribución estadística. Para cada indicador de propiedad y en función de la normativa de aplicación, se establecen los límites de la categoría D, es decir aquella categoría que no cumple con lo que marca la normativa y por lo tanto es no aceptable. Por otro lado, los límites entre las distintas categorías aceptables (i.e. C, B y A) se establecen según los siguientes percentiles de su distribución estadística (ver Fig. 15):

- Categoría D: corresponde a todos aquellos valores que no alcanzan los mínimos exigidos por la normativa de aplicación
- Categoría C: representa el 75% del área total por encima del mínimo exigido, o por debajo del máximo exigido según corresponda.
- Categoría B: considera el 70% del 25% del área restante, lo que representa el 17,5% del área
- Categoría A: representa el otro 30% del 25% del área restante, o lo que es lo mismo, el 7,5% de todos los casos probabilísticos que caen en el extremo de la curva.

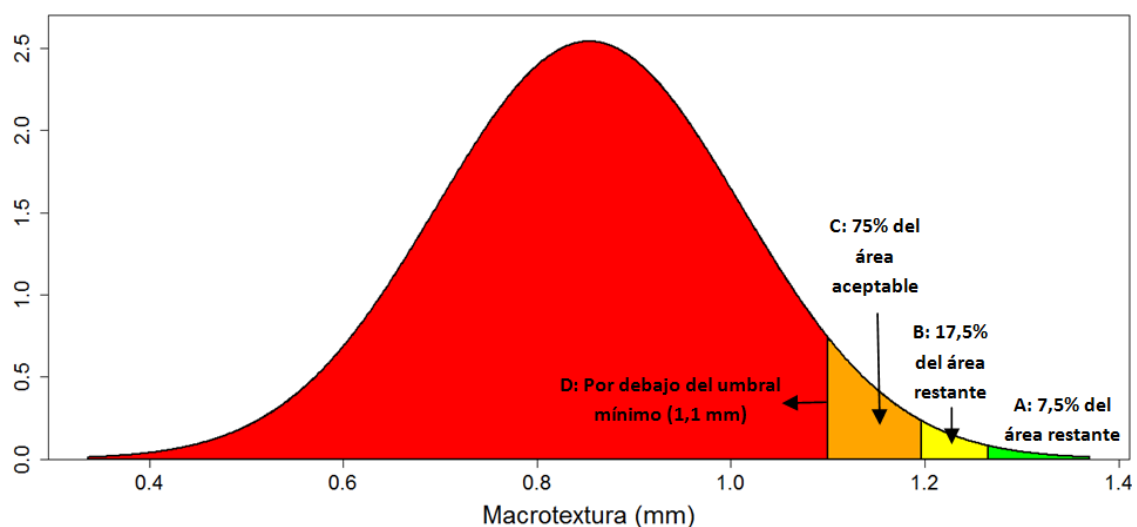


Figura 15 Función de densidad del indicador macrotextura y definición de los límites de los niveles de rendimiento



En el caso que la normativa establezca tanto un límite superior como inferior para una mismo indicador, los límites entre categorías siguen el mismo criterio pero de forma simétrica.

Por otro lado, aquellos indicadores que no siguen ninguna distribución estadística los límites se establecen aplicando los criterios comentados directamente sobre los valores ordenados, no sobre su probabilidad.

Además en aquellos indicadores que la normativa establece distintos umbrales en función de la tipología de mezcla, se definen diferentes límites de niveles con el fin de afinar el rendimiento. Para aquellos casos en que se desconoce la naturaleza de la mezcla, se definen unos niveles generales, que aunque no sería la forma óptima de proceder, permiten establecer un rendimiento aproximado.

Cabe destacar que los límites que definen cada categoría no son fijos sino que varían en función de la información disponible y de la normativa de aplicación, que varía de un país a otro. No obstante la metodología y los criterios para definir los límites se han diseñado con suficiente flexibilidad para ser aplicables en cualquier situación.

Una vez se establecen las distintas etiquetas para cada indicador de propiedad, se procede a la obtención del etiquetado global de cada categoría. Para ello se transforman las etiquetas o categorías cualitativas (i.e. A, B, C y D) en indicadores cuantitativos (i.e. 3, 2, 1 y 0 respectivamente); y se aplica una media geométrica de todos los indicadores de cada categoría. A partir del valor de la media geométrica se procede a la asignación de una etiqueta global para cada grupo. Finalmente, a partir de un sistema combinatorio se asignan los límites entre niveles de rendimiento global a los diferentes tipos de mezclas para capas finas consideradas.

Debe tenerse en cuenta que en el caso de la categoría ambiental en la cual hay propiedades no cuantificables (i.e. el empleo de materiales reciclados) que no admiten una transformación a indicadores cuantitativos, el procedimiento de categorización consistirá en sumar directamente una categoría al etiquetado provisional en el caso en que efectivamente se hayan empleado materiales reciclados.

En la siguiente figura se esquematiza el procedimiento del sistema de categorización:

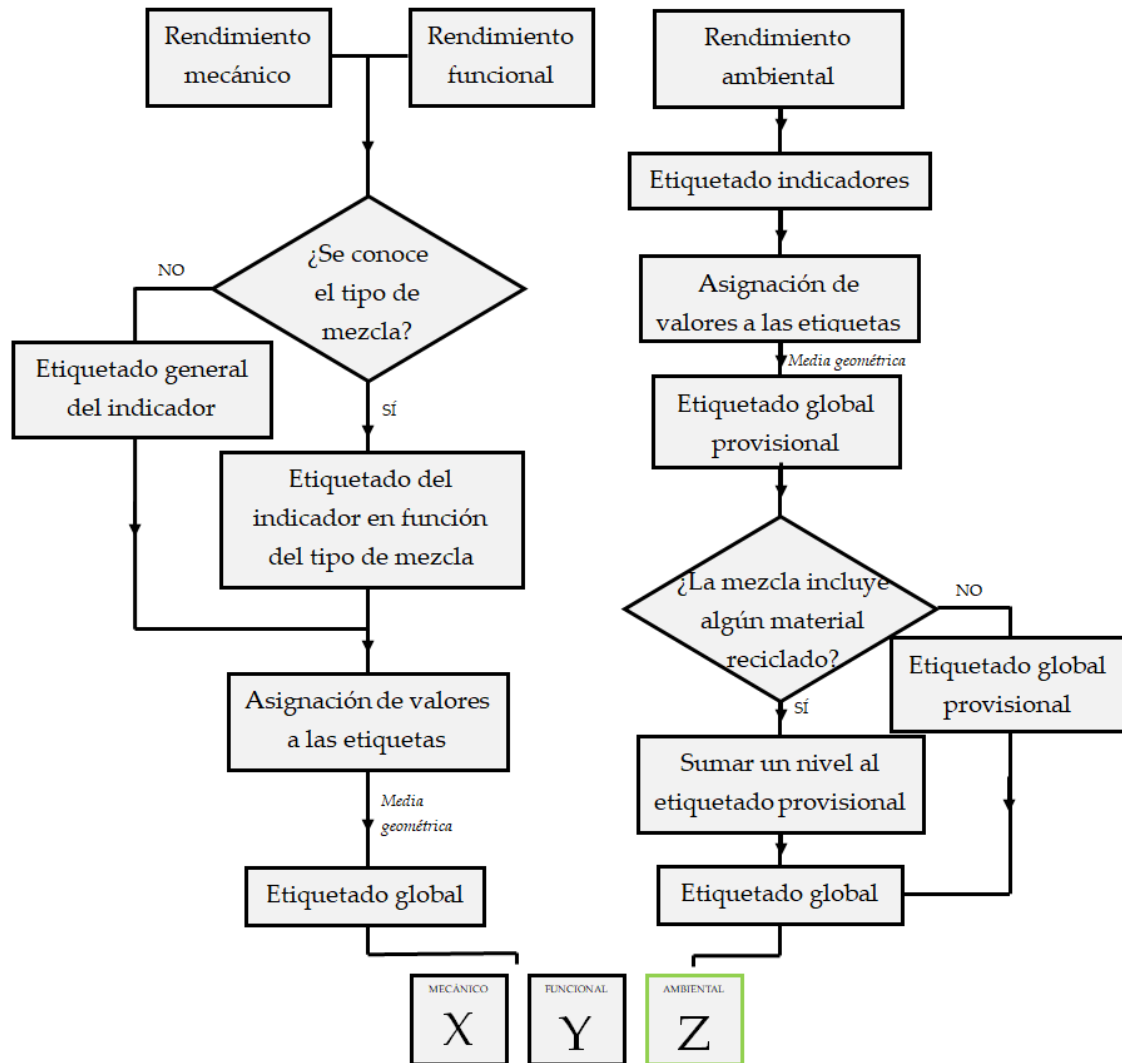


Figura 16 Esquema del proceso de categorización o etiquetado

Resulta importante destacar que la obtención de una categoría D, tanto en el rendimiento mecánico como funcional, implica que no cumple la normativa y por lo tanto dicha mezcla debería ser rechazada, pero en el caso del rendimiento ambiental la etiqueta D tendría un carácter meramente informativo y sólo pretende fomentar el uso de tecnologías sostenibles.

El tercer artículo publicado titulado “*Labelling strategy for evaluating the performance of thin asphalt wearing courses*” no sólo recoge con mayor detalle el diseño del sistema de categorización, sino que a partir de todos los datos recopilados y en base a la normativa española, materializa el sistema de categorización diseñado.

A continuación, y a modo de ejemplo, se mostrará la asignación de límites de etiquetas para la resistencia al deslizamiento o CRT. Cabe destacar que en el caso del CRT el PG-3 establece diferentes umbrales para las mezclas tipo hormigón bituminoso, mezclas discontinuas y

mezclas drenantes. En este caso, el ejemplo se centrará en las mezclas tipo hormigón bituminoso.

En primer lugar se ordenan todos los valores y se eliminan aquellos que resultan anómalos. En el caso del CRT el rango de valores oscilaba entre 42% y 111% (ver Fig. 17).

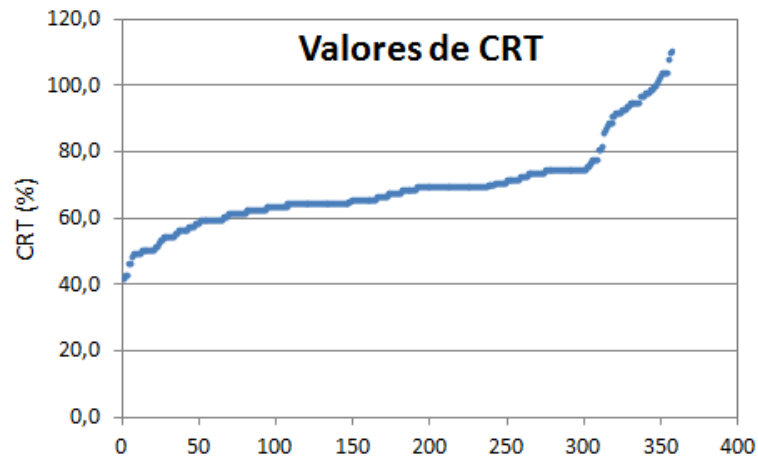


Figura 17 Valores recopilados de CRT en mezclas tipo hormigón bituminoso

En segundo paso se comprueba si la muestra sigue una distribución normal o lognormal a partir de los siguientes indicadores (ver Fig. 18):

- Normalidad del histograma y curva de densidad
- Distribución normal en el Q-Q plot
- Simetría del Boxplot

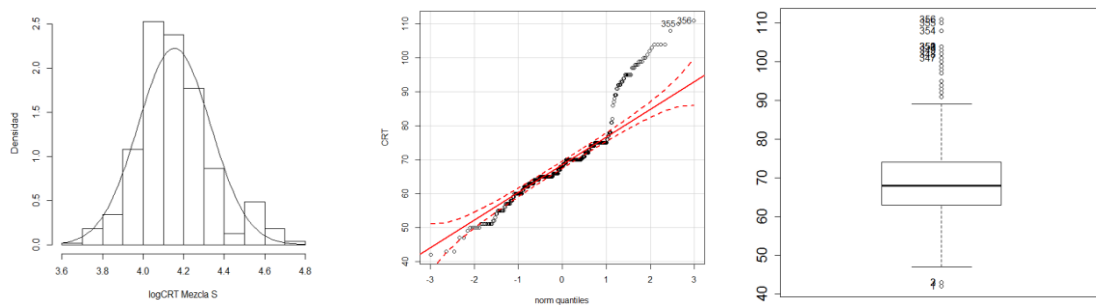


Figura 18 Comprobación de la normalidad de la muestra CRT

Se observa que la muestra sigue una distribución lognormal, por lo que se puede proceder a definir los límites entre los distintos niveles de rendimiento aplicando los percentiles indicados sobre su área de probabilidad.

El PG-3 marca un umbral mínimo para mezclas tipo hormigón bituminoso del 65%, de este modo la categoría D quedaría definida. A partir de este valor, los límites de las etiquetas aceptables se establecen aplicando los criterios definidos sobre el área de probabilidad

restante. El área superior al 65% se divide de manera que la categoría C represente el 75% del área de los valores seguidamente superiores al 65%, la categoría B el 17,5% y finalmente la categoría A represente el 7,5% del área aceptable superior (ver Fig. 19).

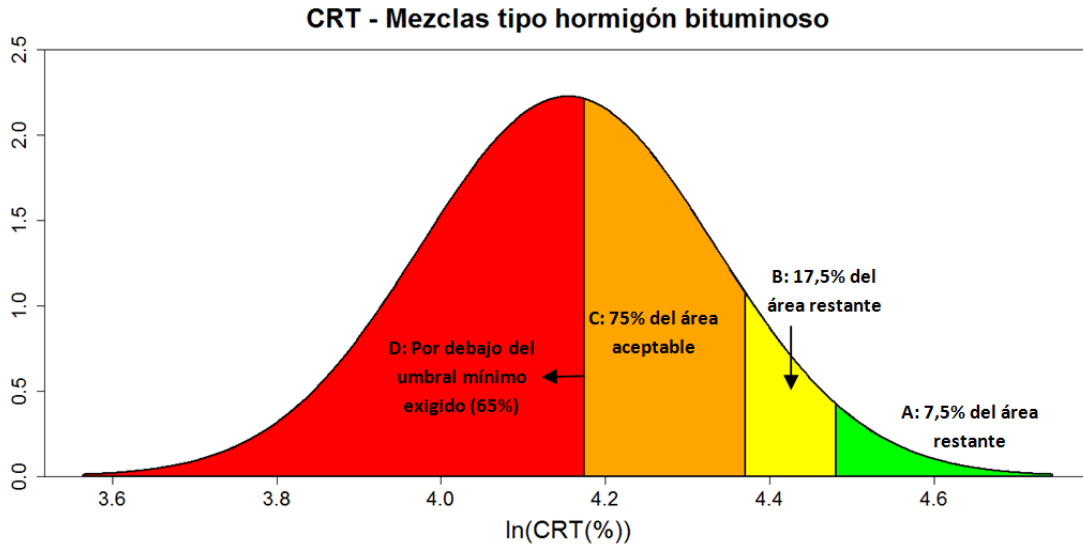


Figura 19 Definición de los límites en la curva de densidad del CRT

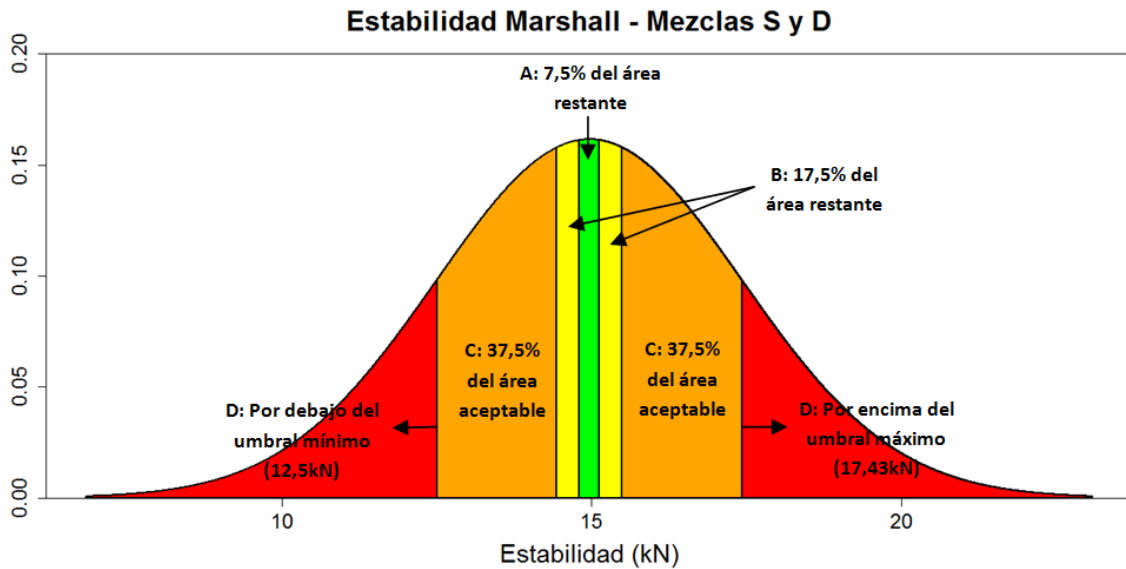
Siguiendo estos criterios, los límites de las etiquetas para el indicador CRT quedarían según se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 4 Límites de las etiquetas para la CRT en mezclas tipo hormigón bituminoso

Etiquetas CRT (%)	A	B	C	D
Mezclas AC, S y D	>88,3%	79,1 – 88,3%	65 – 79,1%	<65%
	Excelente	Buena	Aceptable	No aceptable

La definición de los límites en los indicadores de estabilidad Marshall y deformación Marshall presenta ciertas particularidades interesantes de destacar. En el caso de la estabilidad Marshall, el PG-3 marca un umbral mínimo de 12,5kN en mezclas tipo hormigón bituminoso para categorías de tráfico de T1 y T2. De esta exigencia podría entenderse que, a mayor estabilidad, mejor comportamiento de la mezcla. No obstante, este razonamiento no sería del todo correcto en el caso de mezclas para capas finas puesto que una estabilidad muy elevada resultaría en una mezcla excesivamente rígida y frágil, lo que implicaría una rápida rotura que penalizaría su durabilidad. Para evitar este suceso, se considerará que, además del mínimo exigido por el PG-3, se marcará una máximo que evite su excesiva rigidización. Dado que el PG-3 no marca ningún umbral superior, se considerará que el percentil 50 corresponde a la estabilidad óptima y se aplicará una simetría para marcar los distintos límites.

A partir del percentil 50 (14,96kN) se define una simetría y se establece el límite superior de la categoría D. El área restante se divide de forma simétrica de manera que la categoría A represente el 7,5% del área aceptable, la categoría B el 17,5% y la categoría C represente el 75% (ver Fig. 20).



**Figura 20** Definición de los límites en la curva de densidad de la estabilidad Marshall

De esta forma los límites entre niveles de la estabilidad Marshall para mezclas tipo hormigón bituminoso quedaría definidos según la siguiente tabla:

**Tabla 5** Límites de las etiquetas para la estabilidad Marshall en mezclas tipo hormigón bituminoso para T1 y T2

Etiquetas Estabilidad (kN)	A	B	C	D
Mezclas S y D	14,80 – 15,12	14,43 – 14,80 U 15,12 – 15,49	12,50 – 14,43 U 15,49 – 17,43	$\leq 12,50$ U $\geq 17,43$
	Excelente	Buena	Aceptable	No aceptable

La definición de límites para la deformación Marshall se realizaría de forma análoga, aunque en este caso el propio PG-3 define tanto el umbral mínimo, como el máximo.





## Capítulo 3

### Discusión resultados y conclusiones

*En este capítulo se expondrán los resultados obtenidos, y en particular a través de un ejemplo de mezcla bituminosa se procederá a su catalogación siguiendo la metodología introducida en el capítulo anterior. Finalmente se extraerán las conclusiones del trabajo realizado así como se propondrán futuras líneas de investigación.*

#### **3.1. RESULTADOS OBTENIDOS**

En el capítulo 2 se ha presentado la metodología a seguir para el diseño de un sistema integral de catalogación de mezclas bituminosas para capas finas y ultrafinas de rodadura, y como se ha mencionado, se trata de una metodología ajustable a las particularidades de cada país puesto que la normativa a seguir, umbrales mínimos, tipologías de mezcla, procedimientos constructivos, materiales empleados, condiciones climáticas, edad de los pavimentos, tráfico o actuaciones de preservación difieren de un país a otro.

En el artículo titulado "*Labelling strategy for evaluating the performance of thin asphalt wearing courses*", a partir de la base de datos generada, se aplica esta metodología al caso español y se definen todas las etiquetas de cada indicador, así como los rangos del etiquetado global.

A continuación se presentaran la totalidad de las etiquetas obtenidas de la aplicación de la metodología desarrollada a la base de datos generada en esta investigación, que no solo incluye los resultados de los controles de calidad de carreteras españolas, sino también los resultados obtenidos en la fase de laboratorio y de auscultación (ver Fig. 21 a 31):

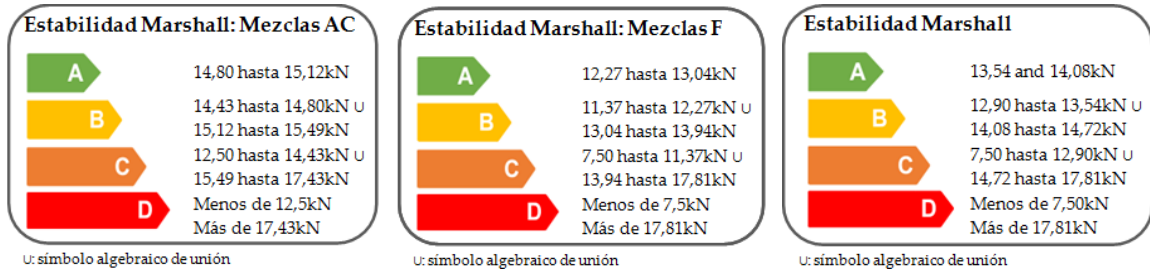


Figura 21 Etiquetas para la estabilidad Marshall en mezclas tipo AC (izquierda), mezclas tipo F (centro) y la etiqueta general (derecha)

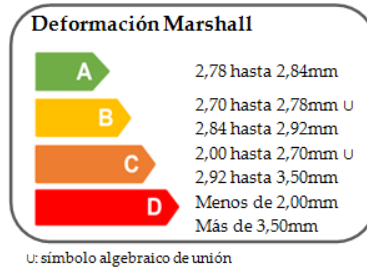


Figura 22 Etiqueta para la deformación Marshall en mezclas AC

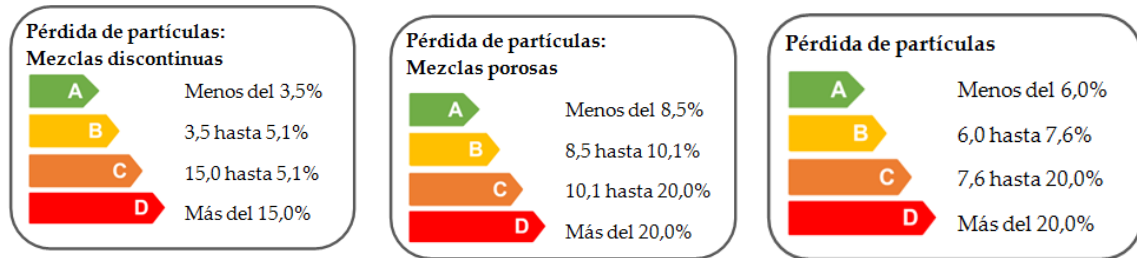


Figura 23 Etiquetas para la pérdida de partículas en mezclas tipo discontinuas (izquierda), mezclas tipo drenantes (centro) y la etiqueta general (derecha)

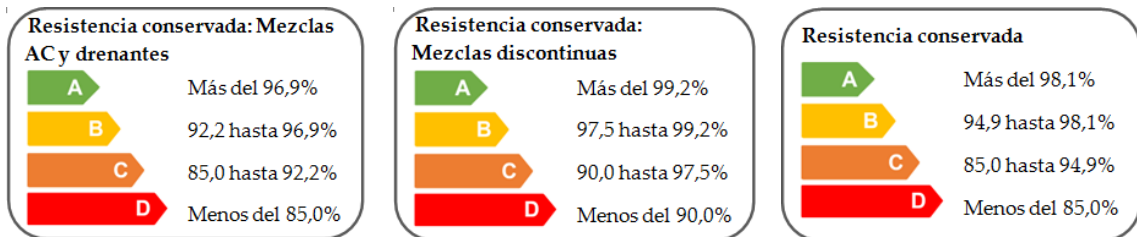


Figura 24 Etiquetas para la resistencia conservada en mezclas tipo AC y drenantes (izquierda), mezclas tipo discontinuas (centro) y la etiqueta general (derecha)

En el caso de la resistencia a la fisuración se consideran dos parámetros que deben ser satisfechos al mismo tiempo: la resistencia a tracción y el desplazamiento postpico que corresponde al 50% de la fuerza máxima ( $d_{0,5PostFmax}$ ). En el caso que se obtengan niveles distintos para cada propiedad, el nivel que marcará la propiedad será siempre el más restrictivo (ver Fig. 25).

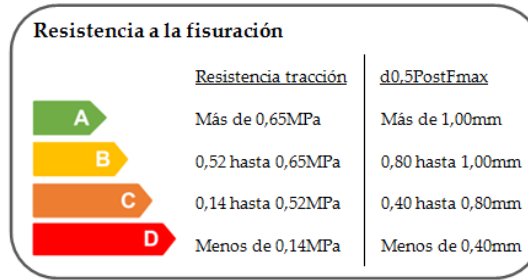


Figura 25 Etiqueta para la resistencia a la fisuración

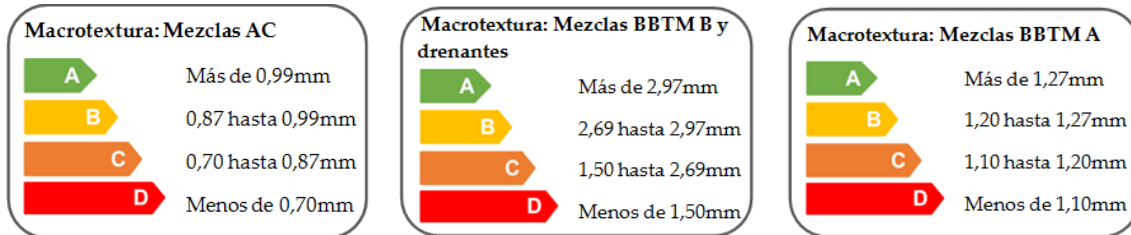


Figura 26 Etiquetas para la macrotextura en mezclas tipo AC (izquierda), mezclas tipo BBTM A y drenantes (centro) y mezclas tipo BBTM B (derecha)

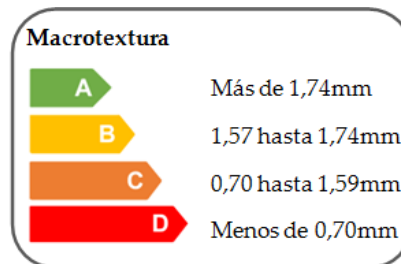


Figura 27 Etiqueta general de la macrotextura

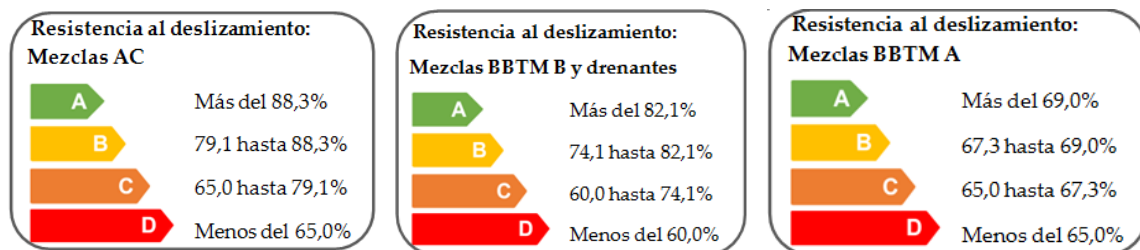


Figura 28 Etiquetas para la resistencia al deslizamiento a en mezclas tipo AC (izquierda), mezclas tipo BBTM A y drenantes (centro) y mezclas tipo BBTM B (derecha)

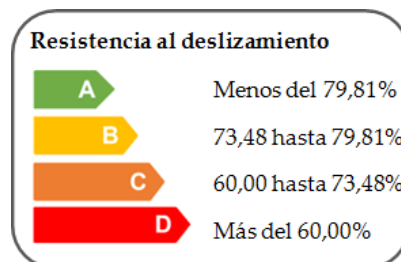


Figura 29 Etiqueta general de la resistencia al deslizamiento

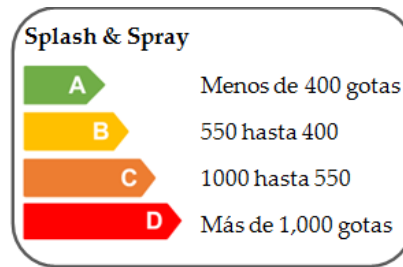


Figura 30 Etiqueta para el efecto splash&amp;spray

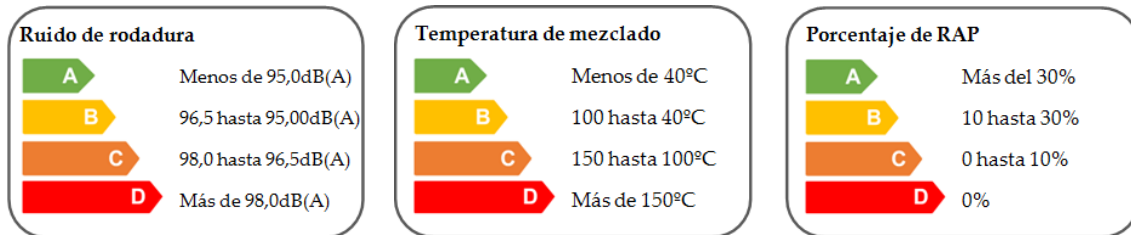


Figura 31 Etiquetas para las propiedades ambientales

Cabe recordar que los límites de cada una de las etiquetas están particularizados para la base de datos generada. La ampliación de la misma podría suponer algunas variaciones en su distribución estadística y por lo tanto, en la redefinición de los límites de los niveles aceptables.

Como se ha comentado, una vez se obtienen las etiquetas de cada propiedad se procede a la determinación del rendimiento global de cada categoría a partir de una media geométrica. La siguiente figura presenta los niveles de rendimiento globales en función del valor resultante de la media (ver Fig. 32).

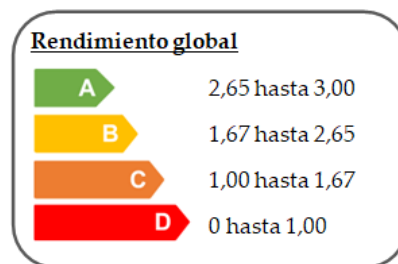


Figura 32 Niveles de rendimiento globales

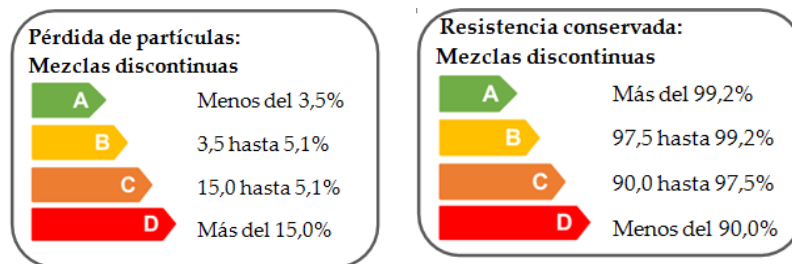
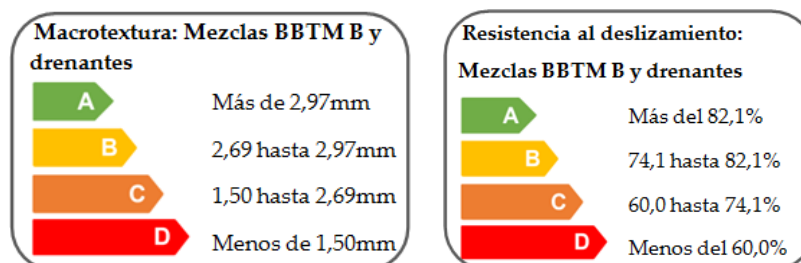
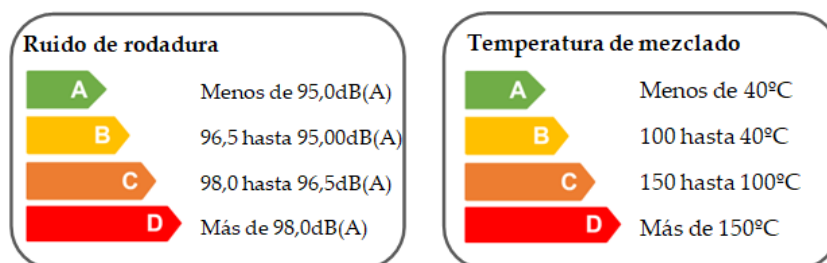
### 3.2. VALIDACIÓN DE RESULTADOS

Con el fin de validar los resultados obtenidos y demostrar el potencial de la herramienta desarrollada, se procede a la catalogación de dos mezclas bituminosas discontinuas extendidas en distintas carreteras locales (ver Tabla 6).

**Tabla 6** Parámetros de diseño y propiedades de las mezclas 1 y 2

	<b>Mezcla 1</b>	<b>Mezcla 2</b>
Tipología de ligante	Betún modificado con polímeros	Betún modificado con caucho
Contenido de ligante (%) (s/a)	5,28%	5,25%
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	2,120	2,185
Contenido de huecos (%) (s/m)	16,2%	14,2%
Tipología de mezcla	BBTM B	BBTM B
Pérdida de partículas (%)	4,2%	4,9%
Resistencia conservada (%)	92,7%	93,4%
Macrotextura (mm)	1,06 mm	1,08 mm
Resistencia al deslizamiento (%)	56,8%	53,7%
Coef. absorción acústica (dB(A))	85,55dB(A)	86,96dB(A)
Temperatura de mezclado (°C)	>150°C	>150°C
Uso materiales reciclados	NO	SÍ

Al ser conocida la tipología de mezcla, a continuación se expondrán los niveles de rendimiento de los distintos indicadores de interés obtenidos en el presente trabajo (ver Fig. 33, 34 y 35).

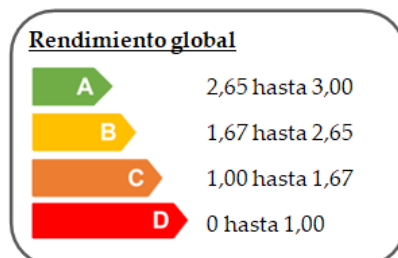

**Figura 33** Etiquetas de la pérdida de partículas y la resistencia conservada para mezclas discontinuas

**Figura 34** Etiquetas de macrotextura y resistencia al deslizamiento para mezclas tipo BBTM B

**Figura 35** Etiquetas de ruido de rodadura y temperatura de mezclado

Conocidos los valores de los distintos indicadores y las etiquetas establecidas para cada uno de ellos, se procede a su etiquetado, su transformación en indicadores cuantitativos y el cálculo de la media geométrica de cada categoría (ver Tabla 7).

**Tabla 7** Proceso de etiquetado de las mezclas

Categoría	Indicadores		Etiquetado del indicador		Asignación valores numéricos		Media geométrica	
	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 1	Mezcla 2
<b>Rendimiento mecánico</b>								
Pérdida de partículas (%)	4,2	4,9	A	A	3	3	1,73	1,73
Resistencia conservada (%)	92,7	93,4	C	C	1	1		
<b>Rendimiento funcional</b>								
MTD (mm)	1,06	1,08	D	D	0	0	0	0
CRT (%)	56,8	53,7	D	D	0	0		
<b>Rendimiento ambiental</b>								
Coef. absorción acústica (dB(A))	85,55	86,96	A	A	3	3		
Temperatura de mezclado (°C)	>150	>150	D	D	0	0	0	0+
Uso de materiales reciclados	NO	SÍ		+		+		

Una vez obtenida la media geométrica, se procede al etiquetado global en función de los distintos niveles de rendimiento definidos (Fig. 36).


**Figura 36** Niveles de rendimiento globales

Se comprueba que ambas mezclas obtienen la misma categoría, tanto en el caso del rendimiento mecánico como funcional, pero se observan diferencias significativas en el caso del comportamiento ambiental (ver Fig. 37 y 38). Dado que la mezcla 2 incorpora polvo de caucho en el ligante, sí que se consideraría que la mezcla emplea materiales reciclados y por ello la etiqueta de la categoría ambiental procedente de la media geométrica es aumentada un nivel, pasado de nivel D a C. En el caso de la mezcla 1, al no incorporar ningún material reciclado el nivel de rendimiento obtenido no se modifica.

MECÁNICO <b>B</b>	FUNCIONAL <b>D</b>	AMBIENTAL <b>D</b>
----------------------	-----------------------	-----------------------

Figura 37 Catalogación final de la mezcla 1

MECÁNICO <b>B</b>	FUNCIONAL <b>D</b>	AMBIENTAL <b>C</b>
----------------------	-----------------------	-----------------------

Figura 38 Catalogación final de la mezcla 2

Aunque la mezcla 2 presenta un comportamiento ambiental mejorado, ambas mezclas se deberían haber rechazado porque no cumplen los requisitos mínimos de textura y resistencia al deslizamiento exigidos por el PG-3.

### 3.3. CONCLUSIONES

Los procedimientos para el diseño de mezclas asfálticas habitualmente utilizados en España están basados en parámetros volumétricos y en el cumplimiento de ciertas propiedades mecánicas y funcionales, pero no tienen en cuenta propiedades de las mezclas tan importantes como la resistencia a la fisuración o, en menor medida, su rendimiento ambiental. De hecho, aun teniéndose en cuenta algunas propiedades ambientales se considera que su peso es menor en relación a las otras propiedades, dado que no se potencia explícitamente su uso. Por todo ello, el desarrollo de una herramienta que permita alcanzar el equilibrio entre las propiedades mecánicas, funcionales y ambientales en el diseño y la selección de las mezclas bituminosas, especialmente las destinadas a la capa de rodadura, se considera de interés general porque permitirá la optimización de los pavimentos.

De hecho, en los últimos años las Administraciones están intentando bonificar en los procesos de licitación aquellas actuaciones que resulten en niveles de calidad muy superiores a los mínimos exigidos o que aporten soluciones con menor impacto ambiental, en línea con el “*Green Public Procurement*” lanzado por la Comisión Europea. Por ello, el desarrollo de una herramienta de catalogación permitirá discernir aquellas actuaciones sobresalientes y contribuirá a la formalización de estas bonificaciones.

El trabajo realizado en la presente tesis doctoral es un primer intento de establecer un sistema integral de categorización de mezclas bituminosas para capas de rodadura finas y ultrafinas en



función de su rendimiento mecánico, funcional y ambiental. El sistema desarrollado permite comparar prestaciones entre distintas mezclas y por lo tanto seleccionar la mezcla óptima adaptada a cada situación específica.

La metodología propuesta ha sido diseñada con suficiente flexibilidad para ser adaptada a cualquier tamaño de base de datos y ajustada a las particularidades de cada país. Por ello, los límites de los diferentes niveles de rendimiento se deben redefinir según la información disponible, y por lo tanto su distribución estadística, y la normativa de aplicación.

En particular, en este primer intento se propone un sistema con cuatro niveles de rendimiento; un nivel que implica el no cumplimiento de los umbrales exigidos por la normativa (D) y tres niveles de aceptación que cubren desde una categoría aceptable hasta la excelencia (C, B y A respectivamente).

El procedimiento de categorización consiste en el etiquetado previo de cada una de las propiedades de interés, para posteriormente obtener el etiquetado global de todas las propiedades que conforman cada categoría a partir de una media geométrica. El empleo de una media geométrica permite penalizar aquellas mezclas que no cumplan la totalidad de los umbrales exigidos por la normativa de aplicación.

Resulta importante destacar que la obtención de un nivel D en la categoría de rendimiento mecánico y funcional implica que la mezcla en cuestión no cumple con los requisitos mínimos exigidos por la normativa, mientras que en el caso de la categoría ambiental solamente tiene un carácter informativo y pretende favorecer el uso de soluciones sostenibles.

Para materializar el sistema de categorización y hacer más comprensible la metodología propuesta se ha particularizado en el caso español, puesto que los datos recopilados pertenecían a la red viaria española. Los resultados obtenidos muestran cómo la categorización de cualquier mezcla bituminosa es factible siguiendo la metodología propuesta, y permite comparar rendimientos entre distintas mezclas.

Asimismo, también deben mencionarse las limitaciones a las que se ha hecho frente cómo la recopilación de información ciertamente limitada para la creación de la base de datos, o la definición de los percentiles que marcan las fronteras entre los distintos niveles de rendimiento aceptables.





### **3.4. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN**

Con el objetivo de incrementar el potencial de la herramienta desarrollada, se plantea como futura línea de investigación el desarrollo de funciones de predicción de comportamiento. A partir de los datos de diseño y de los valores de los indicadores de las propiedades recopilados se buscarán correlaciones que predigan el comportamiento de la mezcla. De manera que introduciendo los parámetros de diseño de la mezcla el sistema sea capaz de predecir su comportamiento y posteriormente asignar los correspondientes niveles de rendimiento para catalogar la mezcla, logrando así un sistema de diseño integral de mezclas bituminosas para capas de rodadura finas y ultrafinas.



# Capítulo 4

## Artículos

*La presente tesis doctoral se presenta por compendio de publicaciones y en este capítulo se presentan los artículos que la conforman.*

### 4.1. PUBLICACIÓN DE ARTÍCULOS

A continuación se presentan los tres artículos publicados en revistas indexadas que conforman la presente tesis doctoral por compendio de publicaciones:

Garcia-Gil, L., Miró, R., Pérez-Jiménez, F.E., *New approach to characterize cracking resistance of asphalt binders*. Construction and Building Materials, 166 (2018), pp-50-58.

doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.01.086.

Garcia-Gil, L., Miró, R., Pérez-Jiménez, F.E., *Evaluating the role of aggregate gradation on cracking performance of asphalt concrete for thin overlays*. Applied Sciences 9 (4), 628 (2019), pp 1-13. doi: 10.3390/app9040628

Garcia-Gil, L., Miró, R., *Labelling strategy for evaluating the performance of thin asphalt wearing courses*. Applied Sciences 9 (8), 1694 (2019), pp 1-20. doi: 10.3390/app9081694



Tabla 8 Posición de la revistas elegidas

Revista	ISSN	Factor de impacto	Rango	Cuartil	Categoría
Construction and Building Materials	0950-618	3,169	8/61	Q1	Construction & Building Technology
Applied Sciences	2076-3417	1,689	171/285	Q3	Material Science, Multidisciplinary

## 4.2. OTRAS ACTIVIDADES DE DIVULGACIÓN

También se presentaron los trabajos en el XIX Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto (CILA), Colombia, 2017:

Garcia-Gil L., Miró R., Pérez-Jiménez F.E.; *Efecto del tipo de ligante bituminoso y del grado de envejecimiento de la mezcla en su resistencia a la fisuración*. XIX Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto, Medellín (Colombia), 27 de noviembre 2017

Y en el Simposio Nacional de Firmes (SNF2018 – En ruta hacia una economía sostenible), Madrid, 2018:

Garcia-Gil L., Pérez-Jiménez F.E., Miró R.; *Análisis de la evolución de las propiedades: Ductilidad, tenacidad y flexibilidad de los betunes durante su envejecimiento*. Simposio Nacional de Firme, Madrid (España), 16 de octubre de 2018

Paje S.E., Vázquez V.F., Terán F., Huertas P., Garcia-Gil L., Miró R.; *Investigación en auscultación acústica de pavimentos viales*. Simposio Nacional de Firme, Madrid (España), 16 de octubre de 2018



## Referencias

- [1] C. McGovern, P. Rusch y D. Noyce, State practices to reduce wet weather skidding crashes, Washington: Federal Highway Administration U.S. FHWA-SA-11-21, 2011.
- [2] P. Rungruangvirojn y K. Kanitpong, «Measurement of visibility loss due to splash&spray: porous, SMA and conventional asphalt pavements,» *Internation Journal of Pavement Engineering*, pp. 499-510, 2010.
- [3] Zhang, Lepech, Keoleian, Qian y Li, «Dynamic life-cycle modeling of pavement overlay systems: capturing the impacts of users, construction and roadway deterioration,» *J. Infrastruct. Syst.*, pp. 299-309, 2010b.
- [4] Ministerio de Obras Públicas y Transportes, «Normals NLT. Ensayos de carreteras,» Dirección General de Carreteras, Madrid, 2002.
- [5] Ministerio de Fomento, «ORDEN FOM/891/2004,» Delegación de Carreteras, Madrid, 2004.
- [6] Ministerio de Fomento, «O.C.24/2008,» Delegación de Carreteras, Madrid, 2008.
- [7] Zhang, Lepech, Keoleian, Qian y Li, «Dynamic life-cycle modeling of pavement overlay systems: capturing the impacts of users, construction and roadway deterioration,» *J. Infrastruct. Syst.*, nº 16, pp. 299-309, 2010b.
- [8] L. Moretti, V. Mandrone, A. D'Andrea y S. Caro, «Evaluation of the environmental and human health impact of road construction activities,» *Journal of Cleaner Production*, pp. 1004-1013, 2018.
- [9] Asociación Española de la Carretera, «Informe sobre necesidades de inversión en



- conservación 2017-2018,» Asociación Española de la Carretera, Madrid, 2018.
- [10] S. Im, T. You, Y.-R. Kim, G. Nsengiyumva, R. Rea y H. Haghshenas, «Evaluation of thin-lift overlay pavements preservation practice: mixture testing, pavement performance and lifecycle cost analysis,» *Jornal of Transportation Engineering. Part B: Pavements*, vol. 144, 2018.
- [11] D. Newcomb, «Thin Asphalt Overlays for Pavement Preservation,» National Asphalt Pavement Association, Information Series 135, Lanham, 2009.
- [12] A. Costanza Russo, M. Rossi, M. Germani y C. Favi, «Energy label directive: current limitations and guidelines for the improvement,» *Procedia CIRP*, nº 69, pp. 674-679, 2018.
- [13] C. Bjerregaard y N. Framroze, «The impact of EU's energy labeling policy: An econometric analysis of increased transparency in the market for cold appliances in Denmark,» *Energy Policy*, vol. 128, pp. 891-899, 2019.
- [14] J. Ball, «Can ISO 14000 and eco-labelling turn the construction industry green?,» *Build. Environ.*, 2002.
- [15] R. Buckley, «Tourism ecolabels,» *Ann. Tour. Res.*, nº 29, pp. 183-208, 2002.
- [16] C. Bratt, S. Hallstedt, K. Robert, G. Broman y J. Oldmark, «Assessment of eco-labelling criteria development from a strategic sustainability perspective,» *J. Clean. Prod.*, nº 19, pp. 1631-1638, 2011.
- [17] I. Gallastegui, «The use of eco-labels: a review of the literature,» *Eur. Environ.*, pp. 316-331, 2002.
- [18] The European Parliament and Council of the European Union, «Directive 92/75/CEE,» *Official Journal of the European Union*, 1992.
- [19] The European Parliament and Council of the European Union, «Directive 2010/30/EU,» *Official Journal of the European Union*, 2010.



- [20] M. Stadelmann y R. Schubert, «How do different designs of energy labels influence purchases of households appliances? A field study in Switzerland,» *Ecological Economics*, nº 144, pp. 112-123, 2018.
- [21] J. J. Carroll, E. E. Denny y S. S. Lyons, «The effects of energy cost labelling on appliance purchasing decisions: trial results from Ireland,» *J. Consum. Policy*, nº 39, pp. 23-40, 2016.
- [22] S. Ambec, M. Cohen, S. Elgie y P. Lanoie, «The Porter Hypothesis at 20: Can environmental regulation enhance innovation and competitiveness?,» *Resources for the future discussion paper*, 2011.
- [23] N. Ashford y R. Hall, «The importance of regulation-induced innovation for sustainable development,» *Sustainability*, nº 3, pp. 270-292, 2011.
- [24] S. Hille, C. Geiger, M. Loock y J. Pelozo, «Best in class or simply the best? The impact of absolute versus relative ecolabeling approaches,» *J. Publ. Policy Mark*, 2017.
- [25] Ecofys, «Evaluation of energy labelling directive and specific aspects of the ecodesign directive,» 2014.
- [26] «Impact of energy labelling on household appliances,» TemaNord, 2007.
- [27] Y. Qiu y M. Kahn, «Impact of voluntary green certification on building energy performance,» *Energy economics*, nº 80, pp. 461-475, 2019.
- [28] M. Majumdar, «LEED: Leadership in Energy and Environmental Design: A LEED Rating system: A global tool to assess sustainability in buildings, communities and cities,» *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*, 2019.
- [29] J. Sliggers, T. Stoffels, B. Bobbink, R. Hermsen, H. Kersten, D. Schipper, F. Bijleveld, C. Van Oostenrijk, M. Van Koevorden y J. Groenendijk, «Road surface labelling,» " United Nations Economic Commission for Europe - GRB, Brussels, 2017.
- [30] R. Fernandez Flores, C. Martin-Portugues Montoliu y E. Guedella Bustamante, «Life Cycle Engineering for Roads (LCE4ROADS), The New Sustainability Certification System for Roads



- from the LCE4ROADS FP7 Project,» *Transportation Research Procedia*, pp. 896-905, 2016.
- [31] J. Ballesteros y R. Enriquez Rodriguez, «Performance-based indicators as a tool to manage energy efficiency in transport. Case study in Spain,» *Procedia Computer Science*, nº 83, pp. 847-854, 2016.
- [32] F. Pérez-Jiménez, R. Valdés, R. Miró, A. Martínez y R. Botella, «Fénix test: Development of a new test procedure for evaluating cracking resistance in bituminous mixtures,» *Transportation Research Records: Journal of the Transportation Research Board*, nº 2181, pp. 36-43, 2010.
- [33] R. Miró, A. Martínez, F. Pérez-Jiménez y R. Botella, «Assessment of cracking resistance of bituminous mixtures by means of Fenix test,» *In: Proc. of the 7th RILEM International Conference on Cracking in Pavements*, vol. I, 2012.
- [34] F. Pérez-Jiménez, A. Martínez, F. Sánchez-Domínguez y J. Ramos-García, «System for measuring splash on wet pavements,» *Transportation Research Records: Journal of the Transportation Research Board*, 2011.
- [35] S. Paje, *Innovación para el control del ruido ambiental*, Ciudad Real: Editorial Universidad de Castilla-La Mancha, 2013.



SISTEMA DE CATEGORIZACIÓN INTEGRAL DE  
MEZCLAS ASFÁLTICAS PARA CAPAS FINAS Y  
ULTRAFINAS EN PAVIMENTOS

---

COMPENDIO DE PUBLICACIONES





## NEW APPROACH TO CHARACTERIZE CRACKING RESISTANCE OF ASPHALT BINDERS

---

Garcia-Gil, L., Miró, R., Pérez-Jiménez, F.E.

### **Attentionjj**

The pages 49 to 57 of the thesis contain the article mentioned, and they must be consulted on the publisher's website

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061818300941>



EVALUATING THE ROLE OF AGGREGATE GRADATION ON  
CRACKING PERFORMANCE OF ASPHALT CONCRETE FOR  
THIN OVERLAYS

---

Garcia-Gil, L., Miró, R., Pérez-Jiménez, F.E.

Article

# Evaluating the Role of Aggregate Gradation on Cracking Performance of Asphalt Concrete for Thin Overlays

Livia Garcia-Gil \*, Rodrigo Miró and Félix E. Pérez-Jiménez

Department of Civil and Environmental Engineering, Universitat Politècnica de Catalunya-BarcelonaTech, 08034 Barcelona, Spain; r.miro@upc.edu (R.M.); edmund.perez@upc.edu (F.E.P.-J.)

\* Correspondence: livia.garcia@upc.edu; Tel.: +34-93255-4800

Received: 15 January 2019; Accepted: 5 February 2019; Published: 13 February 2019



**Abstract:** Thin asphalt concrete overlays are a maintenance technique that mainly restore the functional properties of pavements. One of the main issues in thin overlays is reflective cracking that can cause early deterioration and reduce their service life. For this reason, the purpose of this investigation is to evaluate the effect of material selection on cracking performance of asphalt concrete mixtures for thin overlays. In particular, this paper evaluates the role of aggregate skeleton gradation. The study of the effect of aggregate gradation was divided into two stages: (1) fine fraction content and (2) maximum nominal aggregate size. Based on this, up to seven asphalt mixture gradations were designed and evaluated through the Fénix test at different test temperatures. The results showed a significant correlation between the fine fraction content, and maximum nominal aggregate size, and the cracking performance of the asphalt concrete mixtures. Mixtures manufactured with a low content of fine aggregates, as well as small nominal maximum size, experienced a further improvement of their toughness. These results reflected the importance of considering not only the effect of asphalt binder and environmental conditions but also aggregate gradation in the design of asphalt concrete mixtures in order to achieve a desirable cracking performance.

**Keywords:** aggregate gradation; fine aggregates; maximum aggregate size; cracking; Fénix test

## 1. Introduction

As our road infrastructure ages, infrastructure managers are looking for cost-effective solutions to preserve and extend pavement service life [1]. Selecting the right pavement maintenance strategy is crucial for the authorities because it leads to significant cost savings and also reduces traffic interruptions. Well-constructed full-depth or deep-depth asphalt pavement structures only need functional improvements instead of structural enhancement [2]. In this sense, Infrastructure managers are exploring new maintenance techniques that improve the functionality and provide an extended period of service life of the existing structurally sound pavements. These techniques include, among others, thin asphalt concrete overlays, chip seals, and ultrathin overlays.

Thin asphalt concrete overlays can meet functional requirements and correct surface deficiencies. They can restore skid resistance and ride comfort, improve water resistance, reduce noise, etc. Indeed, asphalt concrete overlays not only provide a new surface for the pavement but they are also the only preservation technique that improves the structural value of the pavement as well as extending its service life [3,4]. However, the bonding between the overlay and the existing pavement is crucial to prevent early distresses and secure a future performance [5]. Thin overlays have advantages over other rehabilitation techniques such as low life cycle cost, rapid opening to traffic, improved smoothness, very little dust generation during construction, low tire-pavement noise generation, are easily maintained or recyclable [3].

Depending on users' needs, asphalt concrete mixtures for thin overlays range from dense graded mixtures to stone matrix asphalt, open-graded friction course, permeable friction course, or ultra-thin bonded wearing courses [6].

Since thin asphalt concrete overlay mixtures are used for the wearing course, their mix design is very similar to the employed practices for standard wearing mixtures. One of the main differences is their nominal maximum aggregate size (NMAS) due to the reduced layer thickness, ranging from 15 mm to 50 mm [7]. In order to ensure adequate compaction, the NMAS should not be longer than about one-third the compacted layer thickness. For thin layers, an NMAS between 12.5 mm and 4.75 mm is typically used [8]. Since fine aggregates make up the majority of aggregate used in thin asphalt concrete mixtures and the smaller NMAS, higher asphalt content is needed to properly coat and bind the aggregate. Asphalt grade must be selected according to climate and traffic level.

The performance of thin asphalt concrete overlays will depend upon a number of factors including mix design approach and materials, underlying pavement type, surface preparation, traffic, climate and the construction quality. Based on the long-term pavement performance (LTPP) database, which is managed by the Federal Highway Administration, numerous studies have been conducted to evaluate the performance of different maintenance techniques, including thin overlays [9–11]. Indeed, there is a Specific Pavement Studies Experiment 5 (SPS-5) in the LTPP program that studies the effects of overlay thickness, overlay material, and pre-overlay treatment on the performance of asphalt overlay [12].

One of the main issues in thin asphalt concrete overlays is reflective cracking [13]. Reflective cracking occurs due to the propagation of discontinuities and cracks from the existing underlying pavement surface to the new overlay due to the vertical and horizontal movements of the overlay caused by temperature/seasonal variations and traffic loads. Reflective cracks can cause early deterioration and reduce the service life of asphalt concrete overlays. Researchers' efforts have been focused on enhancing cracking resistance of asphalt concrete overlays through increasing overlay thickness, density, employing polymer modified binders, geosynthetic interlayers or cut and seal techniques [13–18]. Some authors studied the effect of using reclaimed asphalt pavement on the cracking resistance of asphalt concrete overlays [19]. But extensive laboratory studies that examine the effects of material selection on cracking performance of asphalt mixtures for thin overlays have not been conducted. Since thin asphalt concrete overlays can address functional and safety issues and last over 10 years, the proper selection of materials, the mix design approach, and the proper conditioning of the underlying pavement are crucial to develop well-performing and long-lasting pavements.

The purpose of this study is to gain insight on how a key mix design variable such as aggregate skeleton gradation affects the cracking performance of asphalt concrete mixtures used for thin overlays. Because aggregate gradation can strongly influence aggregate interlock and mortar performance, there is a need for an in-depth study of the relationship between aggregate gradation and cracking response of mixtures.

There are numerous test methods available to understand cracking performance of asphalt concrete mixtures and among all these tests, the Fénix test, which belongs to the category of Semi-Circular Single-Edge Notched Tension Test, is performed directly on the cylindrical asphalt concrete specimens to effectively evaluate cracking resistance of mixtures in a short duration of time [20,21]. This test was developed by the Technical University of Catalonia and evaluates the cracking process in asphalt mixtures through the calculation of the dissipated energy [22].

Since the NMAS is a differential factor in thin asphalt concrete overlays, the aim of this research is to evaluate the influence of NMAS on cracking performance of asphalt concrete mixtures, as well as the effect of fine aggregate content. In order to accomplish this objective, three different gradations were designed to evaluate the influence of fine particles content, while four other different aggregate gradations were designed to evaluate the effect of the NMAS. All the gradations were studied using two different asphalt binders, a conventional binder and a polymer modified binder, in a temperature range between  $-5$  and  $20$  °C.

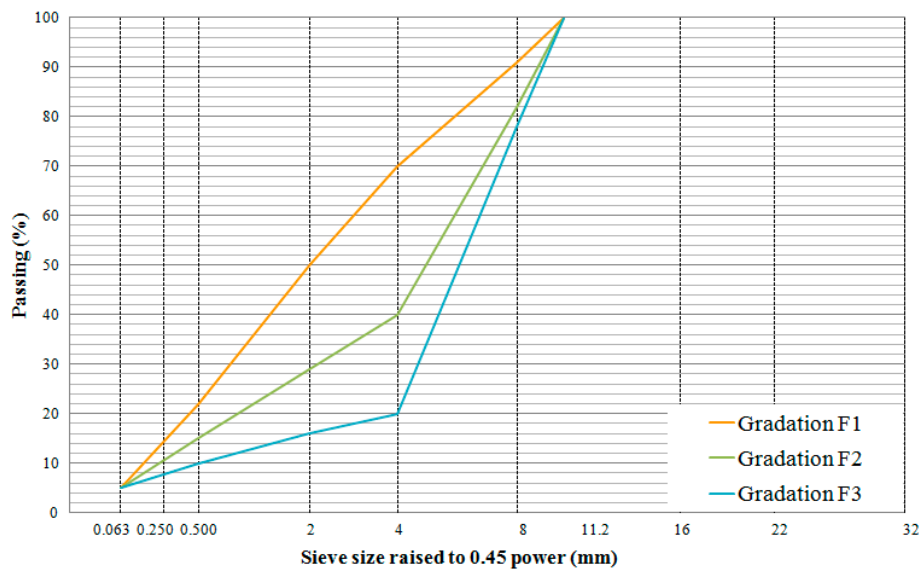
## 2. Materials and Methods

The aim of this study is to evaluate the role of the aggregate skeleton gradation on the cracking resistance of asphalt concrete mixtures for thin overlays. For this purpose, the experimental work of this research was performed and discussed according to two main stages: (1) evaluation of the influence of the fine fraction content and (2) assessment of the NMAS. Additionally, the mix design included two different types of asphalt binder.

In order to evaluate the effect of the fine fraction content, three aggregate gradations were designed, (see Table 1 below). All gradations were designed with a NMAS of 8 mm. As observed in Figure 1, the designed gradations cover from continuously graded mixes to gap-graded mixes. The same filler content and nature (calcium carbonate) was used in all mixes to reduce variables in this study.

**Table 1.** Passing percentage for the designed aggregate gradations for stage 1.

% Passing	Sieve Size (mm)					
	10	8	4	2	0.5	0.063
Gradation 1 (F1)	100	91	70	50	22	5
Gradation 2 (F2)	100	82	40	29	15	5
Gradation 3 (F3)	100	78	20	16	10	5



**Figure 1.** Aggregate gradation for stage 1.

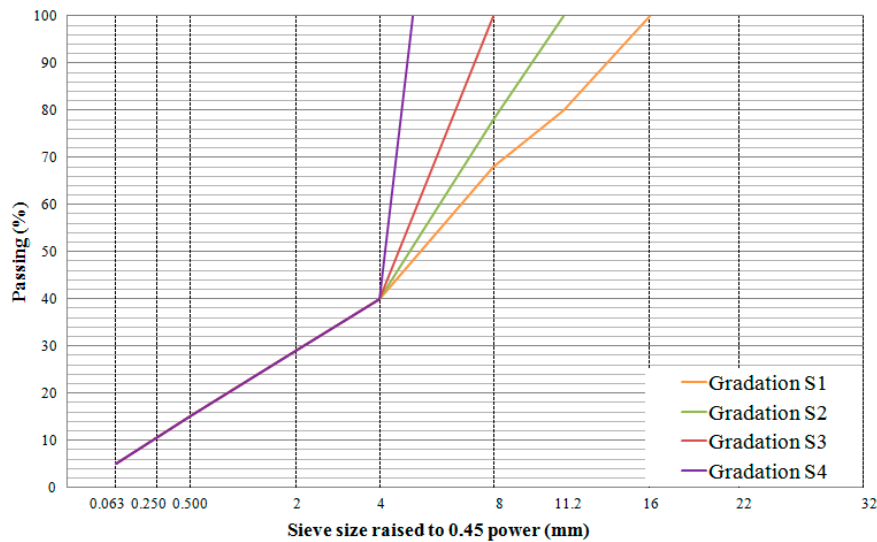
In the case of the NMAS assessment four different aggregate gradations were designed as shown in Table 2. Mixture specimens with four different NMAS, ranging from 11.2 mm to 4 mm, and the same fine fraction content were fabricated, Figure 2. Again, the same filler content was used in all mixes.

The used coarse aggregates consisted of porfidic aggregates (specific gravity of 2.841 kg/m<sup>3</sup>) while fine aggregates had a calcareous nature (specific gravity of 2.697 kg/m<sup>3</sup>). All aggregates were collected from a local quarry and are being used for paving constructions in many locations.

As mentioned, two different types of asphalt binders were selected to manufacture all mixtures: a conventional binder, B35/50, and a polymer modified binder, PMB 45/80-65. Asphalt binder specifications are shown in Table 3. Both asphalt binders are frequently used in the manufacture of mixtures. In the case of study of the fine fraction effect, the bitumen content was 5.0% of the total mixture weight for both types of asphalt binders, while for the NMAS study the bitumen content was 5.5% of the total mixture weight, (see Table 4 below).

**Table 2.** Passing percentage for the designed aggregate gradations for stage 2.

% Passing	Sieve Size (mm)							
	16	11.2	8	5	4	2	0.5	0.063
Gradation 1 (S1)	100	80	68	-	40	29	15	5
Gradation 2 (S2)		100	78	-	40	29	15	5
Gradation 3 (S3)			100	-	40	29	15	5
Gradation 4 (S4)				100	40	29	15	5



**Figure 2.** Aggregate gradation for stage 2.

**Table 3.** Properties of the evaluated asphalt binders.

Test	Unit	B35/50	PMB 45/80-65
Penetration at 25 °C	(0.1 mm)	39	57
Softening point R&B	(°C)	53.6	65.3
Penetration index	(°C)	-0.90	-
Elastic recovery at 13 °C	%	-	74

**Table 4.** Properties of asphalt concrete mixtures.

Gradation	Asphalt Binder	Binder Content (%)	Mean Density (kg/m <sup>3</sup> )	Average Air Void Content (%)
F1	PMB45/80-65	5.0	2.310	9.7
	B35/50	5.0	2.292	10.4
F2	PMB45/80-65	5.0	2.249	11.5
	B35/50	5.0	2.261	11.0
F3	PMB45/80-65	5.0	2.074	17.2
	B35/50	5.0	2.079	17.0
S1	PMB45/80-65	5.5	2.347	7.9
	B35/50	5.5	2.346	7.9
S2	PMB45/80-65	5.5	2.322	8.0
	B35/50	5.5	2.315	8.3
S3	PMB45/80-65	5.5	2.259	11.0
	B35/50	5.5	2.265	10.8
S4	PMB45/80-65	5.5	2.147	16.6
	B35/50	5.5	2.149	16.5

Marshall specimens were manufactured with 50 blows per side. In the following table the main properties of the asphalt concrete mixes are shown.

In order to evaluate the cracking resistance of these mixtures, the Fénix test was conducted. The test consists of applying a tensile stress at a constant rate of 1 mm/min on a half cylindrical Marshall specimen until the propagation of a previously induced 6-mm deep crack starts [22].

Stress and displacement data are recorded simultaneously until the displacement reaches  $4 \times 10^{-2}$  m, a value at which the test shall be considered terminated. Based on this load-displacement curve, the main parameters from the Fénix test are obtained:

- The Tensile Stiffness Index (TSI) measures the slope of the ascending part of the stress-displacement curve and it is related to the stiffness of the mixture
- Fracture energy ( $G_F$ ) represents the work done during the cracking process divided by the fracture area
- The toughness index (TI) gives a notion of the undergone post-peak work once the specimen has failed
- The displacement at 50% post-peak load ( $d_{0.5\text{Post}F_{\text{max}}}$ ) is directly related to the ductility of the mixture [23] The equations used to obtain these parameters are shown in Figure 3.

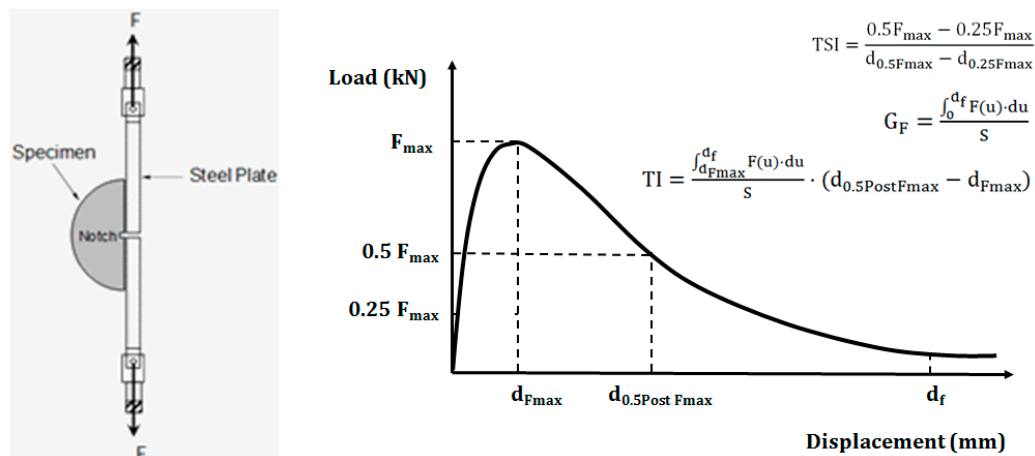


Figure 3. Fénix test set-up and stress-displacement output curve.

Due to the thermal susceptibility and complex rheological behavior of asphalt binders, the performance of asphalt concrete mixtures may change with temperature and for this reason, the effect of temperature on the cracking resistance behavior was also considered. The test was conducted at three different temperatures: 20, 5 and  $-5$  °C. Before starting the test specimens were kept in an environmental chamber at the test temperature for a minimum of 12 h.

Four replicates for each mix design were tested at each test temperature to ensure the repeatability of the results.

### 3. Results and Discussion

#### 3.1. Effect of Fine Fraction Content on Cracking Resistance

Figure 4 plots the load undergone by a representative mixture sample against displacement at a test temperature of 5 °C. Based on the obtained curves, the influence of the fine fraction content on the cracking resistance has been evaluated through parameters obtained from the Fénix test.

Analyzing the shape of the curve, two characteristics of the cracking process can be distinguished: the initial slope of the curve provides a sense of the stiffness of the mixture and the post-peak curve gives a notion about the brittleness of the specimen. The initial increased slope and the sharp dropping post-peak curve observed in the B35/50 samples show a higher stiffness and brittleness compared

to the same aggregate gradation manufactured with PMB 45/80-65 at a test temperature of 5 °C. It can also be observed that mixtures with the lowest fine fraction content exhibit a more ductile breaking behavior.

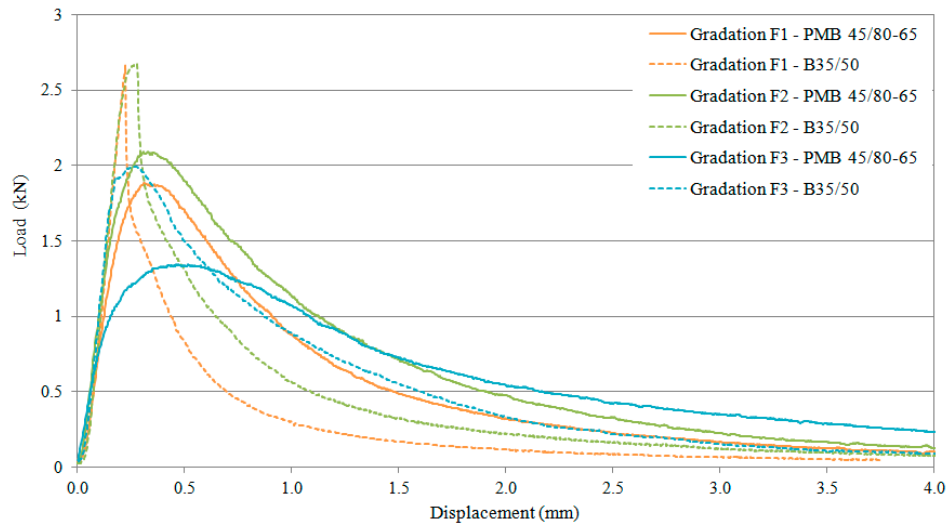


Figure 4. Stress-displacement curve at a test temperature of 5 °C.

Each one of the cracking parameters are analyzed below.

### 3.1.1. Tensile Stiffness Index (TSI)

The tensile stiffness index assesses the stiffness of the mixture. Figure 5 provides the average TSI values against temperature, obtained from the four replicates for each mix design.

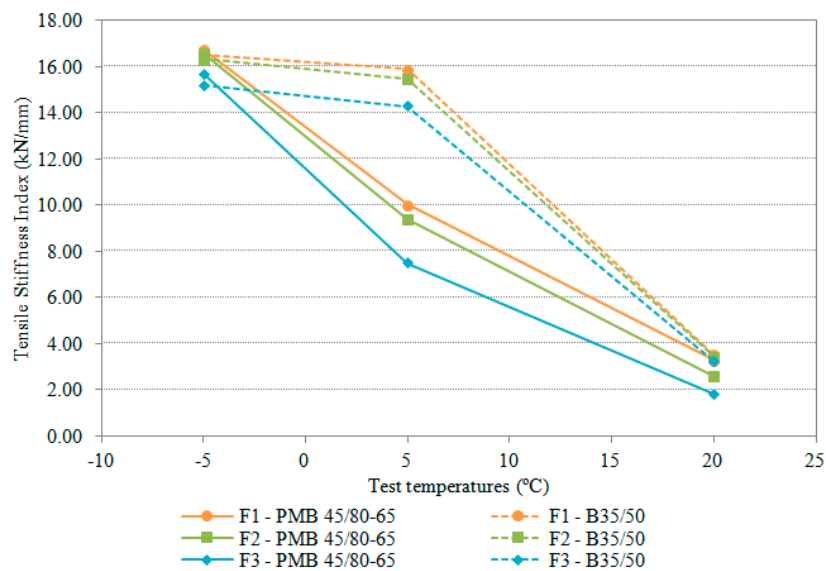


Figure 5. Tensile stiffness index versus temperature.

As observed in Figure 5, two main groups can be differentiated: mixtures manufactured with the polymer modified binder, PMB 45/80-65, and those manufactured with the conventional binder, B35/50. These results are consistent with those obtained in previous studies that stated the importance of selecting the optimal asphalt binder based on the environmental conditions to increase the cracking resistance of asphalt concrete [24].



Results show that the values of the tensile stiffness index increase with the decrease of temperature in all the evaluated mixtures. At a temperature of 20 °C all the mixtures present a similar behavior but as the temperature decreases clear differences can be observed. Mixtures manufactured with B35/50 increase stiffness more sharply than those manufactured with PMB 45/80-65, showing the greatest disparity at a temperature of 5 °C. Below this temperature, the trend is reversed and PMB 45/80-65 mixtures present the fastest growth in stiffness. However, B35/50 mixtures present the highest values over the whole temperature range, which is consistent with the properties of this binder, which has a greater stiffness compared with the polymer modified binder.

Regarding the fine fraction content, the results show slight differences depending on the fine content leading to a higher tensile stiffness index as the content of fine aggregates increases.

Statistical techniques have also been used to strengthen the conclusions drawn from the graphical interpretation. A multi-linear regression analysis has been used to fit the data and establish correlations between the tensile stiffness index and the predictors. R software (The R foundation©) was used for model estimation.

$$y = \beta_0 + \beta_1 \times x_1 + \beta_2 \times x_2 + \dots + \beta_i \times x_i + \varepsilon \tag{1}$$

where  $\beta_i$  = partial regression coefficients or estimates of the regression parameters and  $\varepsilon$  = random error term.

It should be noted that only two types of asphalt binder were studied in this experimental work. So, in order to generalize these correlations other asphalt binders must be evaluated. The aim of these multi-linear relationships was to establish the weight of each studied factor and compare relevance between relevant properties.

In this case, a multi-linear relationship between the tensile stiffness index and the temperature (T), the bitumen penetration at 25 °C (BG) and the fine fraction content (F) has been obtained.

$$TSI = 19.269 - 0.531 \times T - 0.137 \times BG + 0.049 \times F \tag{2}$$

$$R^2 = 0.897$$

The negative estimated regression coefficient for temperature implies that a temperature decrease would lead to an increase of the tensile stiffness index. Mixtures with higher fine fraction content presented higher values of stiffness, indicated by the positive coefficient.

### 3.1.2. Toughness Index (TI)

The toughness index gives a measure of the ability of the asphalt concrete to resist cracking fracture after reaching maximum resistance, (see Figure 6 below).

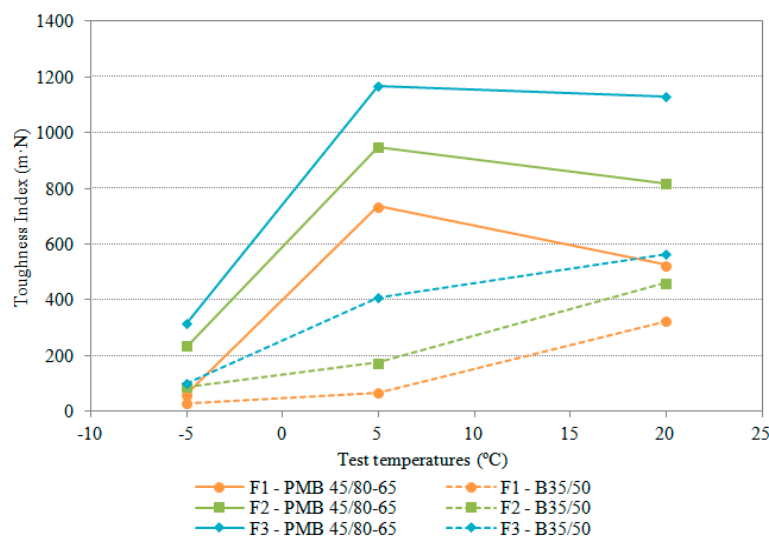


Figure 6. Toughness index versus temperature.

The toughness index gives a notion of the post-peak behavior of the mixture. At 20 °C differences in asphalt binder type and fine fraction content are more pronounced than at lower temperatures. Two trends are observed based on the nature of the asphalt binder; PMB 45/80-65 mixtures present higher values due to the greater deformation ability provided by this type of asphalt binder.

However in terms of gradation, significant variations are also shown. Asphalt concrete manufactured with the lower content of fine aggregates present more ductile breaking behavior.

The multi-linear relationship between the toughness index and the bitumen penetration at 25 °C (BG), test temperature (T) and the fine fraction content (F) can be obtained from Equation (3).

$$TI = -468.297 + 22.828 \times BG + 18.829 \times T - 9.457 \times F$$

$$R^2 = 0.614 \tag{3}$$

The statistical results are consistent with the graphical interpretation and a correlation could be established with a goodness of fit ( $R^2$ ) of 0.614. As the fine fraction content increases the mixture presents a more brittle cracking response. This is consistent with the tensile stiffness index results.

### 3.1.3. Displacement at 50% of Post-Peak Load ( $d_{0.5PostFmax}$ )

As mentioned in Section 2, the displacement at 50% of post-peak load is directly related to the mixture ductility. As it can be observed in Figure 7, the results are consistent with the toughness results because they are both influenced by the ductility of the mixture.

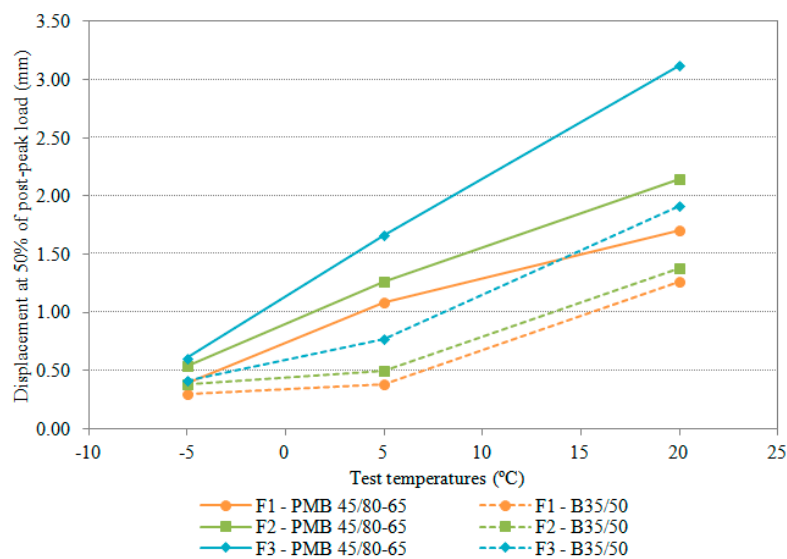


Figure 7. Displacement at 50% of post-peak load versus temperature.

At a temperature of 20 °C, clear differences can be observed. Again, two main groups can be distinguished depending on the binder type. Mixtures manufactured with the polymer modified asphalt binder present higher ductility values due to the higher deformation ability of this binder. As the temperature drops, the curves tend to come together, especially at low temperatures where smaller differences between all the mixtures are observed due to the hardening process that asphalt binders suffer.

Regarding the aggregate gradation, it is again noted that a lower content of fine aggregates leads to greater values, which indicate that the ductility of the mixture is strongly influenced by fine aggregate content.

Equation (4) presents the relationship between the displacement at 50% of post-peak load, the temperature (T), the asphalt binder penetration at 25 °C (BG) and the fine fraction content (F).

$$d_{0.5PostFmax} = -0.369 + 0.060 \times T + 0.033 \times BG - 0.015 \times F \quad (4)$$

$$R^2 = 0.854$$

The statistical results are consistent with the graphical interpretation and a correlation could be established with a coefficient of determination of 0.854. So it can be concluded that there is a correlation between this cracking parameter and fine fraction content.

### 3.1.4. Fracture Energy ( $G_F$ )

The evolution of fracture energy, which is shown in Figure 8, measures the work required for crack initiation and propagation. As expected, PMB 45/80-65 mixtures present an improved cracking response.

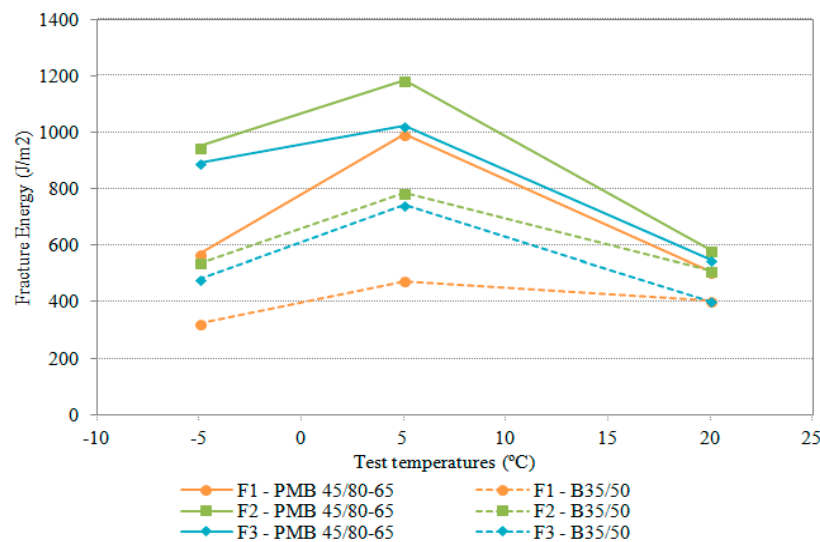


Figure 8. Fracture energy versus temperature.

However, in terms of fine fraction content, the results differ from those obtained in the above-mentioned cracking parameters. As can be observed F2 gradation requires the higher energy amount to achieve cracking followed by F3 and F1 gradation, in this order. Evaluating the statistical results, the coefficient of determination ( $R^2$ ) for the data set obtained is less than 0.500, showing a poor correlation between the fracture energy and the input parameters.

$$G_F = 58.855 + 16.743 \times BG - 5.890 \times T - 4.931 \times F \quad (5)$$

$$R^2 = 0.403$$

This may be explained by the fact that the fracture energy parameter is influenced by the maximum load as well as the post-peak curve. As the fine fraction content increases, the maximum load tends to increase but at the same time, the toughness tends to diminish. For this reason, the fine fraction content that represents a balanced combination between the maximum load and maximum toughness will result in a peak value of the fracture energy.

### 3.2. Effect of the Nominal Maximum Aggregate Size on the Cracking Resistance

The following subsection evaluates the effect of the NMAS on the designed mixtures. In this case, four different aggregate gradations have been designed and manufactured with two different asphalt binders. Figure 9 shows the obtained curves for all the mixtures at 5 °C.

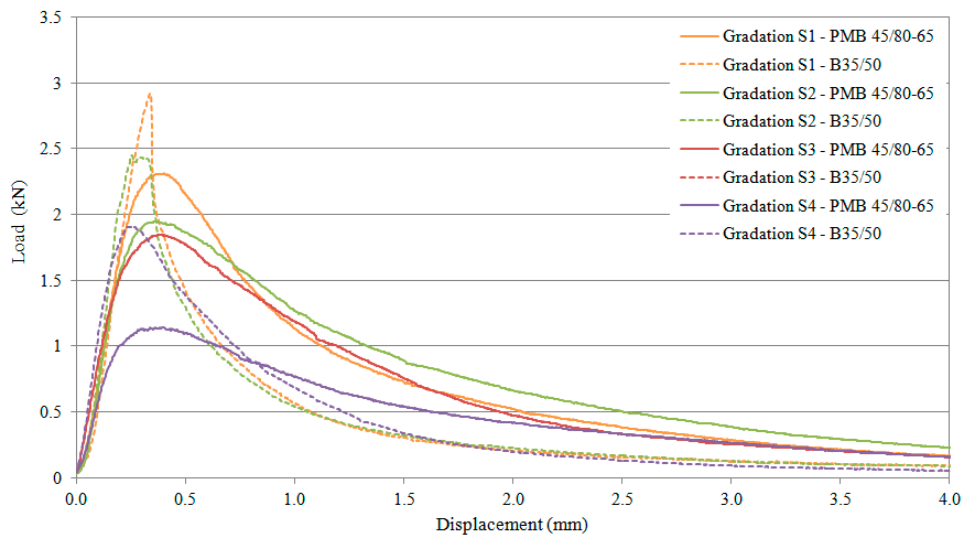


Figure 9. Stress-displacement curve at a test temperature of 20 °C.

As the NMAS decreases, peak load and initial slope also decrease, and a smoother drop of the post peak curve is observed. Such phenomena are indicators of a greater ductility, and are particularly pronounced in the case of PMB 45/80-65 mixtures.

### 3.2.1. Tensile Stiffness Index (TSI)

Figure 10 illustrates the fact that the tensile stiffness index increases with decreasing temperature for all mixtures due to the hardening process that asphalt binders suffer when temperature drops.

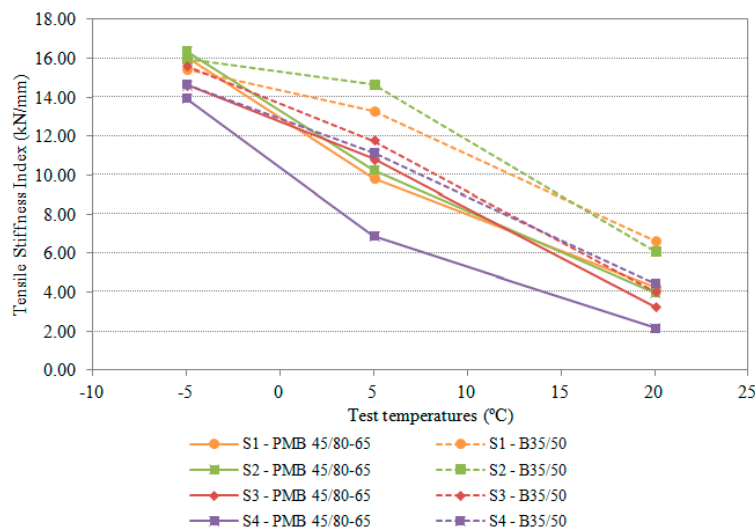


Figure 10. Tensile stiffness index versus temperature.

It can be stated that B35/50 mixtures present higher values of stiffness compared to PMB 45/80-65 mixtures, which is explained by the nature of this asphalt binder. However dissimilarities between the NMAS are not significant enough to draw conclusions visually. For this reason statistical techniques, regression analysis, have been used to establish correlations between variables. From the multi-linear regression analysis it can be concluded that the tensile stiffness index depends on the test temperature (T), the NMAS and the asphalt binder type (BG), Equation (6).

$$TSI = 15.939 - 0.441 \times T + 0.177 \times NMAS - 0.094 \times BG \tag{6}$$

$$R^2 = 0.888$$

As temperature drops, the tensile stiffness index increases and the NMAS raises.

### 3.2.2. Displacement at 50% of Post-Peak Load ( $d_{0.5PostFmax}$ )

Figure 11 provides a notion of the mixtures' ductility, which decreases as temperature drops. As expected, PMB 45/80-65 mixtures present the highest values due to greater ductility that such binder provides to the mixtures.

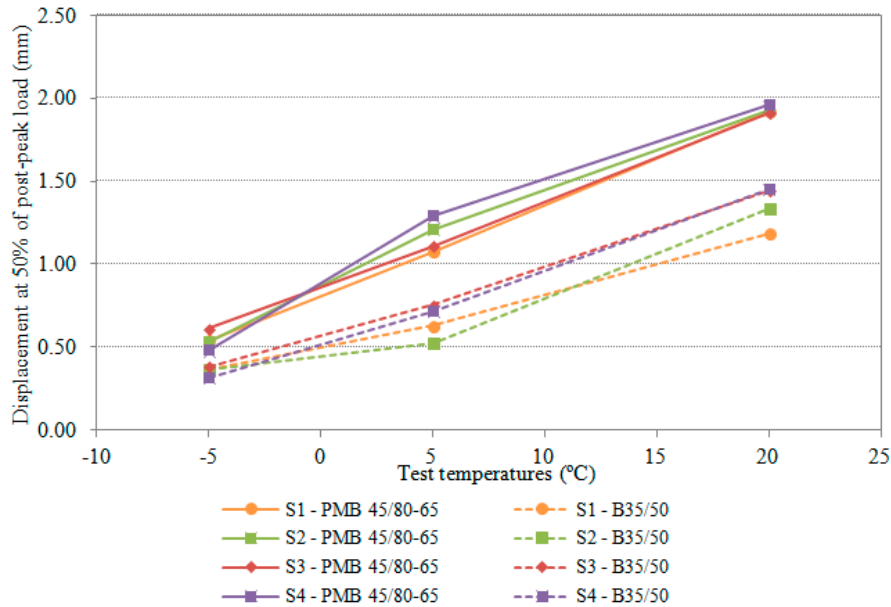


Figure 11. Displacement at 50% of post-peak load versus temperature.

Analyzing the obtained multi-linear regression equation, it can be observed that the displacement at 50% of post-peak load is strongly correlated to the test temperature (T) asphalt binder type (BG) and NMAS, Equation (7).

$$d_{0.5PostFmax} = -0.363 + 0.047 \times T + 0.023 \times BG - 0.008 \times NMAS \quad (7)$$

$$R^2 = 0.911$$

Based on the obtained results and comparing the resulting equations for fine fraction study, Equation (4), and NMAS study, Equation (7), it can be concluded that the fine fraction content exerts a stronger influence on the ductility of the mixture than the NMAS. This can be explained by the higher correlation coefficient of the fine content compared to the NMAS.

## 4. Conclusions

This study aimed to evaluate the influence of the aggregate skeleton gradation on the cracking resistance of asphalt concrete mixtures, especially those used in thin overlays. To investigate the effect of aggregate skeleton gradation, it was considered that aggregate gradation can be divided into two main factors: (1) fine fraction content and (2) nominal maximum aggregate size (NMAS). For each stage, different gradations were designed and manufactured with two different types of asphalt binders, a conventional binder, B35/50, and a polymer modified binder, PMB 45/80-65, and Fénix tested in a temperature range between  $-5$  and  $20$  °C. Based on the findings, the following conclusions can be drawn:

- The Fénix test showed enough sensitivity to compare cracking performance between the designed gradations. This test allowed the performance of all the mixtures to be evaluated under different test temperatures and relatively quickly.

- The correlation between the aggregate skeleton gradation and the cracking performance of asphalt concrete mixtures was established. Not only temperature and asphalt binder nature have a strong influence on the cracking resistance of asphalt mixtures, but also aggregate skeleton gradation.
- Asphalt concrete manufactured with PMB 45/80-65 presented an enhanced performance due to its greater ductility but as temperature drops, the performance of all the mixtures tends to converge due to the hardening process that asphalt binders suffer.
- Regarding the fine particles content, the results show a significant correlation between the fine fraction content and the measured cracking parameters. For the same asphalt binder content, asphalt mixtures manufactured with a lower content of fines aggregates resulted in a further improvement of the toughness of the mixture. Accordingly, it can be stated that the asphalt mastic and the fine fraction content have a considerable influence on the cracking resistance of asphalt concrete for thin layers.
- Regarding the influence of the NMA, a correlation between the NMA and cracking response of asphalt concrete has also been obtained. Indeed, as the NMA increases so does the stiffness of the mixtures.
- It should be noted that the established correlations shall not be used to describe the cracking behavior of asphalt concrete mixtures, but to compare the relevance between the studied properties. Based on the obtained equations for the displacement at 50% of post-peak load and comparing the regression coefficients of each equation, it can be concluded the fine fraction content exerts a stronger influence on the ductility of the mixture compared to the NMA.

The obtained results reflect the importance of considering not only the effect of the asphalt binder nature and the environmental conditions but also the aggregate skeleton gradation in the design of asphalt concrete mixtures, especially those used in thin overlays, to achieve a desirable cracking performance. In particular, special attention should be paid to the fine fraction content when designing an asphalt concrete mixture. According to the results, mixtures designed with a reduced NMA and a low content of fine aggregated experienced a further improvement of their toughness.

**Author Contributions:** Formal analysis, L.G.-G.; Investigation, L.G.-G.; Methodology, R.M.; Project administration, R.M.; Supervision, R.M., and F.E.P.-J.; Validation, R.M.; Visualization, L.G.-G.; Writing original draft, L.G.-G.; Writing review and editing, R.M.

**Funding:** This research was funded co-funded by the Spanish Ministry of Economy and Competitiveness, through the call RETOS-COLABORACIÓN 2015 of the National Programme of Research, Development and Innovation to face the challenges of Society (RTC-2015-4025-4), within the National Scientific and Technical Research and Innovation Plan for the 2013–2016 period, and the European Union, through FEDER funds, which have the main objective of promoting technological development, innovation and quality research. It also received funding from the Agency for Management of University and Research Grants of the Catalonia Government through the Industrial Doctorates Plan.

**Conflicts of Interest:** The authors declare no conflict of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses, or interpretation of data; in the writing of the manuscript, or in the decision to publish the results.

## References

1. Hao Chen, D.; Scullion, T. Very Thin Overlays in Texas. *Constr. Build. Mater.* **2015**, *95*, 108–116. [CrossRef]
2. Newcomb, D.; Buncher, M.; Huddleston, I. Concepts of Perpetual Pavements. In *Perpetual Bituminous Pavements. Transportation Research Circular, Number 503*. Available online: <https://ntrl.ntis.gov/NTRL/dashboard/searchResults/titleDetail/PB2002104726.xhtml> (accessed on 20 December 2018).
3. Newcomb, D. Thin Asphalt Overlays for Pavement Preservation. Available online: [http://driveasphalt.org/assets/content/resources/IS-135\\_Thin\\_Asphalt\\_Overlays.pdf](http://driveasphalt.org/assets/content/resources/IS-135_Thin_Asphalt_Overlays.pdf) (accessed on 27 December 2018).
4. Im, S.; You, T.; Kim, Y.-R.; Nsengiyumva, G.; Rea, R.; Haghshenas, H. Evaluation of thin-lift overlay pavements preservation practice: mixture testing, pavement performance and lifecycle cost analysis. *J. Transp. Eng. Part B Pavements* **2018**, *144*, 3. [CrossRef]



5. Rith, M.; Kyu Kim, Y.; Woo Lee, S.; Young Park, J.; Hwan Han, S. Analysis of in situ bond strength of bonded concrete overlay. *Constr. Build. Mater.* **2016**, *111*–118. [[CrossRef](#)]
6. Gierhart, D. Thin Lift Overlays. Available online: <http://asphaltmagazine.com/thin-lift-overlays/> (accessed on 15 June 2018).
7. Nicholls, C.; Carswell, I.; Gibb, M.; Williams, J. Service lives of thin surfacing systems in the UK. In Proceedings of the Transport Reserach Arena, Gothenburg, Sweden, 12–15 June 2006.
8. Brown, E.; Hainin, M.; Cooley, L.; Hurley, G. Relationship of air voids, lift thickness and permeability in hot mix asphalt pavements. In *NCHRP Report 531. National Cooperative Highway Research Program*; The National Academies Press: Washington DC, USA, 2004. [[CrossRef](#)]
9. Rauhut, J.; Von Quintus, H.; Eltahan, A. *Performance of Rehabilitated Asphalt Concrete Pavements in LTPP Experiments (Data Collecetd through February 1997)*; Report No. FHWA-RD-00-029; Federal Highway Administration: Washington, DC, USA, 1997.
10. Hall, K.; Correa, C.; Simpson, A. Performance of flexible pavement rehabilitation treatments in the long-term pavement performance SPS-5 experiment. *Transp. Res. Rec.* **2003**. [[CrossRef](#)]
11. Dong, Q.; Huang, B. Evaluation of the effectiveness and cost-effectiveness of asphalt pavement rehabilitations utilizing LTPP data. *J. Transp. Eng.* **2012**, *138*, 681–689. [[CrossRef](#)]
12. Yu, Y.; Sun, L. Effect of overlay thickness, overlay material, and pre-overlay treatment on evolution of asphalt concrete overlay roughness in LTPP SPS-5 experiment: A multilevel model approach. *Constr. Build. Mater.* **2018**, *162*, 192–201. [[CrossRef](#)]
13. Kumar, V.; Saride, S. Evaluation of cracking resistance potential of geosynthetic reinforced asphalt overlays using direct tensile strength test. *Constr. Build. Mater.* **2018**, *162*, 37–47. [[CrossRef](#)]
14. Sherman, G. *Minimizing Reflection Cracking of Pavement Overlays*; NCHRP Synthesis of Highway Practice Transportation Research Board: Washington, DC, USA, 1982; Volume 92.
15. Elseifi, M.; Al-Qadi, I. A simplified overlay design model against reflective cracking utilizing service life prediction. *Transp. Res. Rec. J Transp. Res. Board* **2003**. [[CrossRef](#)]
16. Androjić, I.; Kaluder, G.; Kaluder, F. Influence of grading on the thin-layer asphalt concrete properties. *Gradevinar* **2014**. [[CrossRef](#)]
17. Zhao, A.; Al-Qadi, I.; Wang, S. Prediction of thin asphalt concrete overlay thickness and density using nonlinear optimization of GPR data. *NDT E Int.* **2018**, *100*, 20–30. [[CrossRef](#)]
18. Correia, N.; Zornberg, J. Strain distribution along geogrid-reinforced asphalt overlays under traffic loading. *Geotext. Geomembr.* **2018**, *46*, 111–120. [[CrossRef](#)]
19. Wang, Y. The effects of using reclaimed asphalt pavements (RAP) on the long-term performance of asphalt concrete overlays. *Constr. Build. Mater.* **2016**, *120*, 335–348. [[CrossRef](#)]
20. Miró, R.; Martínez, A.; Pérez-Jiménez, F.; Botella, R. Analysis of cracking resistance of bituminous mixtures using Fenix test. *Constr. Build. Mater.* **2014**, *59*, 32–38.
21. Miró, R.; Martínez, A.; Pérez-Jiménez, F.; Botella, R. Assessment of cracking resistance of bituminous mixtures by means of Fenix test. In Proceedings of the 7th RILEM International Conference On Cracking in Pavements, Delft, The Netherlands, 20–22 June 2012.
22. Pérez-Jiménez, F.; Valdés, R.; Miró, R.; Martínez, A.; Botella, R. Fénix test: Development of a new test procedure for evaluating crackin resistance in bituminous mixtures. *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board* **2010**, *2181*, 36–43.
23. Xie, X.; Lu, G.; Liu, P.; Wang, D.; Fan, Q.; Oeser, M. Evaluation of morphological characteristics of fine aggregate in asphalt pavement. *Constr. Build. Mater.* **2017**, *139*, 1–8. [[CrossRef](#)]
24. Garcia-Gil, L.; Miró, R.; Pérez-Jiménez, F. New approach to characterize cracking resistance of asphalt binders. *Constr. Build. Mater.* **2018**, in press. [[CrossRef](#)]





## LABELLING STRATEGY FOR EVALUATING THE PERFORMANCE OF THIN ASPHALT WEARING COURSES

---

Garcia-Gil, L., Miró, R.



Article

# Evaluating the Role of Aggregate Gradation on Cracking Performance of Asphalt Concrete for Thin Overlays

Livia Garcia-Gil \*, Rodrigo Miró and Félix E. Pérez-Jiménez

Department of Civil and Environmental Engineering, Universitat Politècnica de Catalunya-BarcelonaTech, 08034 Barcelona, Spain; r.miro@upc.edu (R.M.); edmund.perez@upc.edu (F.E.P.-J.)

\* Correspondence: livia.garcia@upc.edu; Tel.: +34-93255-4800

Received: 15 January 2019; Accepted: 5 February 2019; Published: 13 February 2019



**Abstract:** Thin asphalt concrete overlays are a maintenance technique that mainly restore the functional properties of pavements. One of the main issues in thin overlays is reflective cracking that can cause early deterioration and reduce their service life. For this reason, the purpose of this investigation is to evaluate the effect of material selection on cracking performance of asphalt concrete mixtures for thin overlays. In particular, this paper evaluates the role of aggregate skeleton gradation. The study of the effect of aggregate gradation was divided into two stages: (1) fine fraction content and (2) maximum nominal aggregate size. Based on this, up to seven asphalt mixture gradations were designed and evaluated through the Fénix test at different test temperatures. The results showed a significant correlation between the fine fraction content, and maximum nominal aggregate size, and the cracking performance of the asphalt concrete mixtures. Mixtures manufactured with a low content of fine aggregates, as well as small nominal maximum size, experienced a further improvement of their toughness. These results reflected the importance of considering not only the effect of asphalt binder and environmental conditions but also aggregate gradation in the design of asphalt concrete mixtures in order to achieve a desirable cracking performance.

**Keywords:** aggregate gradation; fine aggregates; maximum aggregate size; cracking; Fénix test

## 1. Introduction

As our road infrastructure ages, infrastructure managers are looking for cost-effective solutions to preserve and extend pavement service life [1]. Selecting the right pavement maintenance strategy is crucial for the authorities because it leads to significant cost savings and also reduces traffic interruptions. Well-constructed full-depth or deep-depth asphalt pavement structures only need functional improvements instead of structural enhancement [2]. In this sense, Infrastructure managers are exploring new maintenance techniques that improve the functionality and provide an extended period of service life of the existing structurally sound pavements. These techniques include, among others, thin asphalt concrete overlays, chip seals, and ultrathin overlays.

Thin asphalt concrete overlays can meet functional requirements and correct surface deficiencies. They can restore skid resistance and ride comfort, improve water resistance, reduce noise, etc. Indeed, asphalt concrete overlays not only provide a new surface for the pavement but they are also the only preservation technique that improves the structural value of the pavement as well as extending its service life [3,4]. However, the bonding between the overlay and the existing pavement is crucial to prevent early distresses and secure a future performance [5]. Thin overlays have advantages over other rehabilitation techniques such as low life cycle cost, rapid opening to traffic, improved smoothness, very little dust generation during construction, low tire-pavement noise generation, are easily maintained or recyclable [3].

Depending on users' needs, asphalt concrete mixtures for thin overlays range from dense graded mixtures to stone matrix asphalt, open-graded friction course, permeable friction course, or ultra-thin bonded wearing courses [6].

Since thin asphalt concrete overlay mixtures are used for the wearing course, their mix design is very similar to the employed practices for standard wearing mixtures. One of the main differences is their nominal maximum aggregate size (NMAS) due to the reduced layer thickness, ranging from 15 mm to 50 mm [7]. In order to ensure adequate compaction, the NMAS should not be longer than about one-third the compacted layer thickness. For thin layers, an NMAS between 12.5 mm and 4.75 mm is typically used [8]. Since fine aggregates make up the majority of aggregate used in thin asphalt concrete mixtures and the smaller NMAS, higher asphalt content is needed to properly coat and bind the aggregate. Asphalt grade must be selected according to climate and traffic level.

The performance of thin asphalt concrete overlays will depend upon a number of factors including mix design approach and materials, underlying pavement type, surface preparation, traffic, climate and the construction quality. Based on the long-term pavement performance (LTPP) database, which is managed by the Federal Highway Administration, numerous studies have been conducted to evaluate the performance of different maintenance techniques, including thin overlays [9–11]. Indeed, there is a Specific Pavement Studies Experiment 5 (SPS-5) in the LTPP program that studies the effects of overlay thickness, overlay material, and pre-overlay treatment on the performance of asphalt overlay [12].

One of the main issues in thin asphalt concrete overlays is reflective cracking [13]. Reflective cracking occurs due to the propagation of discontinuities and cracks from the existing underlying pavement surface to the new overlay due to the vertical and horizontal movements of the overlay caused by temperature/seasonal variations and traffic loads. Reflective cracks can cause early deterioration and reduce the service life of asphalt concrete overlays. Researchers' efforts have been focused on enhancing cracking resistance of asphalt concrete overlays through increasing overlay thickness, density, employing polymer modified binders, geosynthetic interlayers or cut and seal techniques [13–18]. Some authors studied the effect of using reclaimed asphalt pavement on the cracking resistance of asphalt concrete overlays [19]. But extensive laboratory studies that examine the effects of material selection on cracking performance of asphalt mixtures for thin overlays have not been conducted. Since thin asphalt concrete overlays can address functional and safety issues and last over 10 years, the proper selection of materials, the mix design approach, and the proper conditioning of the underlying pavement are crucial to develop well-performing and long-lasting pavements.

The purpose of this study is to gain insight on how a key mix design variable such as aggregate skeleton gradation affects the cracking performance of asphalt concrete mixtures used for thin overlays. Because aggregate gradation can strongly influence aggregate interlock and mortar performance, there is a need for an in-depth study of the relationship between aggregate gradation and cracking response of mixtures.

There are numerous test methods available to understand cracking performance of asphalt concrete mixtures and among all these tests, the Fénix test, which belongs to the category of Semi-Circular Single-Edge Notched Tension Test, is performed directly on the cylindrical asphalt concrete specimens to effectively evaluate cracking resistance of mixtures in a short duration of time [20,21]. This test was developed by the Technical University of Catalonia and evaluates the cracking process in asphalt mixtures through the calculation of the dissipated energy [22].

Since the NMAS is a differential factor in thin asphalt concrete overlays, the aim of this research is to evaluate the influence of NMAS on cracking performance of asphalt concrete mixtures, as well as the effect of fine aggregate content. In order to accomplish this objective, three different gradations were designed to evaluate the influence of fine particles content, while four other different aggregate gradations were designed to evaluate the effect of the NMAS. All the gradations were studied using two different asphalt binders, a conventional binder and a polymer modified binder, in a temperature range between  $-5$  and  $20$  °C.

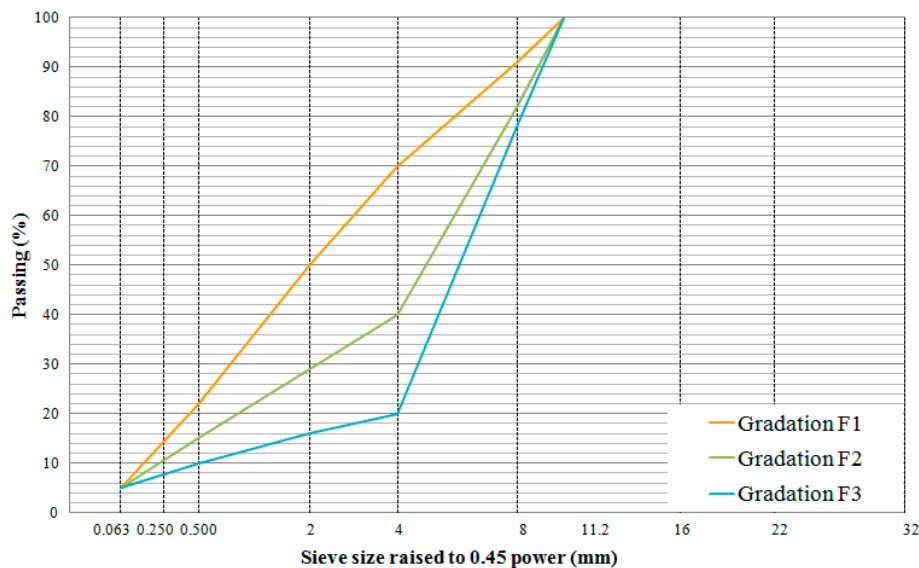
## 2. Materials and Methods

The aim of this study is to evaluate the role of the aggregate skeleton gradation on the cracking resistance of asphalt concrete mixtures for thin overlays. For this purpose, the experimental work of this research was performed and discussed according to two main stages: (1) evaluation of the influence of the fine fraction content and (2) assessment of the NMAS. Additionally, the mix design included two different types of asphalt binder.

In order to evaluate the effect of the fine fraction content, three aggregate gradations were designed, (see Table 1 below). All gradations were designed with a NMAS of 8 mm. As observed in Figure 1, the designed gradations cover from continuously graded mixes to gap-graded mixes. The same filler content and nature (calcium carbonate) was used in all mixes to reduce variables in this study.

**Table 1.** Passing percentage for the designed aggregate gradations for stage 1.

% Passing	Sieve Size (mm)					
	10	8	4	2	0.5	0.063
Gradation 1 (F1)	100	91	70	50	22	5
Gradation 2 (F2)	100	82	40	29	15	5
Gradation 3 (F3)	100	78	20	16	10	5



**Figure 1.** Aggregate gradation for stage 1.

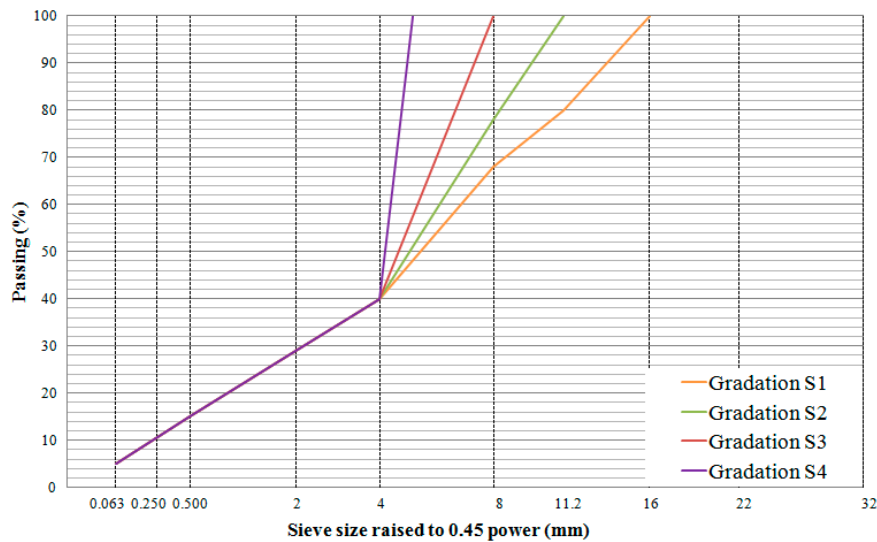
In the case of the NMAS assessment four different aggregate gradations were designed as shown in Table 2. Mixture specimens with four different NMAS, ranging from 11.2 mm to 4 mm, and the same fine fraction content were fabricated, Figure 2. Again, the same filler content was used in all mixes.

The used coarse aggregates consisted of porfidic aggregates (specific gravity of 2.841 kg/m<sup>3</sup>) while fine aggregates had a calcareous nature (specific gravity of 2.697 kg/m<sup>3</sup>). All aggregates were collected from a local quarry and are being used for paving constructions in many locations.

As mentioned, two different types of asphalt binders were selected to manufacture all mixtures: a conventional binder, B35/50, and a polymer modified binder, PMB 45/80-65. Asphalt binder specifications are shown in Table 3. Both asphalt binders are frequently used in the manufacture of mixtures. In the case of study of the fine fraction effect, the bitumen content was 5.0% of the total mixture weight for both types of asphalt binders, while for the NMAS study the bitumen content was 5.5% of the total mixture weight, (see Table 4 below).

**Table 2.** Passing percentage for the designed aggregate gradations for stage 2.

% Passing	Sieve Size (mm)							
	16	11.2	8	5	4	2	0.5	0.063
Gradation 1 (S1)	100	80	68	-	40	29	15	5
Gradation 2 (S2)		100	78	-	40	29	15	5
Gradation 3 (S3)			100	-	40	29	15	5
Gradation 4 (S4)				100	40	29	15	5



**Figure 2.** Aggregate gradation for stage 2.

**Table 3.** Properties of the evaluated asphalt binders.

Test	Unit	B35/50	PMB 45/80-65
Penetration at 25 °C	(0.1 mm)	39	57
Softening point R&B	(°C)	53.6	65.3
Penetration index	(°C)	-0.90	-
Elastic recovery at 13 °C	%	-	74

**Table 4.** Properties of asphalt concrete mixtures.

Gradation	Asphalt Binder	Binder Content (%)	Mean Density (kg/m <sup>3</sup> )	Average Air Void Content (%)
F1	PMB45/80-65	5.0	2.310	9.7
	B35/50	5.0	2.292	10.4
F2	PMB45/80-65	5.0	2.249	11.5
	B35/50	5.0	2.261	11.0
F3	PMB45/80-65	5.0	2.074	17.2
	B35/50	5.0	2.079	17.0
S1	PMB45/80-65	5.5	2.347	7.9
	B35/50	5.5	2.346	7.9
S2	PMB45/80-65	5.5	2.322	8.0
	B35/50	5.5	2.315	8.3
S3	PMB45/80-65	5.5	2.259	11.0
	B35/50	5.5	2.265	10.8
S4	PMB45/80-65	5.5	2.147	16.6
	B35/50	5.5	2.149	16.5

Marshall specimens were manufactured with 50 blows per side. In the following table the main properties of the asphalt concrete mixes are shown.

In order to evaluate the cracking resistance of these mixtures, the Fénix test was conducted. The test consists of applying a tensile stress at a constant rate of 1 mm/min on a half cylindrical Marshall specimen until the propagation of a previously induced 6-mm deep crack starts [22].

Stress and displacement data are recorded simultaneously until the displacement reaches  $4 \times 10^{-2}$  m, a value at which the test shall be considered terminated. Based on this load-displacement curve, the main parameters from the Fénix test are obtained:

- The Tensile Stiffness Index (TSI) measures the slope of the ascending part of the stress-displacement curve and it is related to the stiffness of the mixture
- Fracture energy ( $G_F$ ) represents the work done during the cracking process divided by the fracture area
- The toughness index (TI) gives a notion of the undergone post-peak work once the specimen has failed
- The displacement at 50% post-peak load ( $d_{0.5\text{Post}F_{\text{max}}}$ ) is directly related to the ductility of the mixture [23] The equations used to obtain these parameters are shown in Figure 3.

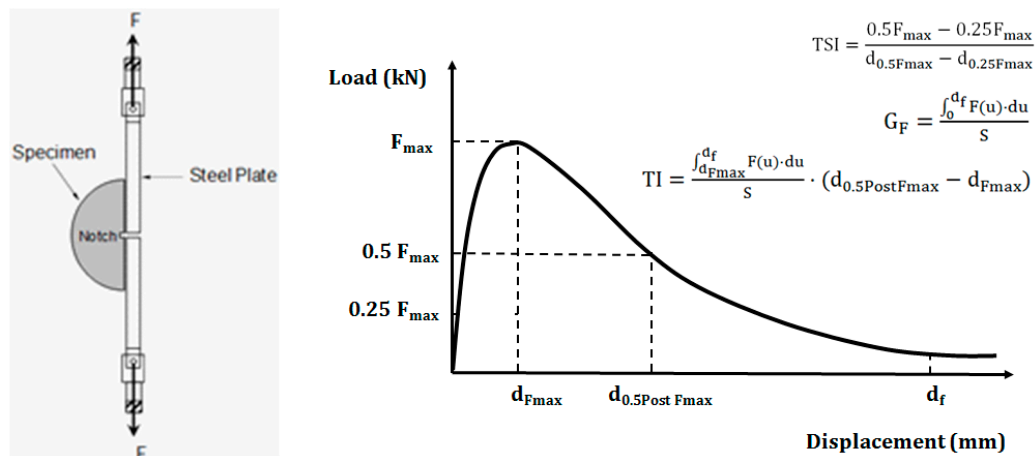


Figure 3. Fénix test set-up and stress-displacement output curve.

Due to the thermal susceptibility and complex rheological behavior of asphalt binders, the performance of asphalt concrete mixtures may change with temperature and for this reason, the effect of temperature on the cracking resistance behavior was also considered. The test was conducted at three different temperatures: 20, 5 and  $-5$  °C. Before starting the test specimens were kept in an environmental chamber at the test temperature for a minimum of 12 h.

Four replicates for each mix design were tested at each test temperature to ensure the repeatability of the results.

### 3. Results and Discussion

#### 3.1. Effect of Fine Fraction Content on Cracking Resistance

Figure 4 plots the load undergone by a representative mixture sample against displacement at a test temperature of 5 °C. Based on the obtained curves, the influence of the fine fraction content on the cracking resistance has been evaluated through parameters obtained from the Fénix test.

Analyzing the shape of the curve, two characteristics of the cracking process can be distinguished: the initial slope of the curve provides a sense of the stiffness of the mixture and the post-peak curve gives a notion about the brittleness of the specimen. The initial increased slope and the sharp dropping post-peak curve observed in the B35/50 samples show a higher stiffness and brittleness compared

to the same aggregate gradation manufactured with PMB 45/80-65 at a test temperature of 5 °C. It can also be observed that mixtures with the lowest fine fraction content exhibit a more ductile breaking behavior.

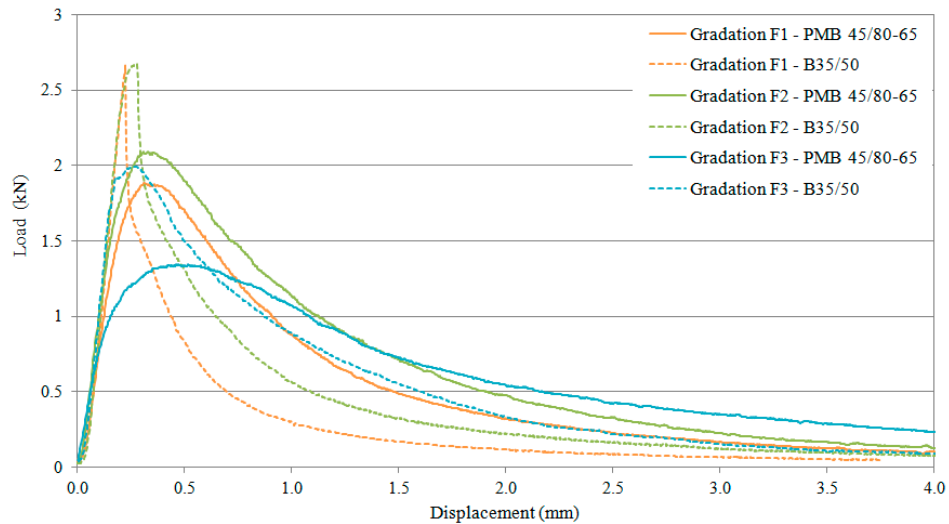


Figure 4. Stress-displacement curve at a test temperature of 5 °C.

Each one of the cracking parameters are analyzed below.

### 3.1.1. Tensile Stiffness Index (TSI)

The tensile stiffness index assesses the stiffness of the mixture. Figure 5 provides the average TSI values against temperature, obtained from the four replicates for each mix design.

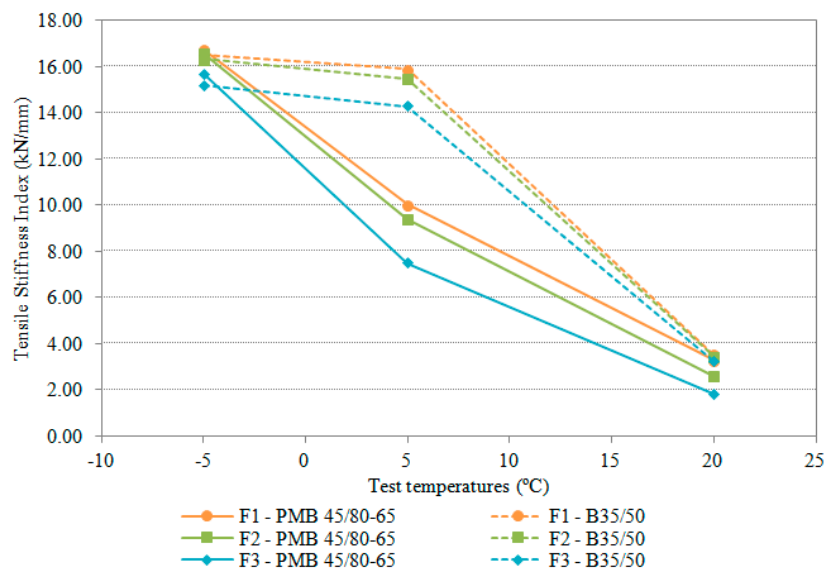


Figure 5. Tensile stiffness index versus temperature.

As observed in Figure 5, two main groups can be differentiated: mixtures manufactured with the polymer modified binder, PMB 45/80-65, and those manufactured with the conventional binder, B35/50. These results are consistent with those obtained in previous studies that stated the importance of selecting the optimal asphalt binder based on the environmental conditions to increase the cracking resistance of asphalt concrete [24].

Results show that the values of the tensile stiffness index increase with the decrease of temperature in all the evaluated mixtures. At a temperature of 20 °C all the mixtures present a similar behavior but as the temperature decreases clear differences can be observed. Mixtures manufactured with B35/50 increase stiffness more sharply than those manufactured with PMB 45/80-65, showing the greatest disparity at a temperature of 5 °C. Below this temperature, the trend is reversed and PMB 45/80-65 mixtures present the fastest growth in stiffness. However, B35/50 mixtures present the highest values over the whole temperature range, which is consistent with the properties of this binder, which has a greater stiffness compared with the polymer modified binder.

Regarding the fine fraction content, the results show slight differences depending on the fine content leading to a higher tensile stiffness index as the content of fine aggregates increases.

Statistical techniques have also been used to strengthen the conclusions drawn from the graphical interpretation. A multi-linear regression analysis has been used to fit the data and establish correlations between the tensile stiffness index and the predictors. R software (The R foundation©) was used for model estimation.

$$y = \beta_0 + \beta_1 \times x_1 + \beta_2 \times x_2 + \dots + \beta_i \times x_i + \varepsilon \tag{1}$$

where  $\beta_i$  = partial regression coefficients or estimates of the regression parameters and  $\varepsilon$  = random error term.

It should be noted that only two types of asphalt binder were studied in this experimental work. So, in order to generalize these correlations other asphalt binders must be evaluated. The aim of these multi-linear relationships was to establish the weight of each studied factor and compare relevance between relevant properties.

In this case, a multi-linear relationship between the tensile stiffness index and the temperature (T), the bitumen penetration at 25 °C (BG) and the fine fraction content (F) has been obtained.

$$TSI = 19.269 - 0.531 \times T - 0.137 \times BG + 0.049 \times F \tag{2}$$

$$R^2 = 0.897$$

The negative estimated regression coefficient for temperature implies that a temperature decrease would lead to an increase of the tensile stiffness index. Mixtures with higher fine fraction content presented higher values of stiffness, indicated by the positive coefficient.

### 3.1.2. Toughness Index (TI)

The toughness index gives a measure of the ability of the asphalt concrete to resist cracking fracture after reaching maximum resistance, (see Figure 6 below).

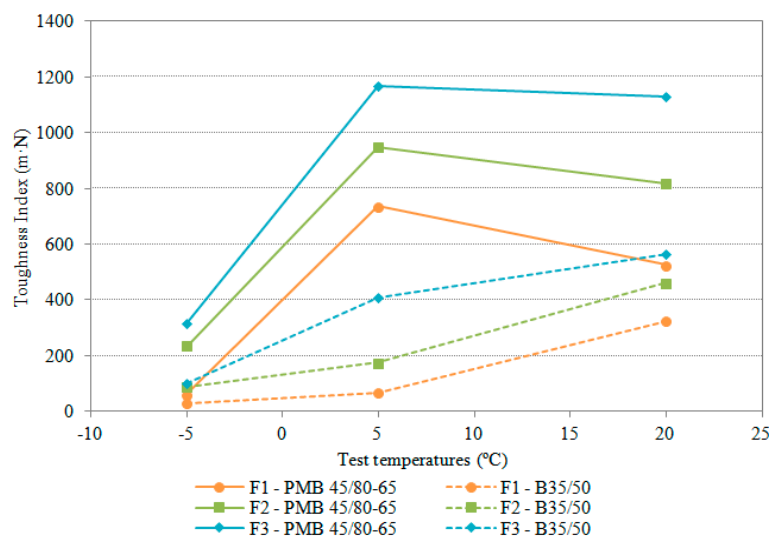


Figure 6. Toughness index versus temperature.



The toughness index gives a notion of the post-peak behavior of the mixture. At 20 °C differences in asphalt binder type and fine fraction content are more pronounced than at lower temperatures. Two trends are observed based on the nature of the asphalt binder; PMB 45/80-65 mixtures present higher values due to the greater deformation ability provided by this type of asphalt binder.

However in terms of gradation, significant variations are also shown. Asphalt concrete manufactured with the lower content of fine aggregates present more ductile breaking behavior.

The multi-linear relationship between the toughness index and the bitumen penetration at 25 °C (BG), test temperature (T) and the fine fraction content (F) can be obtained from Equation (3).

$$TI = -468.297 + 22.828 \times BG + 18.829 \times T - 9.457 \times F$$

$$R^2 = 0.614 \tag{3}$$

The statistical results are consistent with the graphical interpretation and a correlation could be established with a goodness of fit ( $R^2$ ) of 0.614. As the fine fraction content increases the mixture presents a more brittle cracking response. This is consistent with the tensile stiffness index results.

### 3.1.3. Displacement at 50% of Post-Peak Load ( $d_{0.5PostFmax}$ )

As mentioned in Section 2, the displacement at 50% of post-peak load is directly related to the mixture ductility. As it can be observed in Figure 7, the results are consistent with the toughness results because they are both influenced by the ductility of the mixture.

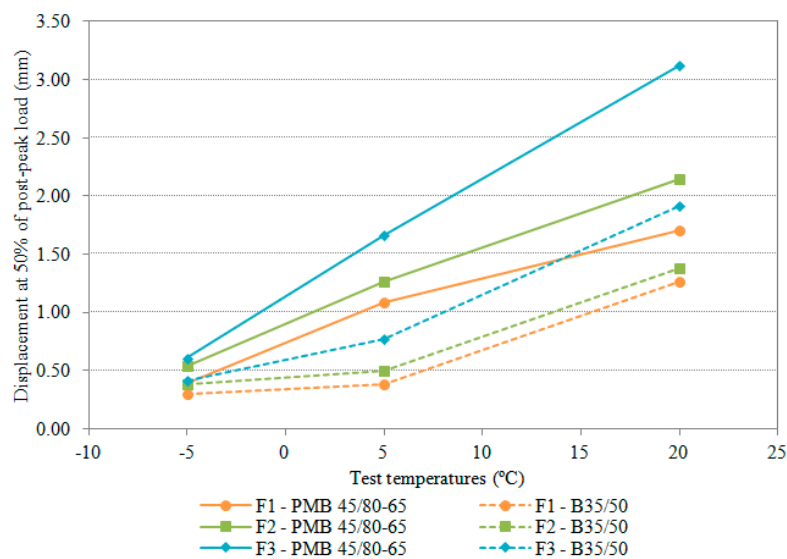


Figure 7. Displacement at 50% of post-peak load versus temperature.

At a temperature of 20 °C, clear differences can be observed. Again, two main groups can be distinguished depending on the binder type. Mixtures manufactured with the polymer modified asphalt binder present higher ductility values due to the higher deformation ability of this binder. As the temperature drops, the curves tend to come together, especially at low temperatures where smaller differences between all the mixtures are observed due to the hardening process that asphalt binders suffer.

Regarding the aggregate gradation, it is again noted that a lower content of fine aggregates leads to greater values, which indicate that the ductility of the mixture is strongly influenced by fine aggregate content.



Equation (4) presents the relationship between the displacement at 50% of post-peak load, the temperature (T), the asphalt binder penetration at 25 °C (BG) and the fine fraction content (F).

$$d_{0.5PostFmax} = -0.369 + 0.060 \times T + 0.033 \times BG - 0.015 \times F \quad (4)$$

$$R^2 = 0.854$$

The statistical results are consistent with the graphical interpretation and a correlation could be established with a coefficient of determination of 0.854. So it can be concluded that there is a correlation between this cracking parameter and fine fraction content.

### 3.1.4. Fracture Energy ( $G_F$ )

The evolution of fracture energy, which is shown in Figure 8, measures the work required for crack initiation and propagation. As expected, PMB 45/80-65 mixtures present an improved cracking response.

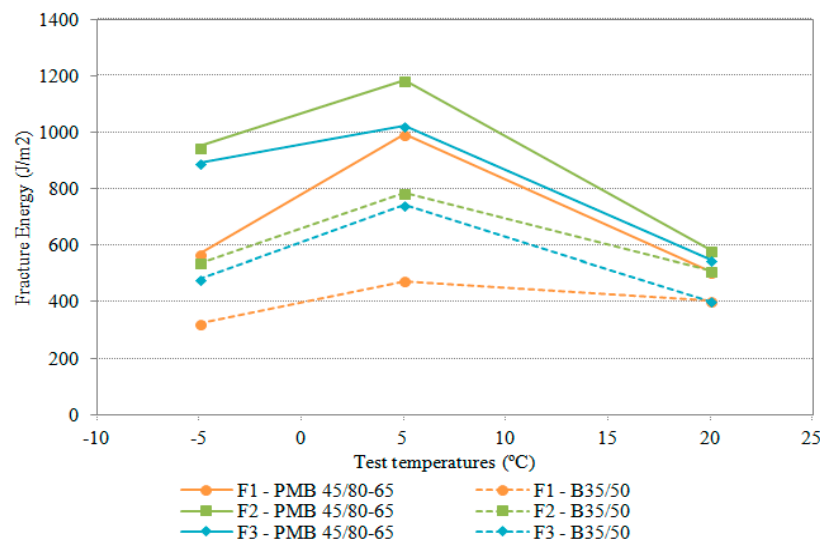


Figure 8. Fracture energy versus temperature.

However, in terms of fine fraction content, the results differ from those obtained in the above-mentioned cracking parameters. As can be observed F2 gradation requires the higher energy amount to achieve cracking followed by F3 and F1 gradation, in this order. Evaluating the statistical results, the coefficient of determination ( $R^2$ ) for the data set obtained is less than 0.500, showing a poor correlation between the fracture energy and the input parameters.

$$G_F = 58.855 + 16.743 \times BG - 5.890 \times T - 4.931 \times F \quad (5)$$

$$R^2 = 0.403$$

This may be explained by the fact that the fracture energy parameter is influenced by the maximum load as well as the post-peak curve. As the fine fraction content increases, the maximum load tends to increase but at the same time, the toughness tends to diminish. For this reason, the fine fraction content that represents a balanced combination between the maximum load and maximum toughness will result in a peak value of the fracture energy.

### 3.2. Effect of the Nominal Maximum Aggregate Size on the Cracking Resistance

The following subsection evaluates the effect of the NMAS on the designed mixtures. In this case, four different aggregate gradations have been designed and manufactured with two different asphalt binders. Figure 9 shows the obtained curves for all the mixtures at 5 °C.

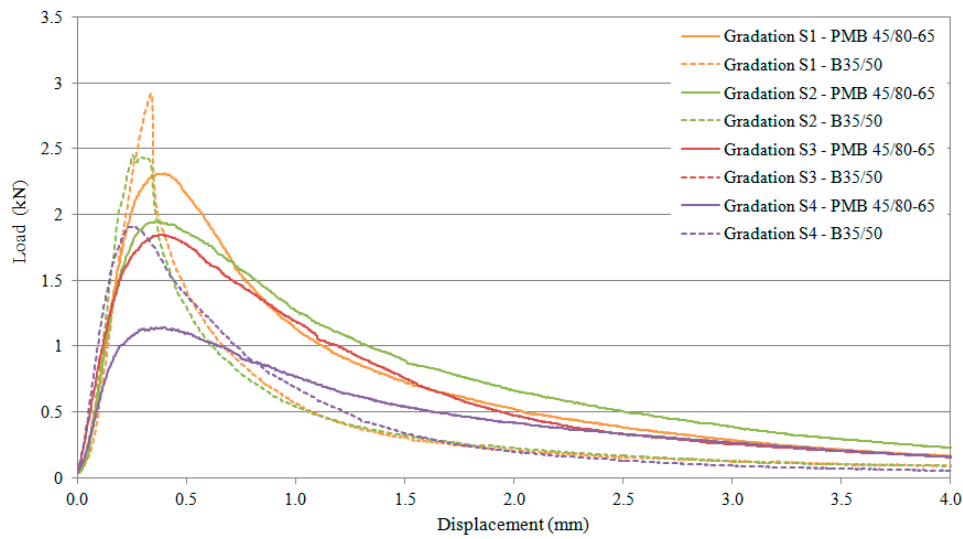


Figure 9. Stress-displacement curve at a test temperature of 20 °C.

As the NMAS decreases, peak load and initial slope also decrease, and a smoother drop of the post peak curve is observed. Such phenomena are indicators of a greater ductility, and are particularly pronounced in the case of PMB 45/80-65 mixtures.

### 3.2.1. Tensile Stiffness Index (TSI)

Figure 10 illustrates the fact that the tensile stiffness index increases with decreasing temperature for all mixtures due to the hardening process that asphalt binders suffer when temperature drops.

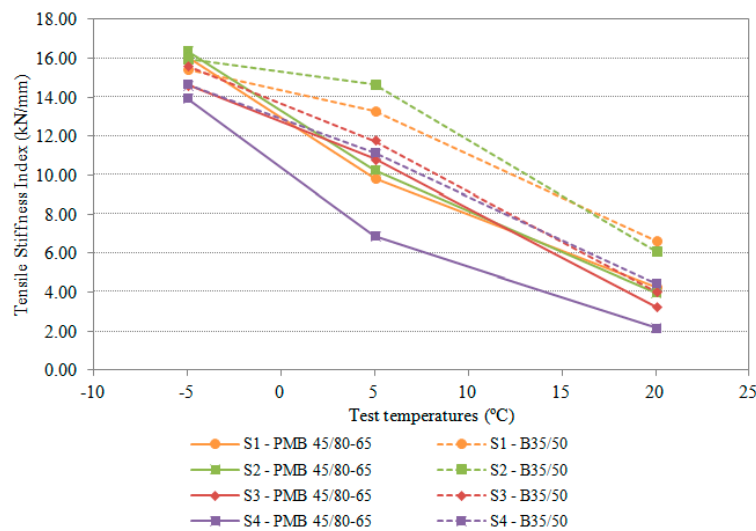


Figure 10. Tensile stiffness index versus temperature.

It can be stated that B35/50 mixtures present higher values of stiffness compared to PMB 45/80-65 mixtures, which is explained by the nature of this asphalt binder. However dissimilarities between the NMAS are not significant enough to draw conclusions visually. For this reason statistical techniques, regression analysis, have been used to establish correlations between variables. From the multi-linear regression analysis it can be concluded that the tensile stiffness index depends on the test temperature (T), the NMAS and the asphalt binder type (BG), Equation (6).

$$TSI = 15.939 - 0.441 \times T + 0.177 \times NMAS - 0.094 \times BG \tag{6}$$

$$R^2 = 0.888$$

As temperature drops, the tensile stiffness index increases and the NMAS raises.

### 3.2.2. Displacement at 50% of Post-Peak Load ( $d_{0.5PostFmax}$ )

Figure 11 provides a notion of the mixtures' ductility, which decreases as temperature drops. As expected, PMB 45/80-65 mixtures present the highest values due to greater ductility that such binder provides to the mixtures.

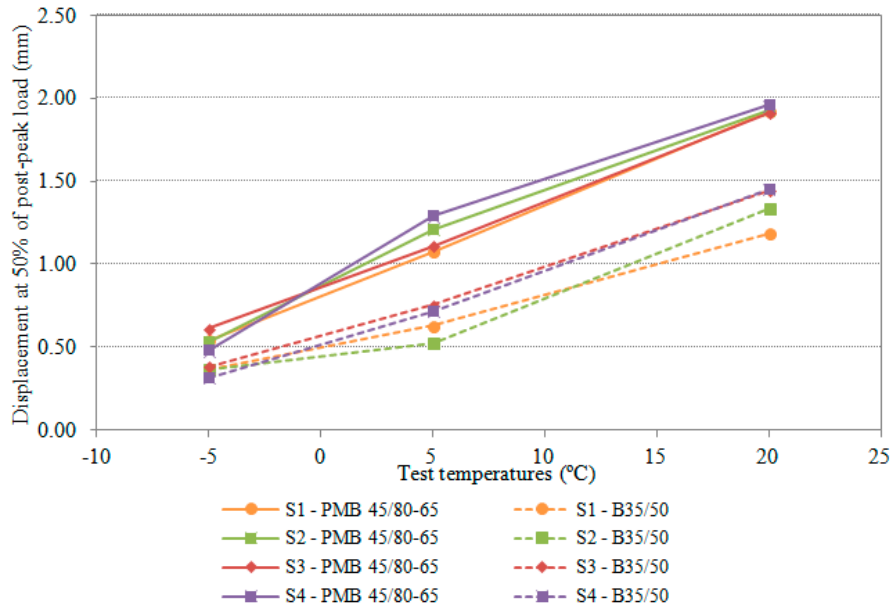


Figure 11. Displacement at 50% of post-peak load versus temperature.

Analyzing the obtained multi-linear regression equation, it can be observed that the displacement at 50% of post-peak load is strongly correlated to the test temperature (T) asphalt binder type (BG) and NMAS, Equation (7).

$$d_{0.5PostFmax} = -0.363 + 0.047 \times T + 0.023 \times BG - 0.008 \times NMAS \quad (7)$$

$$R^2 = 0.911$$

Based on the obtained results and comparing the resulting equations for fine fraction study, Equation (4), and NMAS study, Equation (7), it can be concluded that the fine fraction content exerts a stronger influence on the ductility of the mixture than the NMAS. This can be explained by the higher correlation coefficient of the fine content compared to the NMAS.

## 4. Conclusions

This study aimed to evaluate the influence of the aggregate skeleton gradation on the cracking resistance of asphalt concrete mixtures, especially those used in thin overlays. To investigate the effect of aggregate skeleton gradation, it was considered that aggregate gradation can be divided into two main factors: (1) fine fraction content and (2) nominal maximum aggregate size (NMAS). For each stage, different gradations were designed and manufactured with two different types of asphalt binders, a conventional binder, B35/50, and a polymer modified binder, PMB 45/80-65, and Fénix tested in a temperature range between  $-5$  and  $20$  °C. Based on the findings, the following conclusions can be drawn:

- The Fénix test showed enough sensitivity to compare cracking performance between the designed gradations. This test allowed the performance of all the mixtures to be evaluated under different test temperatures and relatively quickly.

- The correlation between the aggregate skeleton gradation and the cracking performance of asphalt concrete mixtures was established. Not only temperature and asphalt binder nature have a strong influence on the cracking resistance of asphalt mixtures, but also aggregate skeleton gradation.
- Asphalt concrete manufactured with PMB 45/80-65 presented an enhanced performance due to its greater ductility but as temperature drops, the performance of all the mixtures tends to converge due to the hardening process that asphalt binders suffer.
- Regarding the fine particles content, the results show a significant correlation between the fine fraction content and the measured cracking parameters. For the same asphalt binder content, asphalt mixtures manufactured with a lower content of fines aggregates resulted in a further improvement of the toughness of the mixture. Accordingly, it can be stated that the asphalt mastic and the fine fraction content have a considerable influence on the cracking resistance of asphalt concrete for thin layers.
- Regarding the influence of the NMAS, a correlation between the NMAS and cracking response of asphalt concrete has also been obtained. Indeed, as the NMAS increases so does the stiffness of the mixtures.
- It should be noted that the established correlations shall not be used to describe the cracking behavior of asphalt concrete mixtures, but to compare the relevance between the studied properties. Based on the obtained equations for the displacement at 50% of post-peak load and comparing the regression coefficients of each equation, it can be concluded the fine fraction content exerts a stronger influence on the ductility of the mixture compared to the NMAS.

The obtained results reflect the importance of considering not only the effect of the asphalt binder nature and the environmental conditions but also the aggregate skeleton gradation in the design of asphalt concrete mixtures, especially those used in thin overlays, to achieve a desirable cracking performance. In particular, special attention should be paid to the fine fraction content when designing an asphalt concrete mixture. According to the results, mixtures designed with a reduced NMAS and a low content of fine aggregated experienced a further improvement of their toughness.

**Author Contributions:** Formal analysis, L.G.-G.; Investigation, L.G.-G.; Methodology, R.M.; Project administration, R.M.; Supervision, R.M., and F.E.P.-J.; Validation, R.M.; Visualization, L.G.-G.; Writing original draft, L.G.-G.; Writing review and editing, R.M.

**Funding:** This research was funded co-funded by the Spanish Ministry of Economy and Competitiveness, through the call RETOS-COLABORACIÓN 2015 of the National Programme of Research, Development and Innovation to face the challenges of Society (RTC-2015-4025-4), within the National Scientific and Technical Research and Innovation Plan for the 2013–2016 period, and the European Union, through FEDER funds, which have the main objective of promoting technological development, innovation and quality research. It also received funding from the Agency for Management of University and Research Grants of the Catalonia Government through the Industrial Doctorates Plan.

**Conflicts of Interest:** The authors declare no conflict of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses, or interpretation of data; in the writing of the manuscript, or in the decision to publish the results.

## References

1. Hao Chen, D.; Scullion, T. Very Thin Overlays in Texas. *Constr. Build. Mater.* **2015**, *95*, 108–116. [CrossRef]
2. Newcomb, D.; Buncher, M.; Huddleston, I. Concepts of Perpetual Pavements. In *Perpetual Bituminous Pavements. Transportation Research Circular, Number 503*. Available online: <https://ntrl.ntis.gov/NTRL/dashboard/searchResults/titleDetail/PB2002104726.xhtml> (accessed on 20 December 2018).
3. Newcomb, D. Thin Asphalt Overlays for Pavement Preservation. Available online: [http://driveasphalt.org/assets/content/resources/IS-135\\_Thin\\_Asphalt\\_Overlays.pdf](http://driveasphalt.org/assets/content/resources/IS-135_Thin_Asphalt_Overlays.pdf) (accessed on 27 December 2018).
4. Im, S.; You, T.; Kim, Y.-R.; Nsengiyumva, G.; Rea, R.; Haghshenas, H. Evaluation of thin-lift overlay pavements preservation practice: mixture testing, pavement performance and lifecycle cost analysis. *J. Transp. Eng. Part B Pavements* **2018**, *144*, 3. [CrossRef]

5. Rith, M.; Kyu Kim, Y.; Woo Lee, S.; Young Park, J.; Hwan Han, S. Analysis of in situ bond strength of bonded concrete overlay. *Constr. Build. Mater.* **2016**, *111*–118. [[CrossRef](#)]
6. Gierhart, D. Thin Lift Overlays. Available online: <http://asphaltmagazine.com/thin-lift-overlays/> (accessed on 15 June 2018).
7. Nicholls, C.; Carswell, I.; Gibb, M.; Williams, J. Service lives of thin surfacing systems in the UK. In Proceedings of the Transport Reserach Arena, Gothenburg, Sweden, 12–15 June 2006.
8. Brown, E.; Hainin, M.; Cooley, L.; Hurley, G. Relationship of air voids, lift thickness and permeability in hot mix asphalt pavements. In *NCHRP Report 531. National Cooperative Highway Research Program*; The National Academies Press: Washington DC, USA, 2004. [[CrossRef](#)]
9. Rauhut, J.; Von Quintus, H.; Eltahan, A. *Performance of Rehabilitated Asphalt Concrete Pavements in LTPP Experiments (Data Collected through February 1997)*; Report No. FHWA-RD-00-029; Federal Highway Administration: Washington, DC, USA, 1997.
10. Hall, K.; Correa, C.; Simpson, A. Performance of flexible pavement rehabilitation treatments in the long-term pavement performance SPS-5 experiment. *Transp. Res. Rec.* **2003**. [[CrossRef](#)]
11. Dong, Q.; Huang, B. Evaluation of the effectiveness and cost-effectiveness of asphalt pavement rehabilitations utilizing LTPP data. *J. Transp. Eng.* **2012**, *138*, 681–689. [[CrossRef](#)]
12. Yu, Y.; Sun, L. Effect of overlay thickness, overlay material, and pre-overlay treatment on evolution of asphalt concrete overlay roughness in LTPP SPS-5 experiment: A multilevel model approach. *Constr. Build. Mater.* **2018**, *162*, 192–201. [[CrossRef](#)]
13. Kumar, V.; Saride, S. Evaluation of cracking resistance potential of geosynthetic reinforced asphalt overlays using direct tensile strength test. *Constr. Build. Mater.* **2018**, *162*, 37–47. [[CrossRef](#)]
14. Sherman, G. *Minimizing Reflection Cracking of Pavement Overlays*; NCHRP Synthesis of Highway Practice Transportation Research Board: Washington, DC, USA, 1982; Volume 92.
15. Elseifi, M.; Al-Qadi, I. A simplified overlay design model against reflective cracking utilizing service life prediction. *Transp. Res. Rec. J Transp. Res. Board* **2003**. [[CrossRef](#)]
16. Androjić, I.; Kaluder, G.; Kaluder, F. Influence of grading on the thin-layer asphalt concrete properties. *Gradevinar* **2014**. [[CrossRef](#)]
17. Zhao, A.; Al-Qadi, I.; Wang, S. Prediction of thin asphalt concrete overlay thickness and density using nonlinear optimization of GPR data. *NDT E Int.* **2018**, *100*, 20–30. [[CrossRef](#)]
18. Correia, N.; Zornberg, J. Strain distribution along geogrid-reinforced asphalt overlays under traffic loading. *Geotext. Geomembr.* **2018**, *46*, 111–120. [[CrossRef](#)]
19. Wang, Y. The effects of using reclaimed asphalt pavements (RAP) on the long-term performance of asphalt concrete overlays. *Constr. Build. Mater.* **2016**, *120*, 335–348. [[CrossRef](#)]
20. Miró, R.; Martínez, A.; Pérez-Jiménez, F.; Botella, R. Analysis of cracking resistance of bituminous mixtures using Fenix test. *Constr. Build. Mater.* **2014**, *59*, 32–38.
21. Miró, R.; Martínez, A.; Pérez-Jiménez, F.; Botella, R. Assessment of cracking resistance of bituminous mixtures by means of Fenix test. In Proceedings of the 7th RILEM International Conference On Cracking in Pavements, Delft, The Netherlands, 20–22 June 2012.
22. Pérez-Jiménez, F.; Valdés, R.; Miró, R.; Martínez, A.; Botella, R. Fénix test: Development of a new test procedure for evaluating crackin resistance in bituminous mixtures. *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board* **2010**, *2181*, 36–43.
23. Xie, X.; Lu, G.; Liu, P.; Wang, D.; Fan, Q.; Oeser, M. Evaluation of morphological characteristics of fine aggregate in asphalt pavement. *Constr. Build. Mater.* **2017**, *139*, 1–8. [[CrossRef](#)]
24. Garcia-Gil, L.; Miró, R.; Pérez-Jiménez, F. New approach to characterize cracking resistance of asphalt binders. *Constr. Build. Mater.* **2018**, in press. [[CrossRef](#)]

