

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS



UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

	MÁSTER EN INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA CIVIL	
TIPO	TRABAJO FIN DE MÁSTER	
TÍTULO	CARACTERIZACIÓN DE MEZCLAS BITUMINOSAS ABIERTAS EMPLEANDO COMO ADITIVO FIBRAS PROCEDENTES DE RESIDUOS DE ENVASES BRIK	
AUTOR	JAVIER RODRÍGUEZ TORRES	
DIRECTOR	DANIEL CASTRO FRESNO MIGUEL ÁNGEL CALZADA PÉREZ	FECHA Santander, a 30 de Septiembre de 2014

RESUMEN

Este trabajo fin de máster forma parte del proyecto “Rehabilitación Hidrológica Urbana”, que se está desarrollando actualmente de forma conjunta por el Grupo de Investigación de Tecnología de la Construcción (GITECO) y el Grupo de Caminos de Santander (GCS).

El objetivo general del proyecto es demostrar la viabilidad técnica de los residuos de envases de brik como estabilizador de mezcla bituminosa drenante. No sólo se establecerá la adecuación del residuo, sino que también se buscará demostrar una mayor durabilidad para las mezclas porosas.

Para ello se parte desde dos puntos diferentes:

- El empleo de fibras orgánicas o sintéticas se ha generalizado dentro de las mezclas bituminosas con alto contenido de ligante, combatiendo de esta manera el escurrimiento generado por tal adición.
- La inclusión de contenidos de betún más altos se debe a una búsqueda de mayor durabilidad en todo tipo de mezclas bituminosas, pero con más razón en las porosas, cuyo plazo de utilización sigue siendo escaso.

El trabajo fin de Máster que se presenta a continuación recoge las principales conclusiones realizadas hasta la fecha.

AGRADECIMIENTOS

La realización del presente proyecto se debe a la implicación del grupo GITECO en el desarrollo de investigaciones originales a partir de proyectos en marcha, como es el de “Rehabilitación Hidrológica Urbana”, que tiene como Investigador Principal a Jorge Rodríguez; en el que se parte de un objetivo particular, hasta completar muy diferentes líneas de investigación.

También hay que agradecer al Grupo Caminos Santander su apoyo y colaboración para el desarrollo de una extensa ronda de ensayos. Como es bien sabido, la planificación te marca un número de probetas, aunque acabas fabricando esa cantidad multiplicada; y más en un proyecto como el presente, donde no existe experiencia anterior.

Personalmente, en primer lugar, he de agradecer el compromiso de mis directores; tanto Daniel como Miguel Ángel ha sido cercanos y cómplices con cada uno de los pasos dados. En cuanto al trabajo de laboratorio, no hubiera sido posible sin la colaboración de Miguel, y también de Pedro, gran compañero de betún y áridos. Igualmente al resto de compañeros de GITECO: Valerio, Dani, Carlos, Gonzalo, Carmen, Laura; con los que compartir investigaciones más allá del laboratorio y el despacho.

Por último, quiero agradecer al grupo JRS Iberia, empresa que comercializa VIATOP, por la facilidad con la que me suministraron su material y las indicaciones de trabajo en laboratorio. También a CISE, sin los cuáles mi aspecto creativo e imaginativo se hubiera mantenido oculto.

Tabla de contenidos

TABLA DE CONTENIDOS	I
ÍNDICE DE FIGURAS	III
ÍNDICE DE TABLAS	V
1. MEMORIA SOBRE LA ENSEÑANZA Y EL APRENDIZAJE.....	1
1.1. MEMORIA SOBRE LA ENSEÑANZA Y EL APRENDIZAJE	2
1.2. ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO	4
2. INTRODUCCIÓN	6
2.1. MARCO DEL TRABAJO Y ANTECEDENTES.....	7
2.2. OBJETIVOS.....	7
2.2.1. <i>Generales</i>	7
2.2.2. <i>Particulares</i>	8
3. ESTUDIO DEL ESTADO DEL ARTE	9
3.1. MEZCLAS BITUMINOSAS EN CALIENTE	10
3.1.1. <i>Introducción</i>	10
3.1.2. <i>Mezclas SMA (Stone Mastic Asphalt)</i>	11
Fibras.....	12
Granulometría.....	14
3.1.3. <i>Mezclas drenantes</i>	17
Áridos.....	19
Ligantes.....	22
Ensayos de caracterización	24
3.2. TIPOLOGÍA DE FIBRAS EN MEZCLAS BITUMINOSAS.....	34
3.2.1. <i>Introducción</i>	34
3.2.2. <i>Celulosa</i>	34
3.2.3. <i>Poliéster</i>	38
3.2.4. <i>Lana mineral</i>	42
4. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	46
4.1. ACTIVIDADES REALIZADAS.....	47
4.1.1. <i>Introducción</i>	47
4.1.2. <i>Fibras</i>	47
4.1.3. <i>Granulometría</i>	48

4.2.	MATERIALES EMPLEADOS	49
4.2.1.	Árido.....	49
4.2.2.	Betún	50
4.2.3.	Fibras.....	51
	Viatop®.....	51
	Brik.....	52
4.3.	ENSAYOS REALIZADOS.....	56
4.3.1.	Contenido de Huecos (UNE EN 12697-8).....	56
4.3.2.	Escurrimiento de Ligante (UNE EN 12697-18).....	57
4.3.3.	Porosidad.....	58
4.3.4.	Permeabilidad	59
4.3.5.	Pérdida de Partículas (UNE EN 12697-17).....	61
4.3.6.	Compresión Triaxial Cíclica (UNE EN 12697-25).....	63
4.3.7.	Medida de la Compactabilidad de Mezcla con la Compactadora Giratoria.....	65
5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	67
5.1.	CARACTERIZACIÓN GRANULOMÉTRICA	68
5.2.	ENSAYOS PARA DOSIFICACIÓN DE FIBRAS.....	71
5.2.1.	Ensayo de Pérdida de Partículas.....	71
5.3.	ENSAYOS DE DISEÑO DE MEZCLA	72
5.3.1.	Contenido de Huecos y Porosidad	72
5.3.2.	Escurrimiento	75
5.3.3.	Permeabilidad	77
5.3.4.	Pérdida de Partículas.....	78
5.3.5.	Compresión Cíclica Triaxial.....	80
5.3.6.	Ensayo de Compactación Giratoria	82
6.	CONCLUSIONES.....	85
6.1.	CONCLUSIONES	86
6.2.	FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	88
7.	REFERENCIAS	89

Índice de figuras

<i>Ilustración 1. Definición de dureza a partir de los datos del ensayo de tracción indirecta [6].</i>	13
<i>Ilustración 2. Ejemplo de quiebro entre fracción fina y gruesa para tamaño nominal de 19mm [9].</i>	14
<i>Ilustración 3. Distribución tridimensional de las fracturas antes y después del ensayo de pista para una mezcla porosa [16].</i>	18
<i>Ilustración 4. Cambio de trayectoria en la granulometría PA 16 a partir del tamiz 4 mm (punto de ruptura).</i>	21
<i>Ilustración 5. Permeabilidad en mezclas porosas con distintos tipos de ligante: AR, convencional; MA, modificado; HV, alta viscosidad [27].</i>	24
<i>Ilustración 6. Porcentajes de pérdida por desgaste en ensayo Cántabro [27].</i>	24
<i>Ilustración 7. Esquema de la configuración del ensayo de permeabilidad [25].</i>	27
<i>Ilustración 8. Típico gráfico de deformación permanente en mezcla bituminosa por cargas cíclicas [31].</i>	29
<i>Ilustración 9. Índices CEI y TDI en mezclas de árido grueso y fino [33].</i>	31
<i>Ilustración 10. Definición de los índices MSI y MRI para una mezcla con granulometría AC 22 y ligante B 60/70 [34].</i>	32
<i>Ilustración 11. Fibra de celulosa sin granular y granulada con betún.</i>	35
<i>Ilustración 12. Contenido de huecos y permeabilidad en mezclas porosas. Tipos de mezclas: AR, convencional; PMA, modificado; HVA, alta viscosidad. Tipos de estabilizadores: F, fibra de celulosa; L, cal hidratada [37].</i>	37
<i>Ilustración 13. Fibras de poliéster, celulosa y lignina [35].</i>	39
<i>Ilustración 14. Módulo complejo y ángulo de fase respecto frecuencias (izda.) y pérdida de módulo (dcha.) para betunes originales y modificados con diferentes dosificaciones de poliéster [38].</i>	40
<i>Ilustración 15. Gráfica tracción-deformación para betún mezclado con fibras minerales [39].</i>	41
<i>Ilustración 16. Concentraciones de tensiones debidas al diámetro de fibra [39].</i>	41
<i>Ilustración 17. Micrografías electrónicas de barrido de cuatro fibras diferentes [39].</i>	44
<i>Ilustración 18. Muestra de árido ofítico y filler de aportación calizo.</i>	49
<i>Ilustración 19. Trituradora Mateu&Solé 19/25 M (LADICIM, Universidad de Cantabria).</i>	53
<i>Ilustración 20. Muestra del triturado de brik tamizado por tamaños: 2-1 mm; 1-0,5 mm; 0,5-0,25 mm; <0,25mm.</i>	54
<i>Ilustración 21. Fibras de brik aglomeradas con betún antes y después de calentar en estufa.</i>	55
<i>Ilustración 22. Cesta de escurrimiento y material de ensayo.</i>	58
<i>Ilustración 23. Permeámetro de carga variable (GITECO, GCS).</i>	60
<i>Ilustración 24. Representación de las presiones ejercidas sobre la probeta por carga cíclica en bloque.</i>	63
<i>Ilustración 25. Dispositivo para ensayo de compresión triaxial cíclica (GITECO).</i>	64
<i>Ilustración 26. Compactadora giratoria (GCS/GITECO).</i>	65
<i>Ilustración 27. Curvas granulométricas de centro de huso y de proyecto (PA 16).</i>	69
<i>Ilustración 28. Comparación entre granulometrías y la línea de máxima compacidad.</i>	69
<i>Ilustración 29. Representación del porcentaje de huecos respecto a porcentajes de aditivo.</i>	73
<i>Ilustración 30. Porcentaje de huecos medido geoméricamente (arriba) y porcentaje de huecos</i>	

<i>interconectados (abajo) para un 5% de betún sobre mezcla.</i>	74
<i>Ilustración 31. Porcentaje de huecos medido geoméricamente (arriba) y porcentaje de huecos interconectados (abajo) para un 5,5% de betún sobre mezcla</i>	74
<i>Ilustración 32. Porcentaje de escurrimiento según adición de fibra para 5% de betún sobre mezcla.</i>	75
<i>Ilustración 33. Porcentaje de escurrimiento según adición de fibra para 5,5% de betún sobre mezcla.</i>	75
<i>Ilustración 34. Porcentaje de escurrimiento de ligante modificado en probetas con un 5% de betún sobre mezcla.</i>	76
<i>Ilustración 35. Escurrimientos de probetas con un contenido de 5% de betún sobre mezcla: sin fibra (izda.) y con un 0,25% de fibra de brik (dcha.).</i>	76
<i>Ilustración 36. Correlaciones entre la capacidad permeable y el volumen de huecos (rojo), y la porosidad (azul).</i>	78
<i>Ilustración 37. Porcentaje de pérdidas en ensayo Cántabro húmedo para mezclas con 5% de betún s/m.</i>	79
<i>Ilustración 38. Porcentaje de pérdidas en ensayo Cántabro húmedo para mezclas con 5,5% de betún s/m.</i>	80
<i>Ilustración 39. Deformación permanente en mezcla porosa con VIATOP (0,5% sobre mezcla).</i>	81
<i>Ilustración 40. Gráfico de los índices volumétricos para mezcla PA 16 con 5% betún sobre mezcla sin adición de fibra.</i>	82

Índice de tablas

Tabla 1. Resultados de dureza para distintas fibras [6].	13
Tabla 2. Rangos recomendados para los ratios granulométricos en mezclas SMA [9].	16
Tabla 3. Tamaños de control de tamices para diversos tamaños máximo de árido [9].	16
Tabla 4. Factores que influyen en el comportamiento de mezclas PA.	19
Tabla 5. Valores mínimos de los índices de post-compactación para cumplir las especificaciones de pista, referentes a capa de rodadura [34].	33
Tabla 6. Características técnicas del betún convencional 50/70.	50
Tabla 7. Características técnicas de la celulosa VIATOP®.	51
Tabla 8. Propiedades del betún de envuelta del pellet.	51
Tabla 9. Características técnicas del granulado VIATOP®.	52
Tabla 10. PG-3: Anejo 543.5.1.5 y PG-3 (2004): Anejo 542.5.1.	62
Tabla 11. Valores de los parámetros del método Bailey.	70
Tabla 12. Ensayo de pérdida de partículas en seco para elección de tamaño de fibra.	71
Tabla 13. Ensayo de pérdida de partículas en seco para elección de formato y dosificación de fibra.	72
Tabla 14. Valores de permeabilidad para distintos tipos de fibra, y diferentes contenidos de betún y fibra.	77
Tabla 15. Ensayo de abrasión seco para mezclas referencia y con aditivo brik.	79
Tabla 16. Resultados de deformación vertical según mezcla, temperatura y tipo de carga.	81
Tabla 17. Índices volumétricos calculados con los límites $N_{98\%Marshall}$ y N_{Post} .	82
Tabla 18. Índices volumétricos para las mezclas referencia con 4,5% betún sobre mezcla [41].	83
Tabla 19. Valores de energía para mezcla PA 16 con betún convencional 60/70.	83

1. MEMORIA SOBRE LA ENSEÑANZA Y EL APRENDIZAJE

1.1. MEMORIA SOBRE LA ENSEÑANZA Y EL APRENDIZAJE

La memoria sobre la Enseñanza y el Aprendizaje es un capítulo relacionado con la metodología seguida durante el Máster en Investigación en Ingeniería Civil para adquirir las competencias asociadas al mismo. Esta memoria se divide en 11 actividades diferenciadas:

1. **Trabajo individual dirigido.** Este Trabajo de Fin de Máster ha sido dirigido por los profesores titulares de universidad Daniel Castro Fresno y Miguel Ángel Calzada, directores de los grupos GITECO y GCS, respectivamente.
2. **Medios de investigación.** Se han utilizado todos los medios de investigación al alcance del estudiante, tales como:
 - Bases de datos: Web of Knowledge, Scopus, Engineering Village, Google académico y tesis en red.
 - Gestores de bases datos y citas bibliográficas: RefWorks y Write-N-Cite.
3. **Equipos necesarios.** En el desarrollo de este trabajo se han realizado una serie de ensayos para lo que se ha hecho uso de los equipos del Laboratorio de Geosintéticos de la Universidad de Cantabria (LAGUC) y los del Grupo de Caminos de Santander (GCS).
4. **Herramientas analíticas.** Se han usado las herramientas analíticas necesarias para la obtención e interpretación de los resultados, asistiendo para ello a los cursos necesarios impartidos en la Universidad de Cantabria o por iniciativa del propio grupo de investigación al que pertenece el estudiante del Máster.
5. **Presentación de resultados parciales con discusión por parte del profesor tutor.** A lo largo de todo el proceso de investigación llevado a cabo en el Máster se han presentado de forma periódica los resultados a los tutores. Del mismo modo, se ha discutido con ellos todos los aspectos relacionados con la investigación y su metodología, los cuales han derivado en la obtención de los resultados finales y su posterior discusión.
6. **Comunicación tutor-estudiante.** La comunicación entre tutor y estudiante ha sido fluida en todo momento mediante reuniones periódicas, seguimiento de la investigación y discusión de resultados.
7. **Reuniones de seguimiento.** A lo largo del Máster se han tenido reuniones periódicas de

seguimiento de la investigación llevada a cabo por el estudiante.

8. Consultas dirigidas al análisis de la bibliografía científica. Análisis crítico de proyectos.

En relación con este punto se ha asistido al curso que da la Biblioteca de la Universidad de Cantabria sobre referencias bibliográficas, utilización de bases de datos, gestores de referencias y citas. Además, se ha tenido acceso a otros proyectos similares para su análisis crítico, como base de la investigación a desarrollar.

9. Exposición de trabajos. La exposición de trabajos ha sido una constante a lo largo de todo el proceso de aprendizaje del Máster. Se han realizado trabajos en todas las asignaturas fomentando la relación entre el profesor y el estudiante, y el conocimiento más cercano de las temáticas impartidas en cada asignatura. Finalmente, cada trabajo ha sido expuesto en una presentación oral para su calificación posterior.

Asignatura	Tipo	Créditos	Convocatoria	Calificación	Nota
Diseño Geométrico de Mallas Espaciales	OPTATIVA	3	13/14	SOBRESALIENTE	9
Diseño de Redes de Transporte y Almacenamiento en Sistemas Logísticos	OPTATIVA	3	13/14	MATRICULA DE HONOR	10
Diseño y Aplicación de Geosintéticos en Carreteras	OPTATIVA	3	13/14	MATRICULA DE HONOR	10
Gráficos por Computador aplicados a la Modelización del Impacto Visual	OPTATIVA	3	13/14	SOBRESALIENTE	9
Modelos Cartográficos, Geodésicos y Fotogramétricos de Observación del Territorio	OPTATIVA	3	13/14	SOBRESALIENTE	9
Modelos Matemáticos y Aplicación a la Ingeniería de Tráfico	OPTATIVA	3	13/14	MATRICULA DE HONOR	10
Modelos de Datos y Metodologías de Sistemas de Información Georreferenciada	OPTATIVA	3	13/14	SOBRESALIENTE	9
Modelos de Redes de Transporte Público y Privado con y sin Congestión	OPTATIVA	3	13/14	NOTABLE	7
Modelos de Simulación de Sistemas de Transporte	OPTATIVA	4	13/14	SOBRESALIENTE	9
Seminarios de Investigación I	OPTATIVA	4	13/14	SOBRESALIENTE	9
Seminarios de Investigación II	OPTATIVA	6	13/14	SOBRESALIENTE	9
Sistemas de Estabilización y Protección en Taludes y Laderas	OPTATIVA	3	13/14	MATRICULA DE HONOR	10

10. **Trabajos similares.** Se ha tenido acceso a trabajos desarrollados en el grupo de investigación, tales como informes, tesis doctorales, artículos, etc.; en la temática en la que el estudiante realiza su trabajo fin de Máster, con el objetivo de poder facilitar su labor en el desarrollo del estudio del estado del arte.
11. **Conferencias, congresos.** En el desarrollo de este trabajo fin de Máster se están generando una serie de resultados que podrían formar parte de publicaciones o presentaciones en congresos.

1.2. ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO

Este trabajo está estructurado en base a las sugerencias de procedimiento de realización del trabajo de Fin de Máster de la dirección del Máster en Investigación en Ingeniería Civil de la Universidad de Cantabria. El documento se inicia con un resumen y los agradecimientos, seguidos del índice del trabajo Fin de Master, el índice de figuras y el índice de tablas. Después de esto, se desarrolla el trabajo en 6 grandes capítulos. En el capítulo 7, y último, se incluyen las referencias bibliográficas.

El primer capítulo del trabajo fin de Máster presenta la memoria sobre la enseñanza y el aprendizaje, que muestra la metodología seguida durante el Máster para adquirir las competencias asociadas al mismo. Esta memoria se divide en 11 actividades y finaliza con un último apartado que presenta la estructura del presente documento.

El capítulo 2 es una introducción al Trabajo Fin de Máster, que presenta el marco y antecedentes de este trabajo, y los objetivos e hipótesis del mismo.

En el tercer capítulo del trabajo se desarrolla el Estudio del Estado del Arte, que incluye la filosofía derivada de las mezclas SMA y su posible inclusión sobre las mezclas porosas.

El capítulo 4 refleja la metodología de la investigación seguida en este trabajo. Se describen en este apartado los materiales empleados y los ensayos realizados durante la investigación.

El quinto capítulo muestra los resultados obtenidos en los ensayos descritos en el

capítulo 4, con el consiguiente análisis y discusión de los mismos.

Por último, el capítulo sexto recoge las conclusiones de los resultados de los ensayos y da respuesta a los objetivos e hipótesis planteados en el inicio del trabajo. Además, en el apartado final de este capítulo, se proponen una serie de líneas futuras de investigación para continuar a partir de este trabajo.

2. INTRODUCCIÓN

2.1. MARCO DEL TRABAJO Y ANTECEDENTES

El presente Trabajo Fin de Máster es el resultado de las actividades realizadas dentro de la línea de investigación "Rehabilitación Hidrológica Urbana", desarrollada de forma conjunta por el Grupo de Investigación de Tecnología de la Construcción (GITECO) y el Grupo de Caminos de Santander (GCS).

2.2. OBJETIVOS

El uso generalizado de mezclas bituminosas porosas tanto para vías urbanas como para vías interurbanas, provoca el auge de líneas de investigación que encaren el aumento de la vida útil de dichas mezclas, situada actualmente en los 7-8 años [1]. Para conseguir el pretendido avance de durabilidad, se hace necesaria la adición de mayores cantidades de betún asfáltico, que a su vez, tiene que ser retenido, sin que se escurra en el momento de la mezcla y su compactación. Productos que habitualmente son utilizados para esa función de estabilización de la mezcla van desde fibras de celulosa hasta la lana mineral; incluyendo otros de tipo pulverulento como la cal hidratada.

En este trabajo, tendremos en cuenta esos productos como referencia para la estabilización de mezcla porosa, pero estableciendo un componente responsable con el Medio Ambiente, mediante la utilización de partículas de envases de brik con ese fin. Primero la Ley 11/97 de Envases y Residuos de Envases, y más tarde, la directiva europea 2008/98/EC, exhortan a un reciclaje que llegue al 50% antes de 2020. En el caso de los envases de brik, según Ecoembes, contamos en España con un volumen de reciclaje por encima de las 75.000 toneladas, marcando una cuota de reciclado por encima del 70%. La aplicación práctica de este residuo como estabilizador de mezcla bituminosa, haría aumentar dicha cuota, además de concederle una segunda vida útil no explorada hasta el momento.

2.2.1. GENERALES

El objetivo general del proyecto es demostrar la viabilidad técnica de los residuos de envases de brik como estabilizador de mezcla bituminosa con altos contenidos de ligante. No sólo se establecerá la adecuación del residuo, sino que también se buscará demostrar una mayor durabilidad para las mezclas porosas.

Para alcanzar este objetivo, se llevarán a cabo diversos ensayos de laboratorio que comparen su funcionamiento con el que hasta ahora tienen los productos comerciales presentes en el mercado, además de con las mezclas convencionales dispuestas para estas mezclas.

2.2.2. PARTICULARES

Los objetivos particulares que se están llevando a cabo en el desarrollo del proyecto, y cuyos resultados parciales se exponen como parte de este trabajo fin de máster, son los siguientes:

- Análisis de la integración de residuos de envases en la mezcla bituminosa.
- Evaluación de la resistencia adquirida por mezclas porosas con aditivo de celulosa.
- Adecuación de las mezclas porosas a la metodología de diseño marcada por las SMA.

3. ESTUDIO DEL ESTADO DEL ARTE

3.1. MEZCLAS BITUMINOSAS EN CALIENTE

3.1.1. INTRODUCCIÓN

Las mezclas bituminosas son aglomerados formados por áridos (de cantera o artificiales) envueltos por una capa homogénea de ligante hidrocarbonado (betún). Dentro de esta simple definición, las características presentes en ellas pueden cambiar debido a la granulometría, el tipo de ligante, e incluso, otros aditivos que puedan modificar sus prestaciones.

La utilización de este material se dedica, esencialmente, a las capas finales de las secciones de carretera. Apenas 20-30 cm que procuran grandes niveles de comodidad y seguridad al usuario de la vía, y que también, confieren de resistencia estructural y establecen el reparto de las cargas de tráfico al resto de capas presentes en la plataforma de la carretera.

El presente trabajo se centrará en el comportamiento exigido a la capa de rodadura, aquella que entra en contacto con los vehículos y los agentes climáticos, y que por ello, necesita de especificaciones propias. Concretamente, el estudio se centrará en las posibilidades que confiere el incluir fibra dentro del hormigón bituminoso. Se trata de una técnica muy extendida en el caso de mezclas tipo SMA (*Stone Mastic Asphalt*, gran cantidad de betún y pocos huecos); no así en las de tipo drenante o poroso, que suelen disponer de menor contenido de ligante debido a su granulometría más abierta.

La inclusión de fibras tiene por objetivo el aumentar la vida útil de las mezclas porosas, con un periodo de servicio limitado debido a su vulnerabilidad ante el desgaste (pérdida de partículas). Este deterioro provoca que su durabilidad estructural sea mucho menor que su durabilidad funcional, ésta última relacionada con la obturación de sus huecos.

La dilatada experiencia del comportamiento de las fibras en mezclas cerradas, tanto SMA como, en menor medida, AC; establecen un positivo punto de inicio para su incorporación en mezclas bituminosas abiertas que, con un menor contenido de finos, puedan requerir de estabilizadores que cohesionen su estructura interna.

3.1.2. MEZCLAS SMA (STONE MASTIC ASPHALT)

Conocidas como *Splittmastixasphalt* en los países germanoparlantes, o *Stone Matrix Asphalt*, en el caso de los Estados Unidos; estas mezclas bituminosas se han convertido en uno de los tipos más utilizados debido a su gran capacidad resistente frente a deformaciones plásticas y su elevada durabilidad. Surgen a mediados de la década de los 60 en Alemania, donde la mayoría de vehículos, y más en épocas invernales, hacen uso de neumáticos claveteados. Las SMA combaten contra ese daño que se basaba en un excesivo desprendimiento entre el árido grueso y el ligante, pero que sin embargo, se convirtió en una más de las capacidades que traía consigo su composición.

La forma más acertada para explicar cómo se forma una mezcla SMA, es tomarla por un aglomerado bituminoso que consta de dos componentes básicos: un esqueleto mineral de árido grueso a modo de Macadam y un mástico con alto contenido de betún. Ambos componentes combinados confieren a las mezclas de una durabilidad y una estabilidad más que notable, mejorando las prestaciones de otras mezclas cerradas o abiertas [2]. La primera vez que estas mezclas formaron parte de una normativa fue en Alemania (ZTV Asphalt-StB, 1984), ahora siendo reguladas por normativa europea EN 13108-5; aunque en países como España, apenas ha tenido presencia en nuestras principales carreteras. Otro países europeos, en cambio, han establecido una metodología de diseño propia, en la que describen granulometría, tipos de áridos y ligantes, e inclusión de estabilizadores.

Su aplicación se reduce a capa de rodadura donde hacer frente a las principales cargas de tráfico y de condicionantes climáticos, demostrando también mejoras en cuanto a la proyección de ruido circulatorio.

Una de las novedades que trae consigo este tipo de mezclas es la utilización de estabilizadores (fibras, polímeros), capaces de transferir los esfuerzos desde el potente esqueleto mineral hacia el elevado contenido de mástico. Esa transferencia de esfuerzos sólo se refiere a la situación en que el material ya está compactado; actuando como sostén del aglomerado en los procesos anteriores (transporte y compactación), evitando la segregación del ligante. Adicionalmente, estos componentes también consiguen envolver al árido con una capa más gruesa de ligante, permitiendo mejor respuesta ante fatiga y envejecimiento del mismo. Investigaciones anteriores indican que el uso de las fibras ha de ser generalizado en el caso de este tipo de mezclas[3], y que quizás, sea un elemento a incluir en otras con distintas características.

Fibras

Los primeros estudios con fibras tenían por objetivo el conocer la influencia que éstas tendrían sobre las propiedades ingenieriles, es decir, que no producían una respuesta inconveniente ante los principales deterioros de un pavimento de carretera[4]. Dentro de las fibras utilizadas se pueden diferenciar dos grandes grupos: fibras minerales u orgánicas. En ambos casos la mezcla tuvo una adhesión adecuada y el compromiso conjunto no debilitó el trabajo de la mezcla patrón, sino que influyó decisivamente para aumentar sus resistencias. Alguno de los materiales habituales son la celulosa, la lana mineral, y otras fibras de carácter polimérico (poliéster). Todas ellas han mostrado buen comportamiento, aunque cada una de ellas tiene sus propias características y serían adecuadas para distintos tipos de mezclas.

En el caso del problema de escurrimiento, debido al alto contenido de ligante y mástico dentro de la SMA; cualquiera de las fibras presentadas sería capaz de limitar la segregación, pero no pueden proporcionar el mismo grado de dureza o resistencia a la fractura[5].

La celulosa es uno de los materiales comerciales más extendidos para estas prácticas, ya que su capacidad de absorción hace que se necesite mayor cantidad de betún, repercutiendo en un aumento de la durabilidad de la mezcla. Las SMA se podrían situar en niveles de 15-20 años de vida útil con un adecuado mantenimiento, gracias a ese mayor contenido de betún (acentuado en el caso de la celulosa).

Por otra parte, el poliéster también es habitualmente utilizado, y en su caso, puede ser más conveniente para la mezclas SMA[3]. Estas fibras son capaces de con un menor contenido de ligante, aumentar la resistencia a fatiga y a deformaciones plásticas gracias a la transferencia de esfuerzos desde la estructura mineral al mástico reforzado con ellas. Este mejor servicio se denota en los resultados de Putman y Amirkhanian (2004), en los que también toman en consideración la dureza “como el área bajo la curva de tensión-deformación por tracción hasta una deformación de dos veces que originará en la máxima tensión de tracción”[6] (Ilustración 1). No sólo el poliéster demostró una mayor dureza tanto en seco como en húmedo, sino que la inclusión de materiales de desecho como fibras de textiles o residuo de neumático, mostraron un aceptable comportamiento; mejorando las propiedades que nos provee la celulosa en ese aspecto (Tabla 1).

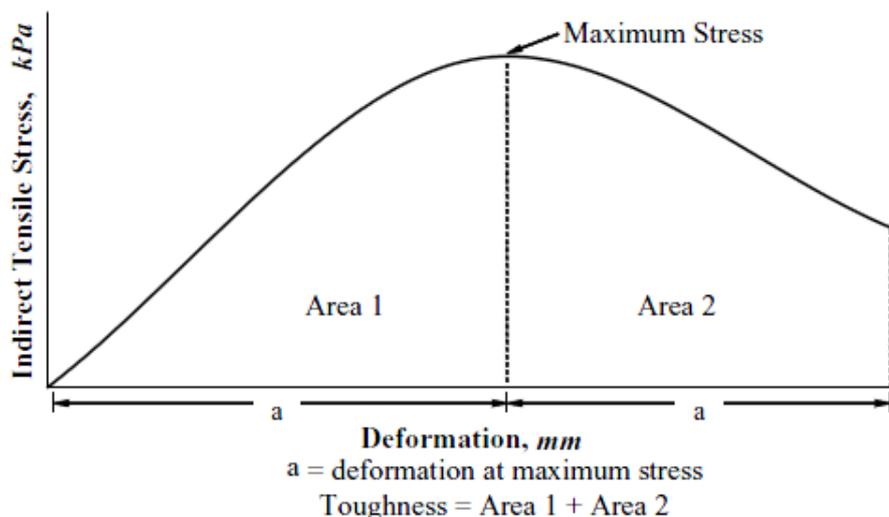


Ilustración 1. Definición de dureza a partir de los datos del ensayo de tracción indirecta [6].

Tabla 1. Resultados de dureza para distintas fibras [6].

Fibra	Dureza en seco (N/mm)	Dureza en húmedo (N/mm)	Porcentaje de pérdida de dureza (%)
Celulosa	3,9	3,4	12,7
Neumático	4,0	4,0	-0,2
Textil	4,5	3,9	14,7
Poliéster	4,5	4,2	7,3

Otro punto de vista que puede surgir a partir de la utilización de fibras, es que éstas actúen de modificador de la reología del betún. Por ello, en diversas líneas de investigación[7,8] se estudia el grado de implicación que podrían tener estos estabilizadores en las variaciones de los ligantes, siendo comparados con los habituales modificados por polímeros o neumáticos. Mokhtari et al. (2012) concluye que la inclusión de un betún modificado con SBS (estireno-butadieno-estireno) podría ser considerado como una mejor solución para aumentar el rendimiento de las mezclas SMA, aunque no lo haría de una manera significativa. La sensibilidad al agua que se esperaría de las fibras de celulosa es evitada por una adecuada envuelta del ligante, lo que repercute en una menor diferencia con el modificador polimérico.

Granulometría

Tradicionalmente, las mezclas bituminosas han sido diseñadas usando un procedimiento de prueba-error para seleccionar la granulometría de áridos adecuada. No existía una metodología que resultara en un grado de compromiso óptimo por parte del esqueleto mineral y, por ello, investigaciones como las de Bailey y las que desarrollaron sus avances[9,10], permiten una caracterización más fidedigna de la mezcla. Estos trabajos supusieron los primeros pasos dados por las administraciones americanas hacia el uso generalizado de las mezclas SMA, y actualmente, establecen las herramientas básicas para crear una mezcla con el enclavamiento y el volumen de huecos esperados.

El método Bailey es un enfoque sistemático que mezcla áridos para proveer trabazón entre ellos, usando esa trabazón como estructura mineral sobre la que completar la granulometría como empaquetamiento de la misma; dando resistencia ante deformaciones permanentes, al mismo tiempo que se mantienen las propiedades volumétricas de la mezcla. Por todo ello, los principios básicos de la metodología se basan en el correcto empaquetamiento de los áridos y en la definición de árido grueso y fino; eso permite una combinación de áridos por volumen y un análisis más cuantitativo de la mezcla.

La definición de árido grueso y árido fino, habitualmente, se basa en experiencias anteriores que se remiten al tamaño de 4 mm como el límite entre ambas fracciones (Ilustración 2). En el caso de esta metodología, la definición es más sencilla y cercana a la realidad existente: el árido grueso es aquel que es capaz de crear huecos en una unidad de volumen dada; mientras que el fino es el que consigue rellenar esos huecos creados por el grueso.

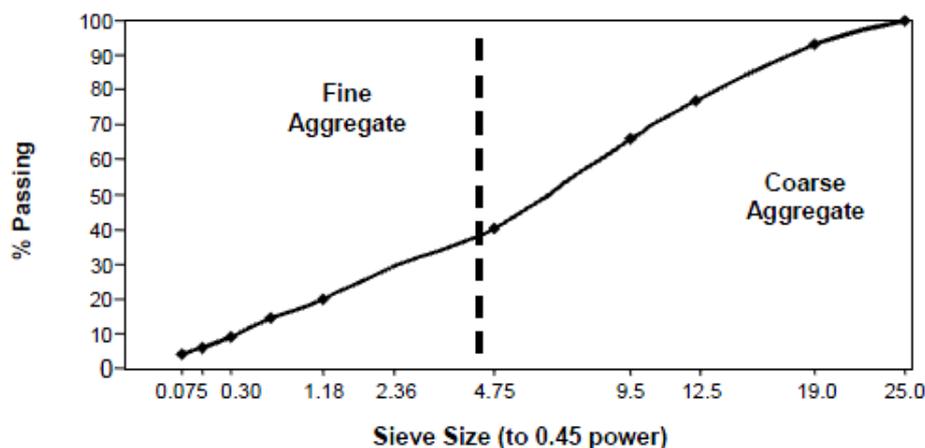


Ilustración 2. Ejemplo de quiebro entre fracción fina y gruesa para tamaño nominal de 19mm [9].

El tamaño que define a qué fracción pertenece cada tamaño es conocido como el tamiz de control primario (PCS) (1), valor relacionado con el tamaño máximo nominal (NMPS, tamiz que retiene más del 10% del árido) de la mezcla que se pretenda diseñar:

(1)

El valor de 0,22 usado en la ecuación de la malla de control se determinó a partir de un análisis 2D y 3D del empaquetamiento de partícula de diferente forma. El análisis 2D de la combinación de partículas muestra que la tasa del radio de las partículas está en el rango de 0,155 (completamente redondeadas) a 0,289 (completamente planas) con un valor promedio de 0,22[10]. El análisis 3D de la combinación de partículas da un resultado similar con una tasa promedio del diámetro de partícula con un rango entre 0,15 (esferas hexagonales muy empaquetadas) a 0,42 (empaquetamiento cúbico de esferas). Adicionalmente, las investigaciones sobre el empaquetamiento de los agregados muestran claramente que el empaquetamiento de los agregados sigue diferentes modelos cuando el diámetro característico está por encima o por debajo de la tasa de 0,22[11].

Mientras que el 0,22 pueda no ser correcto para toda mezcla asfáltica, el análisis de la granulometría no se ve afectado si los valores están en el rango de 0,18 a 0,28. El factor de 0,22 es la condición promedio de muchas diferentes configuraciones de empaquetamiento.

Conocido el tamiz que diferencia las dos grandes fracciones dentro de la granulometría, el único dato requerido para crear la mezcla bituminosa será el peso específico de los áridos a utilizar. A partir de entonces, el método dispone de unos ratios que combinan todos los tamaños (Tabla 2 y Tabla 3), creando el empaquetamiento preestablecido:

_____ (2)

_____ (3)

_____ (4)

El significado físico de cada uno de los ratios es el siguiente:

- CA_{ratio} (2). Describe el volumen de huecos que establecen los gruesos y que puede ser ocupado por el árido por debajo del tamaño de control primario (PCS).
- Fa_c (3). Indica la forma de empaquetamiento de la fracción granulométrica hasta el segundo tamaño de control (SCS), el cual se sitúa en el tamiz más cercano a 0,22 veces el PCS.
- Fa_f (4). Muestra, al igual que los anteriores, la forma de organización de las fracciones pertenecientes al filler dentro de la mezcla bituminosa (TCS, 0,22 veces el tamaño SCS). Tiene menos importancia en mezclas con tamaños máximo nominales por debajo de 20 mm.

Tabla 2. Rangos recomendados para los ratios granulométricos en mezclas SMA [9].

	NMPS (mm)					
	37,5	25	19	12,5	9,5	4,75
CA Ratio	0,80-0,95	0,70-0,85	0,60-0,75	0,50-0,65	0,40-0,55	0,30-0,45
F_Ac Ratio	0,35-0,50	0,35-0,50	0,35-0,50	0,35-0,50	0,35-0,50	0,35-0,50
F_Af Ratio	0,35-0,50	0,35-0,50	0,35-0,50	0,35-0,50	0,35-0,50	0,35-0,50

Tabla 3. Tamaños de control de tamices para diversos tamaños máximo de árido [9].

	NMPS (mm)					
	37,5	25	19	12,5	9,5	4,75
Tam. medio gruesos	19	12,5	9,5	**	4,75	2,36
PCS	9,5	4,75	4,75	2,36	2,36	1,18
SCS	2,36	1,18	1,18	0,6	0,6	0,3
TCS	0,6	0,3	0,3	0,15	0,15	0,075

3.1.3. MEZCLAS DRENANTES

Las mezclas bituminosas drenantes (PA) son aquellas que por su pequeña proporción de árido fino, tienen una gran cantidad de huecos interconectados, lo cual revierte en una mayor permeabilidad. Se trata de una mezcla especialmente diseñada para mejorar el contacto entre neumático y pavimento, minimizar el aquaplaning, reducir la proyección de agua entre vehículos, mejorar la visibilidad nocturna, y hasta aminorar el ruido del tráfico [12].

Según el *Pliigo General de Prescripciones Técnicas* (PG-3), la aplicación de estas mezclas se dispone en capa de rodadura con espesores entre 4 y 5 cm. En otros países, también se permite el uso de doble capa de mezcla porosa en la rodadura, llevando la escorrentía de drenaje a un punto más bajo dentro del paquete de firmes, además de tener mejor capacidad frente al daño por deformación plástica. Esta doble capa estaría formada por una primera de 2-3 cm, formada por una granulometría más fina (tamaño máximo nominal 8 mm); y consecutivamente otra inferior, de 4-5 cm, de árido más grueso (16 mm)[13]. El mejor acabado superior debido a la granulometría más fina, ofrece un mejor comportamiento frente a ruido, observándose mejor flujo de infiltración y resistencia estructural [14].

A pesar de las bondades presentadas, el uso de este tipo de mezcla no está tan extendido debido a la reducida durabilidad que han mostrado en pruebas a escala real, revelando excesiva sensibilidad a las cargas de tráfico y a los condicionantes climáticos. En general, su durabilidad depende de la resistencia al desprendimiento de partículas (*raveling*), ya que se compone de menor cantidad de mortero bituminoso, capaz de cohesionar todo el esqueleto mineral. No menos importante, es la debilidad que muestra ante un envejecimiento prematuro, lo cual rigidiza toda la mezcla, dando lugar a problemas de fatiga [15].

Gracias a los avances en cuanto a escáneres de alta resolución, existen estudios [16] que indican que existe un mayor debilitamiento de la capa superficial porosa debido al movimiento existente entre partículas y su posterior densificación (Ilustración 3). Llegan incluso, a demostrar que el deterioro de la mezcla drenante es derivado de roturas longitudinales en las capas intermedia e inferior del paquete de firmes, resultando en el comentado desplazamiento de partículas y, también en una transmisión de microfisuras en el árido. Se considera que futuras líneas de investigación podrían seguir evaluando las fracturas en 3 dimensiones (escáneres CT) de las diferentes mezclas, además de establecer la permeabilidad superficial como un método sencillo para conocer el grado de daño que posee el firme después de ciertos años de servicio.

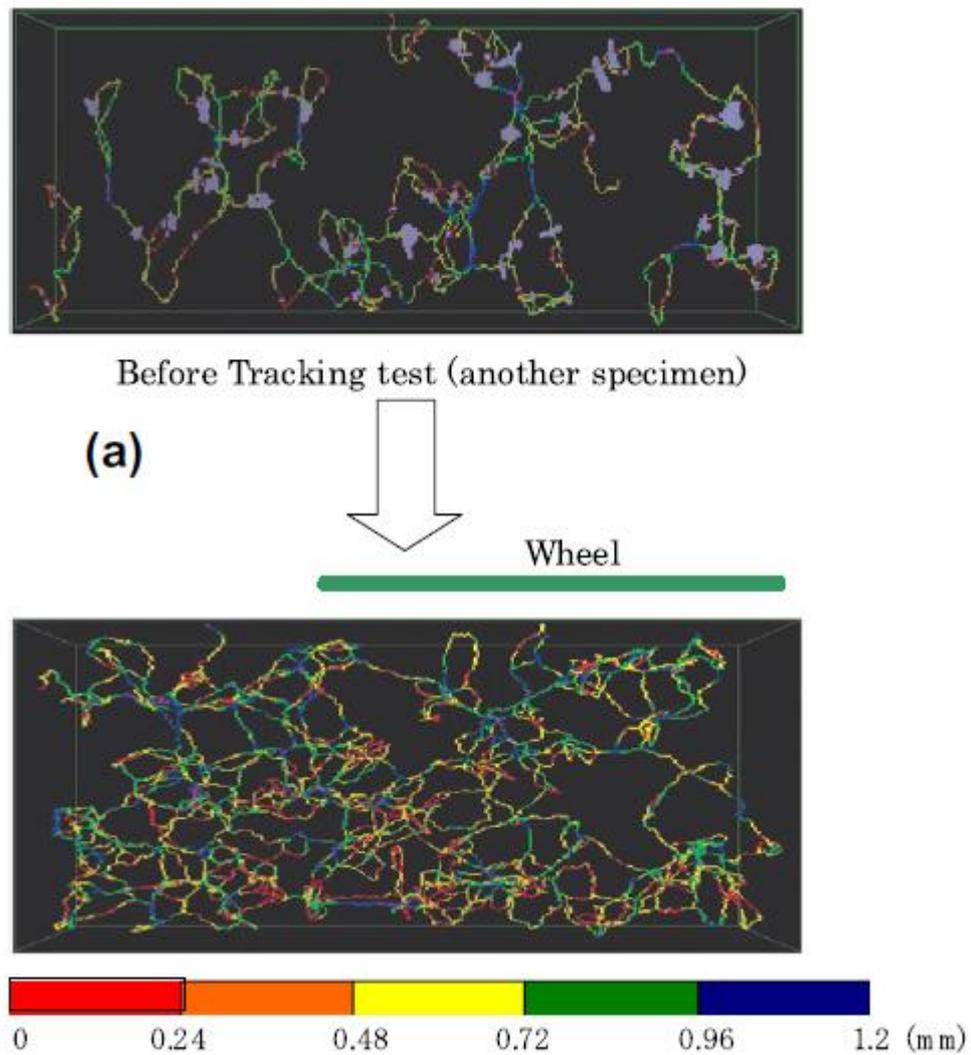


Ilustración 3. Distribución tridimensional de las fracturas antes y después del ensayo de pista para una mezcla porosa [16].

Como suele ocurrir en las mezclas bituminosas, las características que necesitamos son encontradas y si actuas contra las deformaciones plásticas, puedes tener una excesiva rigidez que hará más frágil la capa de pavimentación. En el caso de las PA sucede igual: necesitamos un volumen de huecos lo suficientemente alto como para desalojar el agua del pavimento, pero por ello encontraremos más envejecimiento adquirido (más superficie expuesta a la luz y al agua) y un material con menor cohesión interna. Todo ello sin todavía mencionar un aspecto crucial en el funcionamiento de este tipo de mezclas: la obturación de sus huecos. En este trabajo tendremos en cuenta esta situación, contabilizando el volumen de huecos

interconectados; aunque en principio, nuestra investigación irá buscando un mejor comportamiento estructural, principal debilidad actual de estas mezclas (Tabla 4).

Tabla 4. Factores que influyen en el comportamiento de mezclas PA.

Factores	Efecto dominante
Condiciones climáticas <ul style="list-style-type: none"> - Temperatura - Rayos UV - Humedad 	Envejecimiento – cohesión Degradación – cohesión Pérdida de partículas – adhesión
Aditivos <ul style="list-style-type: none"> - Betún modificado con polímeros - Fibras 	Aumenta la envuelta del ligante Mejora comportamiento por envejecimiento – cohesión Reduce la exudación – mejora la cohesión
Contenido y procedencia del ligante <ul style="list-style-type: none"> - Contenido de betún - Tipo de betún 	Grosor de la envuelta – cohesión – adhesión Ratio de envejecimiento – cohesión
Fíller <ul style="list-style-type: none"> - Tipo de fíller y contenido 	Envejecimiento/escurrimento/resistencia – cohesión (la adición de cal hidratada mejora la adhesividad y procura un mejor comportamiento ante envejecimiento)
Árido <ul style="list-style-type: none"> - Tipo de árido 	Compatibilidad con el ligante – adhesión Composición mineral, superficie → adhesión
Otros factores <ul style="list-style-type: none"> - Mantenimiento invernal - Salinidad - Caída de hidrocarburos sobre el pavimento 	

Áridos

El material mineral que contienen las mezclas porosas ha de ser de una alta calidad como para formar parte de una capa de rodadura, es decir, ha de poseer la angulosidad y rugosidad necesaria para una adecuada adhesividad con el ligante, además de tener buenas prestaciones frente al pulimento por el contacto con el neumático. Estas características no suelen representar un obstáculo para rocas como las ígneas (pórfidos, ofitas); hablando de árido grueso.

En el caso de las partículas de árido fino, su papel es también de gran importancia, ya que con cantidades menores, en comparación con el grueso (alrededor del 15% del total de árido), han de crear un mortero que provea de la suficiente cohesión entre partículas. De ello depende en gran medida el buen funcionamiento de la mezcla y su resistencia al desgaste. Con normalidad, el material utilizado para estos tamaños es de tipo calizo, con notables propiedades en cuanto a adherencia con el betún.

Otros estudios han traspasado la barrera que supone el uso de mineral natural como árido en la mezcla bituminosa, poniendo de manifiesto la posibilidad de aplicar áridos reciclados o sintéticos en las mezclas porosas con buenos resultados. Por un lado, Frigio et al. [17] estudió el efecto que tendría el fresado (mezcla bituminosa recuperada de la propia vía) integrado en la mezcla porosa, obteniendo resultados prometedores con menores pérdidas por desgaste y menor sensibilidad al agua que otras mezclas con áridos naturales de referencia. Esto supone un gran avance ya que demuestra el grado de compromiso que tiene un material envejecido (ligante) respecto a una mezcla abierta, que cuenta con menor capacidad de ligazón entre sus gruesos. Otra posibilidad en cuanto a la utilización de subproductos como material mineral, es la que nos provee la escoria de acería o alto horno. En este sentido, Shen et al. [18] estudiaron la capacidad que tendría la escoria procedente de horno básico de oxígeno para diversas adiciones, encontrando incrementos en las resistencias al pulimento, a las deformaciones plásticas y al desprendimiento de partículas. Esto sucede debido a la composición de este producto, que cuenta con gran afinidad con todo tipo de aceites, y con el betún en particular; además de poseer una rugosidad y angulosidad óptima para la trabazón entre gruesos y el contacto entre ellos.

Investigaciones recientes también se centran en cómo solventar las debilidades de las mezclas porosas respecto a deformaciones plásticas y desgaste, pero teniendo como foco la granulometría de la propia mezcla. De ella se deriva la existencia de un correcto contacto entre gruesos, siendo éste el parámetro físico fundamental que determina el comportamiento de la mezcla. En el caso que dicho contacto fuera defectuoso (excesiva cantidad de árido fino obstruyendo el enclavamiento entre partículas de mayor tamaño) o la densidad de la mezcla fuera demasiado baja, la respuesta del aglomerado ante esfuerzos cortantes sería únicamente la proporcionada por el betún; no siendo éste capaz de suministrar las resistencias necesarias para cualquier vía [19].

Determinar cuantitativamente la existencia del contacto entre áridos gruesos es el objetivo marcado para confirmar un adecuado rendimiento, tanto para deformaciones plásticas como para desgaste, en mezclas porosas. Instituciones como la NCAT [20] (National Center for Asphalt Technology), han propuesto un método que evalúa la existencia de un

óptimo contacto entre partículas, basado en la comparación de volúmenes de huecos en la fracción gruesa de la granulometría (VCA, Voids in Coarse Aggregate): por un parte se mide la cantidad de huecos existentes en la mezcla porosa compactada (VCA_{mix}); y por otro, el volumen de huecos del que disponemos después del varillado de la fracción gruesa de la granulometría (VCA_{DRC}). Con estas dos medidas, el estudio señala que alcanzaremos un contacto adecuado cuando el VCA ratio (VCA_{mix}/VCA_{DRC}) sea igual o menor a 1. Esto significa que la incidencia que pueda tener, tanto el betún como la fracción fina de árido dentro de la mezcla porosa, no compromete el esqueleto mineral proyectado por la fracción gruesa de los áridos. El mismo enfoque también lo tenemos incluido en normativas como la ASTM D 7064-04.

El cálculo de los valores mencionados (VCA_{mix} , VCA_{DRC}) está sujeto a la definición del tamaño de ruptura entre las fracciones gruesa y fina de la granulometría. Con normalidad, se toma el tamiz de 4 mm como el que marca la frontera entre ambas fracciones (Ilustración 4), aunque autores como Watson et al. [21] proponen alternativas basadas en imágenes digitales y elementos finitos, capaces de definir con mayor precisión dicho tamaño. Las investigaciones concluidas hasta la fecha, seleccionan el tamaño de ruptura en aquel punto donde la pendiente de la curva granulometría comienza a disminuir notablemente.

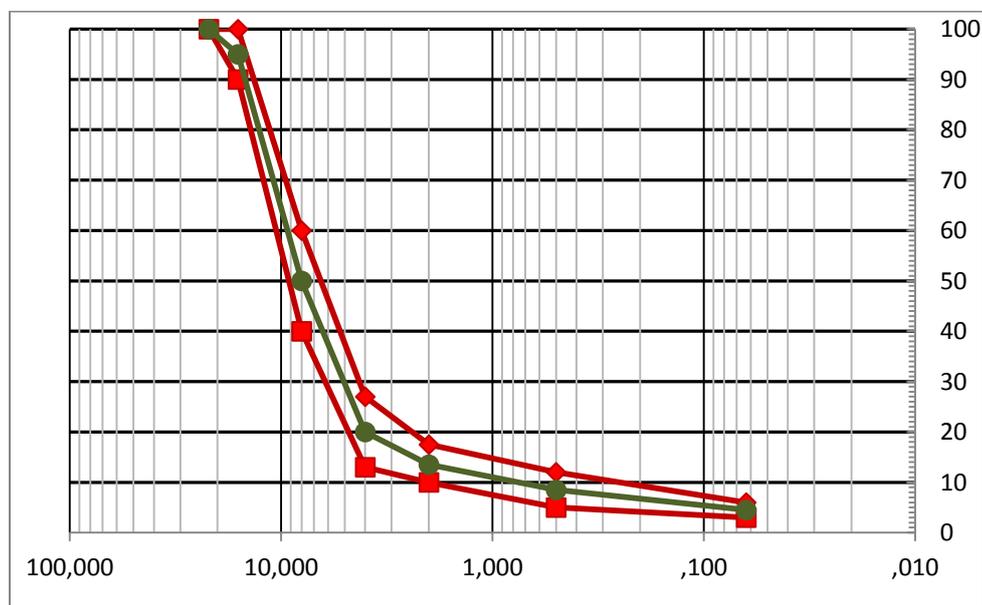


Ilustración 4. Cambio de trayectoria en la granulometría PA 16 a partir del tamiz 4 mm (punto de ruptura).

La localización de este tamaño de tamiz frontera se convierte en fundamental, al igual que lo es la elección del tamaño máximo de árido, ya que condicionan el funcionamiento de la mezcla. De acuerdo con Mohd Hasan et al. [22], se podría establecer un criterio dentro de las mezclas drenantes que conllevara el cumplimiento de los siguientes niveles: disponer de un volumen de huecos por encima del 20%, un coeficiente de permeabilidad no menor de 0,116 cm/s, y también, un nivel de pérdidas en el ensayo Cántabro por debajo del 16%. De sus investigaciones se desprende que estos niveles son cumplidos por mezclas con un tamaño máximo nominal (tamaño que retiene al menos el 10% del peso de árido) de 14 mm y con el punto de ruptura localizado en 5 mm.

Ligantes

La pavimentación de carreteras con mezclas drenantes suele ir acompañada por la utilización de betunes modificados, ya sean debidos a la inclusión de polímeros (vírgenes o reciclados) o de caucho; éste último habitualmente proveniente de neumáticos fuera de uso (NFU). En el caso de la normativa española (PG-3), no se permite el uso de ligantes convencionales hasta vías con categorías de tráfico T2, lo cual los invalida para disponer en autovías o autopistas.

Siguiendo con la normativa, ésta indica que se dará prioridad a la utilización de elementos que modifiquen la reología de los betunes, y que además, provengan de un sistema de reciclado como en el caso del caucho de neumático. En el caso de otros países, se sigue este procedimiento, aunque en las normas holandesas (con gran experiencia en mezclas drenantes) se llega a permitir ligantes convencionales de 70/100 de penetración.

El uso de fibras también proveerá de variación en la reología del ligante, pudiendo ayudar en el aumento de la vida útil de estas mezclas si se consigue incorporar una mayor cantidad de betún o si son capaces de recibir parte de las tensiones sufridas por el esqueleto mineral. En el caso de la incorporación de mayor cantidad de betún, el aumento de vida útil se debe a una capa más gruesa de envuelta sobre el árido, evitando una pérdida de partículas prematura. Si hablamos de la transferencia de esfuerzos a las fibras, lo que sucede es que éstas han sido capaces de crear una red tridimensional que rigidiza el ligante [23,24].

Por otra parte, el empleo de ligantes de alta viscosidad es otra de las alternativas que han sido estudiadas para reducir las debilidades de las mezclas porosas. Este tipo de betunes contiene porcentajes de caucho por encima del 15%, dando valores de viscosidad a 60 °C

superiores a 340.000 poises; por los 3.500 que se pueden encontrar en ligantes convencionales o los 14.500 en el caso de los modificados.

Las debilidades comentadas de las mezclas drenantes y, por las que surgen tantas líneas de investigación con distintos ligantes, han de concretar si su deterioro se debe a la pérdida de adherencia entre el ligante y el árido o, por el contrario, derivada de una pobre cohesión entre el mástico y el árido grueso. Habitualmente, se ha considerado que la mayor exposición que tiene este tipo de mezclas, en comparación con las densas, establece un aumento de la oxidación del ligante, rigidizándolo y resultando en el desgaste de la capa [23]. Otros aspectos que debieran tomarse en cuenta serían: niveles bajos de contenido de ligante, polvo mineral sobre la superficie de los áridos, granulometrías usadas, temperaturas de compactación o carga de tráfico [25].

La evaluación de los distintos betunes se basará en sus resultados a los ensayos característicos para mezclas porosas: escurrimiento, permeabilidad, resistencia al desgaste, sensibilidad al agua y, en menor medida, ensayo de pista. Las investigaciones resultantes hasta la fecha [23,25,26], promueven la utilización de estabilizadores incluidos en el ligante o sobre la mezcla, para mejorar sus prestaciones: fibras, caucho o polímeros. También indican que la mezcla entre ellos puede ser igualmente satisfactoria, sin reducir en exceso el contenido de huecos, que haría una reducción importante de su capacidad drenante.

En los estudios de Chen et al. [27], se indica que el uso de fibras en mezclas con ligantes convencionales es determinante para impedir un excesivo escurrimiento, con niveles mayores a la utilización de ligante modificado. A su vez, establece que un betún de alta viscosidad es capaz de mejorar el rendimiento de la mezcla drenante sin limitar su porosidad y resultando en mejores niveles de resistencia al desgaste y tracción indirecta que aquellas con la inclusión de fibras o modificadas con polímeros (SBS) (Ilustración 5 e Ilustración 6).

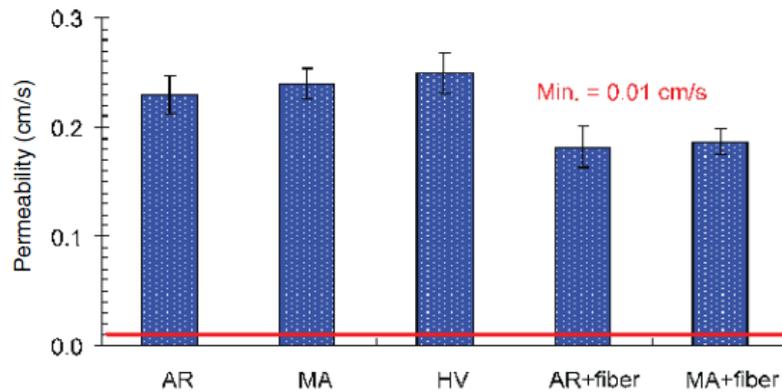


Ilustración 5. Permeabilidad en mezclas porosas con distintos tipos de ligante: AR, convencional; MA, modificado; HV, alta viscosidad [27].

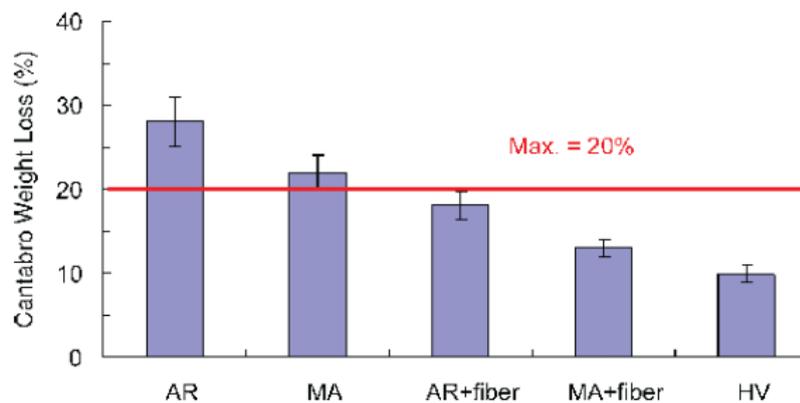


Ilustración 6. Porcentajes de pérdida por desgaste en ensayo Cántabro [27].

Estos resultados pudieron ser corroborados en tramos de prueba a escala real, donde no sólo certificaron un buen rendimiento, sino que también establecieron buenos niveles de resistencia al deslizamiento una vez que la envuelta del árido se hubo desprendido (6 meses, aproximadamente).

Ensayos de caracterización

El diseño y evaluación de mezclas porosas ha de provenir de sus principales parámetros constituyentes: la densidad y el volumen de huecos presente en la mezcla. Esto debería suponer un estudio enfocado en la estructura interna del material, con especial atención a la distribución de los huecos, su tamaño y conectividad. Sin embargo, las líneas de

investigación previas encaran la caracterización de la mezcla desde un punto de vista más funcional, con un enfoque puramente fenomenológico.

Un ensayo que cumple con este enfoque es el llamado Cántabro (UNE-EN 12697-17), que trata de relacionar el nivel de pérdidas de partículas que sufre una probeta asfáltica con el habitual desgaste sufrido por la mezclas porosas en carretera [28]. Las probetas son evaluadas en la máquina de Los Ángeles a 300 vueltas y con una velocidad entre 30-33 rpm. Este ensayo surge debido a la variabilidad de resultados que provenían de otros como el cohesiómetro Hveem (resultados contradictorios), el de tensión indirecta o el de pista (baja sensibilidad al contenido de ligante)[29], y es utilizado para indicar el contenido mínimo de ligante que se ha de disponer en la mezcla.

Otro aspecto clave de la adecuación del Cántabro para conocer el servicio de las mezclas porosas, es que pueden establecerse estudios de envejecimiento del ligante teniendo como medio de comparación. Es el caso del Cántabro húmedo (NLT 352/00), en el cual las probetas se mantienen sumergidas en un baño de agua a 60 °C durante 24 horas, y otras 24 horas, en una cámara a 25 °C; temperatura a la cual se procede con el desgaste del material. No sólo establece la resistencia al envejecimiento, sino que también demuestra la posible susceptibilidad de la mezcla porosa frente al agua. Otras formas de envejecimiento utilizadas hasta la fecha son las que mantienen las probetas en estufa a 60 °C durante 7 días[25].

La misma línea de evaluación es la que toman el resto de ensayos que caracterizan las mezclas drenantes: contenido de huecos y porosidad, permeabilidad, escurrimiento, sensibilidad al agua y resistencia a las deformaciones plásticas.

El contenido de huecos es una de las propiedades volumétricas más determinante dentro de estas mezclas: por un lado, un alto contenido de huecos crea una red accesible para el agua, procurando un drenaje óptimo; por el otro, tal nivel de exposición aporta debilidad a la estructura mineral, aumentando su nivel de rigidez; proceso que conlleva una pérdida de partículas mayor. Habitualmente este contenido debe alcanzar, al menos, el 20%; aunque excederse demasiado de ese nivel podría traer problemas derivados de la falta de finos.

Con normalidad, el contenido de huecos es medido de forma geométrica: se mide la altura de la probeta en 4 ocasiones (alturas diametralmente opuestas, 2 a 2), además de otras 4 medidas de su diámetro. Con estas dimensiones, junto con la masa de la probeta, se conoce el nivel de huecos en mezcla. Sin embargo, la porosidad efectiva de nuestra mezcla ha de ser

aquella que cuente únicamente con los huecos a los que puede acceder el agua, por lo que se han desarrollado diversos métodos que intentan discernir esa cantidad real de huecos en la mezcla. Lyons y Putman[25] sumergen las probetas a 25 °C durante 30 minutos, para después invertirlas 180 °C y, tapando la base superior en 5 ocasiones, liberar los posibles huecos aún llenos de aire. Una vez acabado el proceso, se pesa la probeta sumergida en el agua y la porosidad es calculada con la siguiente fórmula (5):

$$\text{-----} \tag{5}$$

—

La permeabilidad es una propiedad íntimamente relacionada con la porosidad, aunque tiene unas características distintas. Sus resultados provienen de la utilización de un permeámetro de carga variable y el flujo del agua no es del todo estacionario, sino que puede conllevar cierta turbulencia derivada del propio flujo y su velocidad. El permeámetro de carga variable (Ilustración 7) sirve como modelo del drenaje que ocurre a escala real, dando cuenta de la capacidad del pavimento para absorber la pluviosidad del lugar donde se disponga. El orden de magnitud que se maneja como mínimo para un drenaje eficaz es de 0,01 cm/s, aunque las mezclas porosas lo superan ampliamente, con valores por encima de 0,15 cm/s (Ilustración 5).

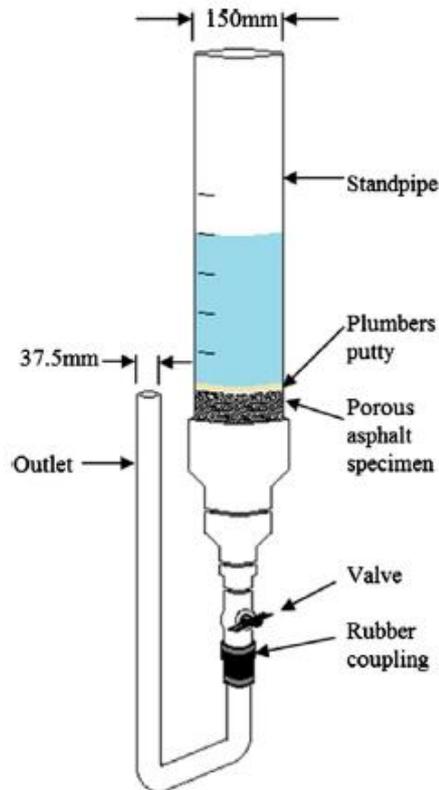


Ilustración 7. Esquema de la configuración del ensayo de permeabilidad [25].

Una vez establecidas las propiedades volumétricas de la mezcla, las siguientes propiedades a evaluar serán de un carácter funcional y estructural. Por un lado, tanto en mezclas drenantes como en las SMA es de suma importancia el que el ligante no se derrame y deje sin aglomerante al esqueleto mineral. El ensayo de escurrimiento (UNE-EN 12697-18) refleja esa situación que podría darse en el transporte y compactación de la mezcla, limitando el efecto de esa mayor cantidad de betún añadido. De acuerdo con Watson et al. [30], las mezclas porosas suelen mostrar una capa de envuelta de 30 μm de espesor, mientras que la capa correspondiente a mezclas densas se queda en apenas 8 μm . También se podría considerar que, más allá de la capa de envuelta (variable según tipo de árido y cantidad de finos en mezcla), existe una distribución heterogénea del ligante dentro de la estructura mineral, reflejando distintas zonas: una con un nivel de betún mayor y menor permeabilidad; y otra, con menor cantidad de ligante y más sensible ante el desgaste.

Por otro lado, los ensayos que junto al Cántabro indican la resistencia de la mezcla porosa frente a distintas acciones, han de considerar los daños críticos habituales en ellas. El ensayo de sensibilidad al agua (UNE-EN 12697-12) establece las diferencias existentes entre

probetas secas y húmedas, permitiendo una rebaja en el nivel de resistencia a tracción indirecta. Es menos característico que cuando se utiliza en mezclas densas o semidensas, ya que el nivel de saturación en mezclas drenantes no es significativo, aunque es capaz de reflejar los esfuerzos de tracción existentes en la carretera.

Las deformaciones plásticas en la mezcla bituminosa suelen ser estudiadas mediante el ensayo de pista (UNE-EN 12697-22), aunque su elevada variabilidad en el caso de las mezclas porosas, hace que no siempre sea reflejo del servicio que puede proveer. Por esta razón, existen iniciativas por parte de las distintas administraciones de carreteras en el mundo, que intentan una medición de deformaciones plásticas (ahuellamiento) con otros ensayos, capaces incluso de aunar diversos deterioros críticos. Esta situación la podría representar el ensayo de compresión triaxial cíclica, que caracteriza la mezcla por la deformación permanente acumulada por la acción de un esfuerzo axial y el confinamiento lateral, a una temperatura alta (>40 °C).

No es un ensayo novedoso, ya que desde la década de los 80 se viene estudiando la capacidad resistente de las mezclas bituminosas ante esfuerzos repetidos en el tiempo (fluencia); sin embargo, no existe gran cantidad de experiencias ni es un ensayo extendido para caracterizar los pavimentos de carretera.

La Administración de Carreteras Americana (FHWA) desarrolla, mediante un programa de investigación (NCHRP), un ensayo de estas características llamado *Flow Number* [31] que cuenta con 3 zonas de deformación permanente (Ilustración 8). Estos estados de deformación describen lo siguiente:

- Primario. Elevado nivel de deformación, aunque con una velocidad de deformación decreciente derivada de cambios volumétricos.
- Secundario. Velocidad de deformación estacionario con pequeña acumulación de deformación permanente. En este estado, las deformaciones por cortante se ven muy incrementadas.
- Terciario. Colapso del material con deformaciones plásticas a cortante, pero sin cambios volumétricos.

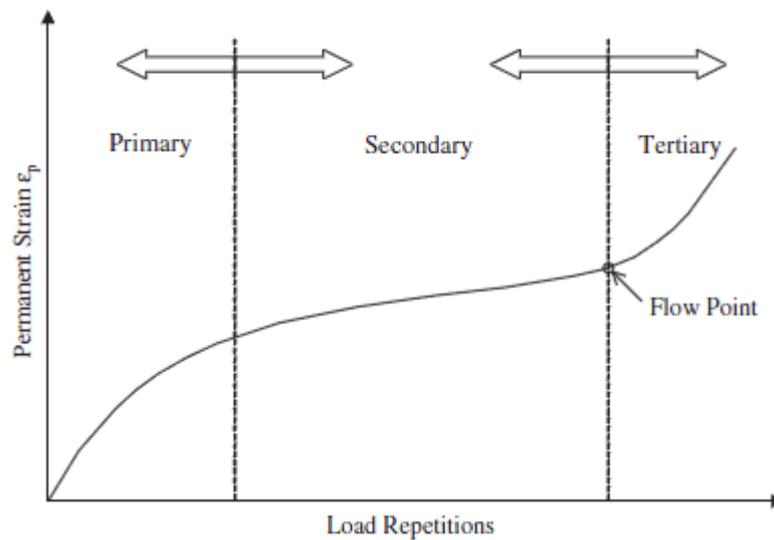


Ilustración 8. Típico gráfico de deformación permanente en mezcla bituminosa por cargas cíclicas [31].

Dentro del desarrollo del proceso no se fijaron cargas ni frecuencias estándar, por lo que sólo es posible seguir el procedimiento marcado por algunos autores y así, conseguir llegar al punto de colapso de la probeta. Algunas experiencias indican que con cuanto más se acerque la frecuencia a 1 Hz, más comparable es el ensayo con la situación de tráfico lento (camiones). En cuanto a las cargas, la tensión desviadora axial puede situarse entre los 150 y los 900 kPa.

Por otra parte, debido a la falta de concreción en cuanto a las condiciones a presentar para comparar los resultados en distintas mezclas y laboratorios, se tienen en cuenta los parámetros utilizados en el CEDEX (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas)[32], que tienen como objetivo la comparación con la deformación permanente que ocurre en el ensayo de pista. En su caso, no han llegado al punto de colapso por cortante a pesar de aplicar 20000 ciclos y temperaturas de 60 °C; ambas condiciones mucho mayores a las vistas en los ensayos americanos.

Numerosas investigaciones han intentado el estudio de las deformaciones plásticas relacionándolo con sus características volumétricas y la manera en la que se desarrolla su compactación. Este desarrollo se debe, en gran medida, a la máquina de compactación giratoria, capaz de monitorizar todo el proceso de compactación, mostrando datos de huecos y cortante según los ciclos dados.

Para caracterizar el comportamiento de las mezclas bituminosas durante el proceso de

compactación se pueden seguir dos líneas: la primera consiste en estudiar las características de la curva de compactación y relacionarlas con la compactabilidad y la estabilidad de las mezclas. Una segunda línea de investigación, se basa en el desarrollo de herramientas experimentales y métodos de análisis que permitan medir o estimar el esfuerzo cortante y relacionarlo con la resistencia que ofrecen las mezclas a la densificación y a la post-compactación asociada a las cargas de tráfico.

Uno de los estudios que muestran una teoría respecto a las energías de compactación y post-compactación es el de Bahía et al.[33], según su procedimiento el proceso de compactación se puede dividir en dos etapas, representadas en la Ilustración 9. La primera es una aproximación de la facilidad de compactación durante la puesta en obra de las mezclas y se mide como la energía requerida para compactar las mezclas desde el giro 8, seleccionado porque simula el esfuerzo de pre-compactación aplicado por una extendedora convencional durante el extendido de la mezcla, y el 92 % de la densidad teórica máxima (% Gmm), que se corresponde con la densidad de un hormigón asfáltico en caliente (HMA) con la que el pavimento se abre al tráfico. El índice con el que se efectúa esta medida se denomina Compaction Energy Index (CEI). En esta etapa se produce una tasa elevada de reducción de huecos y está relacionada con la densificación durante la puesta en obra usando rodillos a altas temperaturas. Mezclas con bajos valores de CEI facilitan la puesta en obra sin embargo, un valor demasiado bajo de este índice puede ser indicativo de una mezcla poco resistente a las deformaciones plásticas, por lo que debe ser evitado.

La segunda etapa, representada por el índice Traffic Densification Index (TDI), refleja la resistencia de las mezclas a la post-compactación debida a las cargas de tráfico durante su vida de servicio. En este caso, el índice se calcula como el área bajo la curva desde el 92 % de la Gmm hasta alcanzar el 98 % de la Gmm considerado como una densidad crítica. En esta parte existe una reducción muy pequeña del porcentaje de huecos y la estructura de áridos experimenta altos esfuerzos cortantes. Se buscan mezclas con altos valores de TDI ya que se espera que tengan una mayor resistencia a la post-compactación debida al tráfico.

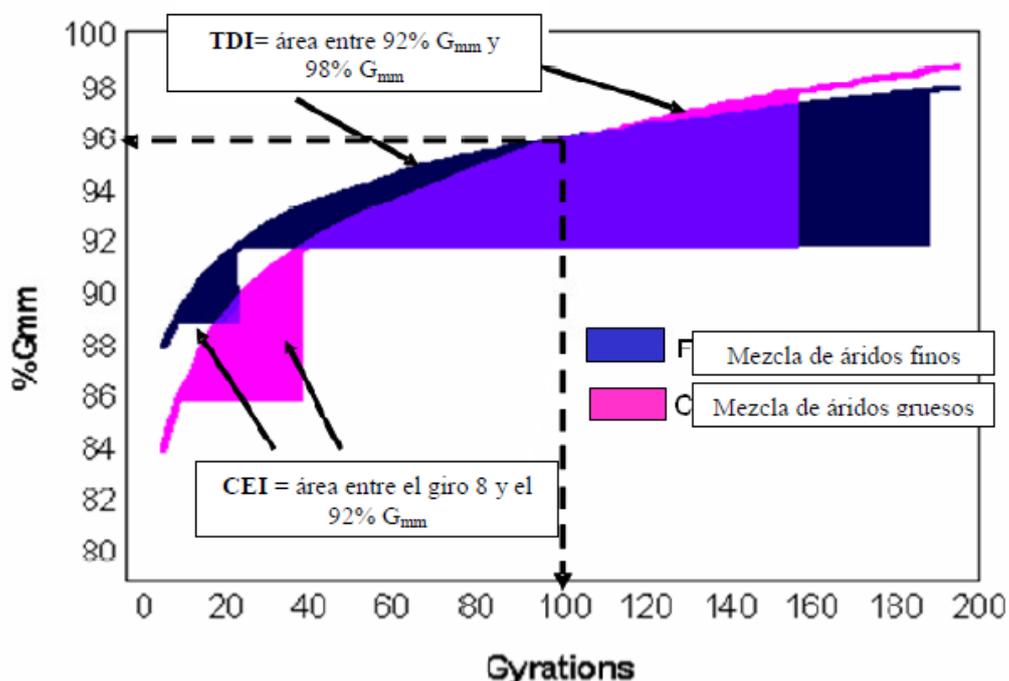


Ilustración 9. Índices CEI y TDI en mezclas de árido grueso y fino [33].

En este sentido, otros estudios como el de Del Río-Prat [34], desarrollado en el grupo GITECO, consiguen indicar valores de compactación y estabilidad válidos para otros tipos de mezclas, más allá de las AC con las que se desarrollaban los índices anteriores. Por ejemplo, no tienen sentido para una mezcla de tipo discontinuo BBTM B o drenante PA, en las que la densidad alcanzada, por mucho que se intente compactar, nunca llegará a ser del 98% Gmm.

Un criterio más lógico consiste en fijar unos límites variables en función del grado de compactación exigible a cada tipo de mezcla en concreto. Siguiendo en esta línea, se han definido dos nuevos índices que permiten comparar la compactabilidad de mezclas con porcentajes de huecos muy diferentes. Las modificaciones introducidas en el criterio de Bahía et al. (1998) han sido en primer lugar, el empleo de la curva %huecos-ciclos en vez de la curva %Gmm-ciclos para facilitar el tratamiento de los datos, aunque ambas curvas son equivalentes. La otra modificación de mayor relevancia como ya se ha indicado, es el empleo de unos límites variables en función de la granulometría seleccionada basados en el porcentaje de huecos correspondientes al ensayo Marshall.

El primer índice, relacionado con la medida de la compactabilidad, se ha denominado Mix Stability Index (MSI) y se determina calculando el área sobre la curva de compactación desde el giro 8 hasta los giros necesarios para alcanzar un porcentaje de huecos

correspondientes al 98% de la densidad Marshall ($\%V_{98\%p\text{Marshall}}$). El segundo índice, Mix Resistance Index (MRI), representa la capacidad de la mezcla bituminosa de resistir la densificación bajo las cargas de tráfico durante su vida de servicio. Se define como el área sobre la curva desde el giro en el cual se alcanza un porcentaje de huecos correspondiente al 98% de la densidad Marshall hasta el giro en el que se consigue un grado de compactación correspondiente a los huecos Marshall menos un 2,5% ($\%V_{\text{Marshall}} - 2,5\%$). En la Ilustración 10 se lleva a cabo una representación gráfica de ambos índices para una mejor comprensión de los mismos.

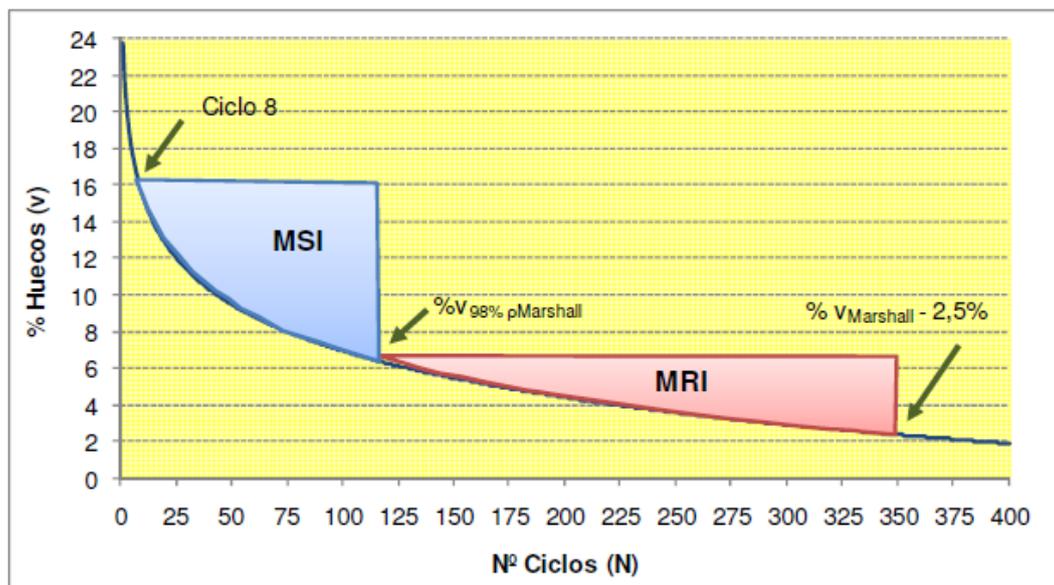


Ilustración 10. Definición de los índices MSI y MRI para una mezcla con granulometría AC 22 y ligante B 60/70 [34].

La finalidad de estos índices es la de representar la energía necesaria para compactar y, posteriormente, deformar la mezcla bituminosa. Esa extrapolación se hace en base a los valores que la máquina nos provee: esfuerzo cortante y altura en cada ciclo de compactación. Para cuantificar el consumo energético se definen dos nuevos índices denominados: Energy Mix Stability Index (E_{MSI}) y Energy Mix Resistance Index (E_{MRI}), que están directamente relacionados con la energía aplicada a la mezcla durante los procesos de compactación y densificación. La fórmula que siguen para conocer el gasto energético es la siguiente (8):

$$(8)$$

donde

- S_i es el esfuerzo cortante medido en cada ciclo (kN/m^2)
- h_i es la altura de la probeta en cada ciclo (m)
- α es el ángulo de inclinación de la probeta cilíndrica
- A es el área de la probeta (m^2)
- M es la masa de la probeta (kg)

Para conseguir una medida controlada y poder establecer correlaciones con el ensayo de pista, se extrapolan los resultados obtenidos de energía para el ciclo 250, desde es el que se crea una regresión lineal que cuantifique la energía. Esta transformación de los datos se debe a la estabilidad que tienen el cortante y la altura a partir del ciclo 75 para todos los casos [34].

Tabla 5. Valores mínimos de los índices de post-compactación para cumplir las especificaciones de pista, referentes a capa de rodadura [34].

Mezcla	$E_{MRI_{\text{mínimo}}}$ (kJ/kg)	$MRI_{\text{mínimo}}$
AC 22	4	790
BBTM 11A	2,5	540
BBTM 11B	5	1030
SMA 10	3,5	740

3.2. TIPOLOGÍA DE FIBRAS EN MEZCLAS BITUMINOSAS

3.2.1. INTRODUCCIÓN

El uso de fibras dentro de la mezcla bituminosa busca mejorar las prestaciones que hasta ahora encontramos en ellas y, que aún se ven severamente afectadas por las cargas de tráfico y las condiciones climáticas. Además en el caso de mezclas drenantes, las dificultades van a más ya que la envuelta del ligante sobre el árido se muestra más complicada, dando lugar a los habituales problemas de desgaste y pérdida de partículas. Estudios previos han puesto el foco sobre ciertas fibras que proveen a la mezcla de propiedades que podrían aumentar su vida útil; éstas son la celulosa, el poliéster, el polipropileno, la lana mineral o las fibras acrílicas.

Más allá, al igual que en la caso de las mezclas, se ha probado a incluir estos aditivos dentro del propio ligante a modo de modificante. Las variaciones que se muestran son que las fibras, y de mayor manera en el caso de las sintéticas, crean una red resistente dentro del propio ligante produciendo un mástico (filler + betún) de mejores prestaciones: aumenta el módulo dinámico y la resistencia a deformaciones plásticas, mejora la sensibilidad al agua, además de limitar problemas de fatiga por la red antes mencionada [3,35]. Las fibras de carácter natural como son las de celulosa o lignina producen otro efecto más práctico para mezclas PA o SMA; esa característica es la de absorber cierta cantidad de ligante, creando menos problemas de segregación para betunes modificados o del propio árido dentro de la planta, y también, en el momento de la compactación.

3.2.2. CELULOSA

La inclusión de fibras de celulosa en las mezclas bituminosas es una técnica muy utilizada y extendida en aquellos países europeos con amplia experiencia en mezclas densas con altos contenidos de betún como es el caso de Alemania e Inglaterra. Prácticamente ocupa el 90% del mercado alemán de aditivos, y en estos momentos, tiene más cabida dentro de las experiencias españolas después de formar parte de la orden circular 5/2001 (sobre riegos auxiliares, mezclas bituminosas y pavimentos de hormigón), donde comienza a admitir a las fibras como modificadoras de la reología del betún.

La aplicación de fibras de celulosa granulada en pavimentos bituminosos se basa en la gran capacidad para estabilizar altas dotaciones de betún que presenta el polímero natural de

celulosa. Se pueden fabricar distintos tipos de celulosa y, se pueden clasificar por su proceso de producción y por sus características finales como longitud y grosor medio. No obstante fabricar fibras de celulosa de elevada homogeneidad no es tarea fácil debido a su difícil manipulación en las plantas de producción (textura fibrosa) y a su comportamiento químico, funde por encima del punto de descomposición.



Ilustración 11. Fibra de celulosa sin granular y granulada con betún.

A pesar de representar una opción viable para su adición en mezclas bituminosas, surgieron problemas en cuanto a la dosificación en planta, ralentizando el proceso productivo. Así se analizaron distintas prácticas para integrar estas fibras sin perjuicio para la mezcla ni para su fabricación, dando lugar a unos gránulos de fibra de celulosa con betún (Ilustración 11). Esta pequeña capa de betún proporciona una protección de la humedad del ambiente, además de controlar la dispersión y homogeneización dentro de la mezcla.

Se trata de un producto con clara adecuación al proceso productivo dentro de una planta asfáltica, ya que el propio fabricante (JRS, GmbH) adjunta el método a seguir dentro de laboratorio para crear el mismo efecto que tiene en la realidad. Esto se debe a que los gránulos se dispersan con facilidad en mezcladoras de gran potencia, capaces de deshilar el conjunto; no así en el caso de las mezcladoras que se utilizan en laboratorio, donde el movimiento provisto no llega a desligar la celulosa del betún.

La mayoría de experiencias que toman la celulosa como estabilizador de mezcla

bituminosa, la utilizan dentro de mezclas SMA. Se debe al buen rendimiento que tiene este tipo de fibras contra el escurrimiento de toda la masa de mástico, sin que ello debilite la estructura mineral. Con el paso de los años, también se han establecido una serie de buenas prácticas para su utilización dentro de mezclas de tipo drenante; y es que al tomar la tendencia marcada por las SMA, donde el contenido de ligante era el elemento clave para aumentar su vida útil, las mezclas porosas han de aumentar la cantidad de betún para limitar las debilidades estructurales que habitualmente acarreaban.

En estudios recientes [36,37] se analizan los comportamientos que trae consigo la inclusión de estas fibras, y comparando el comportamiento que tienen respecto a otras adiciones como pueden ser las de neumático fuera de uso o los polímeros, éstas últimas referidas a una modificación del ligante más que de la mezcla global.

De acuerdo con Hassan et al. [36], contenidos de 0,4% sobre mezcla de fibras de celulosa reducen de manera drástica el escurrimiento del betún, mejorando el comportamiento de ligantes modificados en este aspecto. En cuanto a las resistencias que provee esa misma dosificación, se indica que aquellas mezclas que conjugan el betún modificado más la celulosa obtienen unos resultados más sólidos que las que utilizan cada uno de esos modificadores por separado. Aun así, la inclusión de fibras sigue mostrando unas resistencias mayores que el ligante con polímeros SBS (estireno-butadieno-estireno).

Otros estudios como el de Chen et al. [37], comparan las propiedades que se incluyen con la adición de fibras, además de incorporar cal hidratada, capaz de mejorar la adhesividad entre el mástico y la fracción gruesa. A su vez, contrastan la influencia de estos estabilizadores de mezclas según el tipo de betún, usando tres tipos distintos: un ligante convencional 60/70, uno modificado con polímeros SBS, además de uno de alta viscosidad.

Las conclusiones que extraen de sus ensayos son que existe una disminución en la capacidad permeable de la mezcla cuando son utilizadas tanto la fibra como la cal hidratada, no tan aparente en la medida de los huecos. Esto podría deberse al tamaño de los mismos, ya que los aditivos evitan que se hagan grandes oquedades dentro de la mezcla, creando una red de huecos con menor tamaño. En la Ilustración 12 puede verse el volumen de huecos para dos tipos de compactación (Marshall y rodillo) en comparación con el coeficiente de permeabilidad vertical:

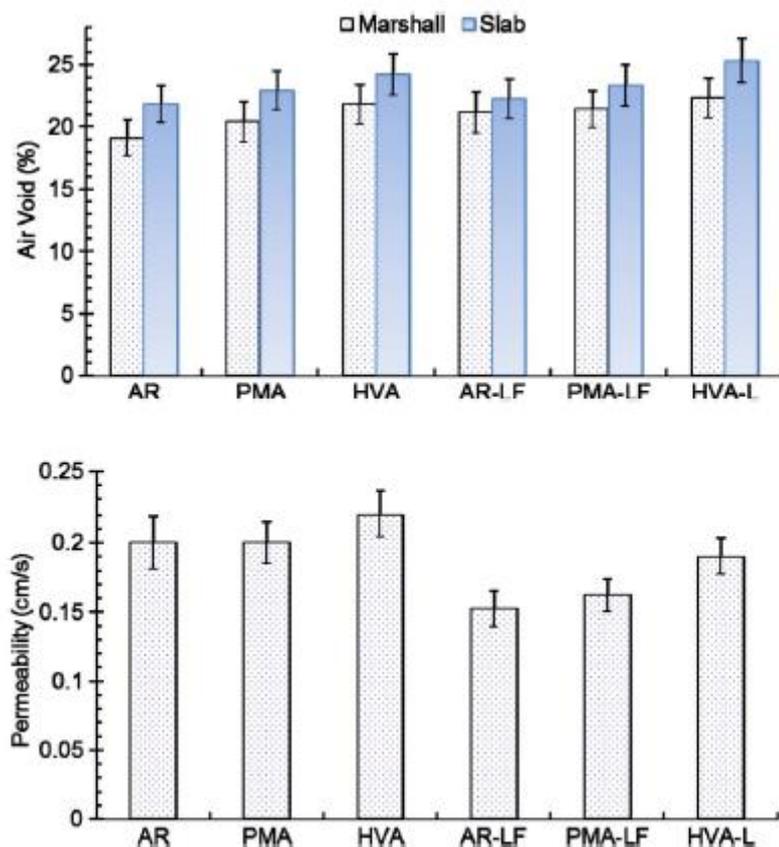


Ilustración 12. Contenido de huecos y permeabilidad en mezclas porosas. Tipos de mezclas: AR, convencional; PMA, modificado; HVA, alta viscosidad. Tipos de estabilizadores: F, fibra de celulosa; L, cal hidratada [37].

En cuanto a la capacidad resistente que proveen estas adiciones, constatan que se logran grandes mejoras en el comportamiento de la mezcla, y sin resentirse con el contacto con la humedad. Respecto al ensayo a tracción indirecta, las diferencias entre seco y húmedo no bajan por debajo del 90%, a la vez que aumentan la resistencia de los ligantes originales. De igual manera, muestran una notable mejora en los ensayos de desgaste, reduciendo por debajo del 30% las pérdidas en las probetas envejecidas en estufa.

De acuerdo con Lyons y Putman [25], descartan esa mejoría cuando la fibra de celulosa es utilizada en solitario, sin el servicio de un ligante modificado. El proceso de envejecimiento es el mismo, por lo que se supone que la variabilidad entre referencias se debe al tipo de árido y granulometría utilizada.

3.2.3. POLIÉSTER

El poliéster es un tipo de polímero que contiene en su cadena principal el grupo funcional éster. Pueden ser de tipo natural o sintético, aunque generalmente los usos principales se refieren al sintético, formando el conocido PET (tereftalato de polietileno). En su proceso de fabricación pasa de un estado líquido perteneciente a las fracciones pesadas del petróleo, a un estado sólido después de su extrusión, hilado y tratamiento superficial [38].

Este producto, a su vez, puede tener distintos comportamientos plásticos: termoestable o termoplástico. Respecto al uso de fibras de este material dentro de mezcla bituminosa, es recomendable un carácter termoplástico; ya que sin llegar a su punto de fusión (250 °C), esa capacidad de deformación y flexibilidad permite una mejor conjunción entre árido y fibra. Este comportamiento no permite una modificación del ligante como en el caso de otros plásticos; sin embargo, permite la creación de redes tridimensionales que sostienen el esqueleto mineral de las mezclas abiertas.

Estudios previos han comparado el comportamiento de las fibras de poliéster con las de otros productos como la lignina o la celulosa [35] (Ilustración 13), integradas en mezclas bituminosas densas. Su objetivo era el de fijar dosificaciones para los distintos materiales, de tal manera que mejoraran el rendimiento de la mezcla y sus propiedades volumétricas. Estos aspectos mostraron una mejora, ya que las estabilidades Marshall y el volumen de huecos aumentaban en proporción a una mayor adición de fibras, aunque sufrían un descenso a partir de un contenido máximo (0,35% sobre mezcla). La inclusión de mayor cantidad de fibras, también traía consigo un mayor contenido de ligante que envolviera de mejor manera la mezcla.

Contrastada la mejora de prestaciones de las diferentes mezclas, la comparación entre fibras establece que las de poliéster (sintéticas), poseen mejores características técnicas frente a deformaciones plásticas y a la fatiga, derivado de un desarrollo interno en la mezcla llamado bridging cracking effect. Este término se refiere al momento en que comienza la rotura del pavimento, siendo las fibras las que contienen ese daño de manera parecida al armado en el hormigón. Respecto a aquellas de celulosa o lignina, no consigue captar tanto contenido de betún como éstas, siendo menos adecuada para mezclas drenantes o SMA.



Ilustración 13. Fibras de poliéster, celulosa y lignina [35].

En el mismo sentido que el estudio anterior, otras investigaciones[38,39]intentan concretar una metodología de fabricación y unas especificaciones reológicas de la mezcla. En el primer caso, Zhao establece un contenido máximo de 0,25% de fibra de poliéster sobre mezcla usando ligante modificado. Más allá de un mejor comportamiento de estabilidad, la mezcla reforzada con fibra muestra mayor dureza y resistencia a fatiga que en el caso de las mezclas sin aditivos. Además, gracias a ensayos a escala real, pudo demostrar que esos índices persistían, incluso ante situaciones de gran carga de tráfico y bajas temperaturas.

En segundo lugar, Wu indaga las variaciones que consigue la adición de fibras de poliéster respecto a la viscosidad y la reología del betún. También dedujo lo que podría ser un método adecuado para la integración de las mismas dentro de una mezcla bituminosa, estableciendo un tiempo de mezclado entre fibras y árido grueso de 30 segundos, previo a la inclusión del betún.

Las características reológicas del betún se basan en el módulo complejo a cortante, G^* , el cual es calculado como la máxima carga que es capaz de resistir con la máxima deformación posible. Es complejo debido a que la vez que se miden los esfuerzos cortantes, lleva consigo la medida de un ángulo de fase que diferencia los esfuerzos que directamente deforman el material (régimen elástico, $\cos \delta$), de aquellos que deforman al material de manera diferida (régimen viscoso, $\sin \delta$). Los valores que se pudieron observar, después de la adición de las fibras de poliéster, indicaban un descenso del valor del módulo complejo según iba en aumento el porcentaje de fibras incluidas y las frecuencias de carga. Sin embargo, encontraron un cambio de fase limitado, lo que significa que la inclusión del poliéster incrementa la flexibilidad del mástico, resultando en un mejor comportamiento tanto a fatiga como a fractura de las mezclas bituminosas. La Ilustración 14 representa una atenuación en la pérdida de módulo complejo, lo que supone que las fibras dispersadas por la mezcla sostienen parte de

la carga recibida, limitando el inicio de las fracturas y su propagación.

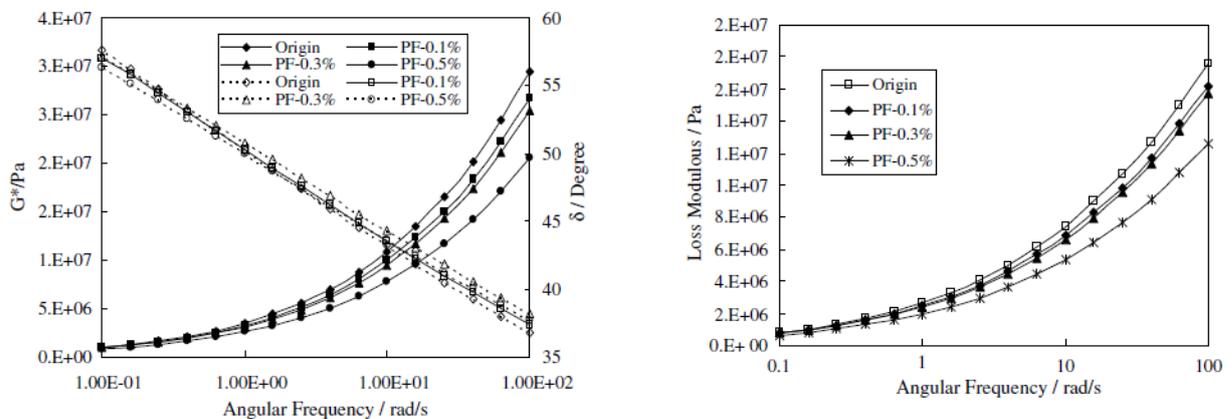


Ilustración 14. Módulo complejo y ángulo de fase respecto frecuencias (izda.) y pérdida de módulo (dcha.) para betunes originales y modificados con diferentes dosificaciones de poliéster [38].

Estas interacciones entre fibras y betún han seguido siendo investigadas, ya que gran parte de las resistencias que se evidencian de los diferentes estudios, radican en el comportamiento interfaz entre fibra-betún y fibra-fibra. Para ello, se convierte en necesaria la utilización de microscopios electrónicos que muestren las características superficiales de las fibras a añadir [4]. En el caso de las fibras orgánicas (celulosa), se trata de pequeñas tiras con mínima sección transversal, pero que cuentan con filamentos desgastados o sin continuidad, aumentando su superficie específica muy por encima de fibras sintéticas o minerales. Los valores de superficie específica que se manejan para las fibras de celulosa se sitúan sobre 1,5 m²/g, mientras que en el caso de otros aditivos no superan los 0,1 m²/g.

Para cuantificar la importancia de la superficie específica y el tipo de fibra, se llevan a cabo diferentes ensayos: viscosidad, punto de reblandecimiento y penetración a 25 °C, módulo complejo a cortante. Sin embargo, quizás el estudio más interesante sea el que muestra la resistencia a tracción en función del volumen incorporado de fibra. A primera vista es sencillo intuir si la adición podría cumplir con los objetivos previstos, ya que según algunos autores [40] existe una envolvente de resistencias: la superior, que indica que con la adición de fibras existe una mejora en las resistencias debido a una gran capacidad de adhesión; y otra inferior, reveladora de una peor adherencia entre fibras y betún (rebaja de resistencias desde las porciones más bajas de adición). La Ilustración 15 demuestra un aumento en la resistencia de tracción, lo que significa que hay una distribución de esfuerzos entre el betún y las propias fibras, viéndose aumentado en consonancia a la inclusión de las mismas.

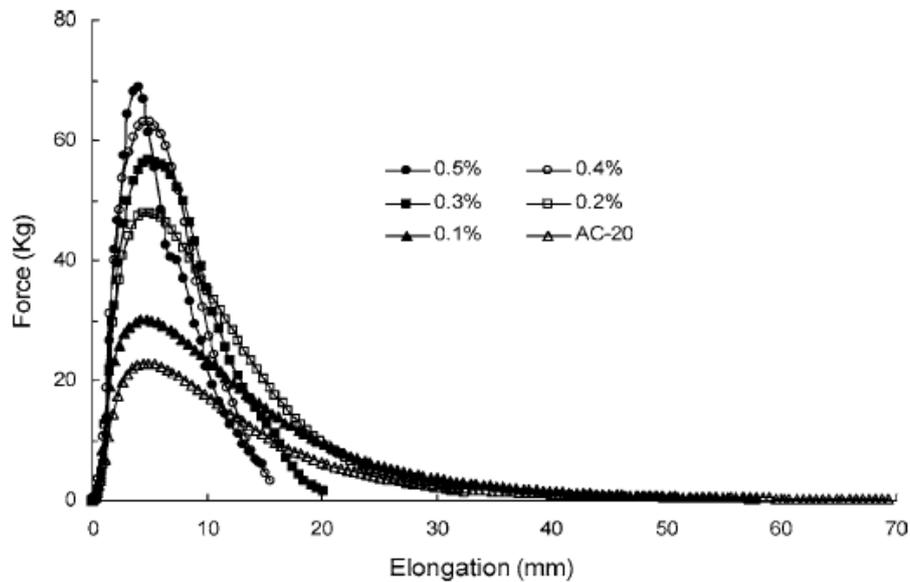


Ilustración 15. Gráfica tracción-deformación para betún mezclado con fibras minerales [39].

De este gráfico, también se pueden sacar otra conclusión como es que cuanto más aumentamos el contenido de fibra en el ligante, menor capacidad de deformación tiene a rotura. Eso significa que las fibras pueden inducir cierta fragilidad al mástico. Otros resultados interesantes tienen que ver, de nuevo, con las dimensiones de las fibras; es decir, con su superficie específica. Esto se debe a que se detecta un mejor comportamiento en las fibras minerales que en las de poliéster, a pesar de que éstas últimas poseen mejores características resistentes. El diámetro de las fibras minerales es 10 veces menor al de las plásticas, lo que implica una óptima distribución de tensiones, sin regiones de concentración de las mismas; algo que sí que ocurre en las fibras con un diámetro más grueso. Si la distancia entre las fibras es menor que el área de concentración de tensiones, hay un área de superposición entre las fibras en donde la resistencia del material compuesto de fibra se reduce (Ilustración 16).

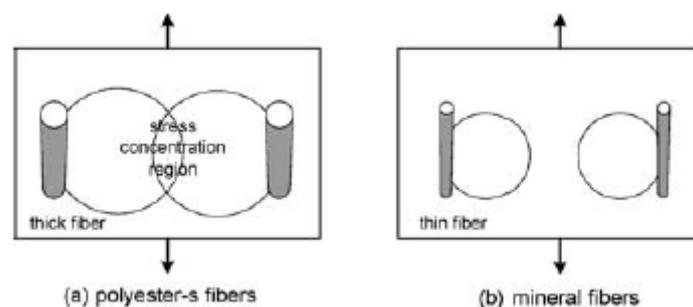


Ilustración 16. Concentraciones de tensiones debidas al diámetro de fibra [39].

Una vez conocidas las propiedades que nos incluyen las fibras de poliéster en el betún y en mezclas cerradas, surgen investigaciones para incluirlas en abiertas, y más concretamente en la porosas [41]. En este caso, se lleva a cabo un estudio completo del rendimiento que podría dar este estabilizador de mezcla comparándolo con la fibra de celulosa. Sus conclusiones indican que para este tipo de mezclas, se convierte en imprescindible el uso de unas fibras que restrinjan el escurrimiento del ligante durante su transporte y compactación. No derivarán tanta tensión a las fibras como en el caso de las cerradas, y simplemente buscan un mástico que sostenga el esqueleto mineral, la gran debilidad de las porosas.

Los valores que muestran no difieren de otros estudios antes mencionados, dando como óptimo el 0,3% de adición de fibras sobre peso total de mezcla; estando el contenido de betún entre 4,5-6% sobre el dicho peso. Sí establecen ciertas ventajas de la utilización de las fibras de poliéster respecto de las de celulosa, como en el caso de las propiedades volumétricas, ya que proveen de un mayor volumen de huecos. De igual manera, en términos de desgaste y resistencia a las deformaciones plásticas, muestran cierta mejoría sobre las orgánicas.

3.2.4. LANA MINERAL

La lana mineral es un material natural compuesto por arena silíceo y vidrio reciclado, en el caso de la lana de vidrio; y con roca basáltica para la lana de roca. Su estructura basada en fibras, permite conseguir un producto muy ligero con gran nivel de protección térmica y acústica, además de poseer un gran comportamiento frente al fuego. La lana de vidrio se compone de hasta un 75% de residuo de vidrio, siendo el resto, arena silíceo. En el caso de la lana de basalto, no sólo está basada en la roca que la da nombre, sino que también puede estar formada por residuos procedentes de otras industrias como escorias, metales, arena de chorreo o ceniza de quemar lodos de depuradora. Su compromiso con el Medio Ambiente no se queda, únicamente, en esta inclusión de residuos en su proceso productivo, poseyendo gran capacidad de reciclaje propio con un simple proceso de calentamiento y extrusión.

Su utilización dentro de la mezcla bituminosa se basa en el efecto de transmisión de esfuerzos desde el esqueleto mineral a las mencionadas fibras. Su compromiso con el aglomerado se sitúa más cercano al que tiene el poliéster u otra fibra de tipo artificial; contrariamente al efecto que suelen producir las fibras orgánicas como la celulosa, que provocan una gran absorción de ligante y una mejor envuelta del árido.

Las investigaciones que han incluido la lana mineral entre las fibras a estudiar [42-44], se han dedicado únicamente al posible uso de estas fibras en mezclas cerradas o en la variabilidad que provoca en la reología del betún.

Respecto a los cambios que podría producir en la reología del betún, los estudios se centran en la capacidad de mejora de la resistencia del mástico dentro de la mezcla. El refuerzo que puede suponer la entrada de fibras minerales, permitiría una posible rebaja del contenido de betún y un mejor comportamiento de la mezcla frente a fatiga y gradientes térmicos [43]. Su caracterización indica un alto peso específico (2,75 gr/cm³, debido a su procedencia mineral) y una superficie específica limitada (0,1 m²/gr), aunque las características más determinantes en la investigación serán la longitud y la rigidez.

Gracias a la utilización del microscopio electrónico (SEM), se pueden confirmar las relaciones que se conforman entre el betún y las fibras, y la red tridimensional que son capaces de crear dentro del mástico. Esta red es de diferentes tipologías según el tipo de fibra, siendo, en el caso de las fibras minerales, una red muy uniforme; sin enredos que se pueden observar en fibras con menor rigidez o más rugosidad superficial (Ilustración 17). Esta forma de conectarse entre las distintas fibras, también ha de tenerse en cuenta en el momento de contabilizar la cantidad de huecos dentro de la mezcla. Se confirma que cuanto mayor sea el contenido de fibra, mayor será el porcentaje de huecos, y por ello, disminuye la capacidad del mástico para soportar el esqueleto mineral. Es de gran incidencia en el caso de mezclas porosas, en las cuáles no existe un volumen de mástico suficiente para hacer frente a un exceso en el volumen de huecos.

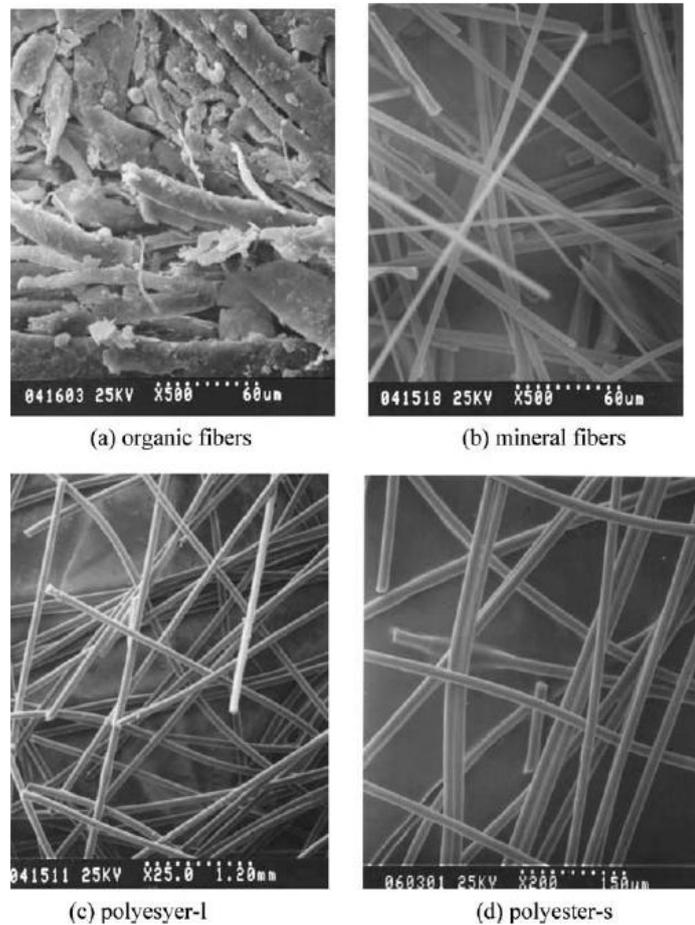


Ilustración 17. Micrografías electrónicas de barrido de cuatro fibras diferentes [39].

Con el objetivo de conocer las dosificaciones óptimas de fibras dentro de la mezcla, estas cantidades han de presentar buenos rendimientos para diferentes ensayos: han de modificar el betún de tal manera, que aun rigidizándolo a altas temperaturas, sus prestaciones a bajas no varíen. Las fibras de lana mineral actúan de esa forma, resultando de gran utilidad en climas fríos donde los problemas por fractura a baja temperatura se convierten en el principal deterioro del firme. Además, la comentada rigidización de la mezcla, provoca un menor escurrimiento en los momentos de transporte y compactación del aglomerado, incluyendo unas mejores prestaciones ante deformaciones plásticas.

Como confirmación de estas mejoras referidas al ligante, estudios sobre mezcla [42] reflejan buenos comportamientos con la adición de fibras en ensayos a tracción indirecta y módulo dinámico. Se habla de confirmación ya que a mayor resistencia a tracción indirecta, menos sensible es el pavimento a fractura por baja temperatura [45].

Estos resultados se refieren a mezclas cerradas con gran cantidad de betún (SMA), lo que únicamente se podría tomar como directriz para el caso de mezclas porosas. A pesar de ello, la adición de fibras de carácter mineral limita el contenido de betún y el volumen de huecos, con lo que indica que sin disminuir en exceso la cantidad de huecos necesarios, el nivel de betún a integrar en la mezcla puede situarse en dosificaciones más cercanas.

Los resultados de los múltiples ensayos hechos a mezclas con fibras minerales, reflejan dosificaciones muy cercanas a las que nos proporcionan las guías de construcción de pavimentos de países escandinavos [46]. Éstas indican que, el contenido óptimo tanto para lana procedente de basalto como la procedente de vidrio residual, se encuentra entre el 0,4-0,6% sobre mezcla. La literatura cree que el óptimo está en el 0,4%, porcentaje para el que las deformaciones plásticas son menores, produciendo excelentes comportamientos a temperaturas bajo cero, muy habituales en los países antes referidos.

4. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

4.1. ACTIVIDADES REALIZADAS

4.1.1. INTRODUCCIÓN

Las actividades desarrolladas en el presente trabajo se enfocan dentro de la tendencia actual en la investigación con mezclas bituminosas que pretende aumentar la vida útil del pavimento de carretera. La línea marcada por las SMA y su mayor durabilidad provoca que el resto de mezclas habitualmente utilizadas, quieran adherirse a su filosofía basada en altos contenidos de ligante junto con un esqueleto mineral robusto.

Con la pretensión de conocer el funcionamiento de otro tipo de mezclas con esas dos características principales, las mezclas porosas se muestran como aquellas que con más posibilidades tienen de demostrar esa mejoría en sus prestaciones. Su granulometría, con gran similitud con las SMA en la fracción gruesa, y conociendo su limitada durabilidad debido a los problemas de desgaste que suele tener, parece ser la elección que con más opciones podría integrar las características principales de las SMA. Todo ello será evaluado y analizado mediante ensayos que den validez a la integración de fibras en la mezcla bituminosa, a la vez que se comparan entre las procedentes de residuo de brik y las de celulosa sintética.

4.1.2. FIBRAS

Con objeto de analizar la influencia de las fibras en una mezcla drenante, la apuesta por el brik trata de vincular un sentido sostenible a otro componente de las mezclas bituminosas, y puede indicar si el polietileno o el aluminio que contiene, mejora o no el servicio de la celulosa.

El proceso seguido para integrar las fibras de VIATOP® (celulosa sintética) es el marcado por el fabricante para ensayos de laboratorio; en cambio, las fibras de brik han tomado dos procesos distintos a fin de ver qué posibilidades procuraba cada uno. Por un lado, se intenta asemejar al producto comercial añadiendo ligante a la fibra; y por otro, se dispensa manualmente a la mezcladora junto con los áridos, antes de añadir el betún para su aglomerado.

La integración de ambos tipos de fibras en la mezcla creará una mayor superficie

específica alrededor del árido, procurando una mejor envuelta del ligante. A su vez, permite la incorporación de mayor contenido de betún sin que existan problemas de escurrimiento, y con posibilidad de aumento de las resistencias por dicho incremento en la mezcla.

4.1.3. GRANULOMETRÍA

En este trabajo, se parte con la granulometría como único elemento fijo, tratando de maximizar el volumen de huecos presentes en la mezcla. Por ello, se limita el contenido de finos a lo marcado por la Norma española (PG-3) para el tipo de mezcla porosa PA16, que a la vez permite asimilar el método Bailey dentro de la investigación.

Como inicio, se presentan unos tanteos dentro de los husos granulométricos fijados para la PA16 con un objetivo primordial: la maximización de huecos en el árido (VMA). Al tomar como dimensión mayor de partícula 16 mm, el valor del NMPS es de 11,2 mm (tamiz que retiene más del 10% del árido), y los tamices de control primario (PCS) y secundario (SCS), serán de tamaños de 4 mm y 0,5 mm, respectivamente.

El objetivo de maximizar huecos se puede esquematizar de la siguiente manera, a partir de los parámetros de los que provee el método:

- El aumento del **peso específico** de la fracción gruesa, incrementa el volumen de huecos. Disponer de un 5% más de peso específico puede suponer entre un 0,5 y un 1% de aumento en el volumen de huecos.
- El aumento del **CA ratio**, incrementa el volumen de huecos. Cada 0,2 de subida en este parámetro, podría aumentar el volumen de huecos hasta en un 1%. En cambio, la disminución del mismo ratio, conllevaría cierta segregación potencial.
- Si el aumento se produce en los índices **FA**, el volumen de huecos caerá debido a un empaquetamiento mayor del árido.

4.2. MATERIALES EMPLEADOS

4.2.1. ÁRIDO

El árido empleado es de tipo ofítico, procedente de machaqueo. Posee un índice de lajas de 12 y un coeficiente de Los Ángeles de 16, cumpliendo así las especificaciones propuestas por el PG-3 en los artículos 542 y 543. Su peso específico es de $2,921 \text{ gr/cm}^3$, medido en picnómetros con agua destilada.

Este árido ha sido utilizado en todo el espectro granulométrico salvo en el filler, para el cual se ha incorporado mineral calizo (Ilustración 18). La ofita es un árido que presenta las mejores prestaciones para una capa de rodadura, donde la caliza podría producir problemas de pulimento acelerado. En el caso del filler, era recomendable aportar polvo calizo procedente de machaqueo, ya que provee de un mástico de gran calidad; además se ha de tener en cuenta su proporción respecto al betún, que debe alcanzar valores en torno a 1 en el cociente masa de filler/masa de betún.



Ilustración 18. Muestra de árido ofítico y filler de aportación calizo.

4.2.2. BETÓN

El betón utilizado durante el trabajo ha sido de tipo convencional 50/70 (Tabla 6). Es un ligante que según el PG-3 no podría formar parte del pavimento poroso de vías con gran tráfico; sin embargo, es válido para establecer comparaciones entre las mezclas que no contengan fibra y las que sí la contengan, objeto principal del documento.

Tabla 6. Características técnicas del betón convencional 50/70.

Características	Unidad	Método de ensayo	Especificación
Penetración a 25 °C	0,1 mm	EN 1426	50-70
Punto de reblandecimiento	°C	EN 1427	46-54
Resistencia al endurecimiento			
<i>Penetración retenida</i>	%		≥50
<i>Incremento punto de reblandecimiento</i>	°C	EN 12607-1	≤9
<u>Severidad 1</u>			
<i>Cambio de masa (valor absoluto)</i>	%		≤0,5
Punto de inflamación	°C	EN ISO 2592	≥230
Viscosidad cinemática a 135 °C	mm ² /s	EN 12595	≥295
Solubilidad	%	EN 12592	≥99,0
Índice de penetración		Anexo A EN 12591	-1,5 a +0,7
Punto de fragilidad Fraass	°C	EN 12593	≤-8

El contenido de ligante elegido para conocer el nivel de compromiso de las fibras, tanto las de celulosa sintética como las de brik triturado, se sitúa en 5 y 5,5%, respectivamente. Son contenidos altos para mezclas porosas, que suelen alcanzar su óptimo en el 4,5% en peso sobre árido (dependiendo de granulometría y árido trabajado). Además de la comparación entre fibras, también se podrá mostrar el nivel de resistencia que tendrían estas mezclas drenantes, con un mayor contenido de ligante al habitualmente utilizado.

4.2.3. FIBRAS

Los estabilizadores de mezcla porosa utilizados en esta investigación son de dos tipos: por una parte, se ha incorporado celulosa granulada con betún; y por otra, fibras procedentes de envases de brik triturados hasta conseguir los tamaños óptimos. En el caso del producto comercial sólo se ha estudiado la dosificación idónea que mejor servicio establece en la mezcla; sin embargo, el trabajo con las fibras de residuo de brik parte desde el propio tamaño de partícula y su formato para incluir en la mezcla.

Viatop®

Las fibras granuladas con betún son un producto mundialmente extendido, y en este caso, suministrado por la empresa JRS con el nombre de VIATOP®. Se trataba de tomar este tipo de fibras como la referencia actual de las fibras de celulosa y comprobar si, su incorporación a mezclas drenantes, tenía el buen servicio que aporta a las SMA. Este material se compone de un 90% en peso de fibras de celulosa y un 10% de betún asfáltico, siendo las características técnicas las expresadas en las siguientes tablas:

Tabla 7. Características técnicas de la celulosa VIATOP®.

Características de la celulosa	
Composición básica	Fibra de celulosa técnica
Contenido en celulosa	80±5%
Valor del pH (5g/100ml)	7,5±1,0
Longitud media de fibra	1100 µm
Grosor medio	45 µm

Tabla 8. Propiedades del betún de envuelta del pellet.

Características del betún		
Penetración a 25 °C	0,1 mm	50/70
Punto de reblandecimiento	°C	46-54

Tabla 9. Características técnicas del granulado VIATOP®.

Características del granulado	
Contenido de fibra	87-93 %
Longitud media del gránulo	2-8 mm
Grosor medio	4±1 mm
Densidad aparente	440-540 g/l
Análisis granulométrico (<3,55 mm)	máx. 10%

El tratamiento que ha de recibir el granulado en laboratorio es distinto al proceso que se establece en planta, donde únicamente se hace necesaria una tolva de dosificación. En laboratorio y debido a la menor intensidad de cizallamiento producida por la amasadora que se dispone, podrían aparecer zonas heterogéneas al no conseguir al completo el efecto de desgranulado de la fibra, sin poder conseguir la dispersión de celulosa esperada. Por ello, se procede con una desgranulación previa: se introduce el producto en estufa a 180 °C durante 5 minutos para, inmediatamente después, desagregar los gránulos con un mortero.

Una vez que se ha producido la disgregación de los pellets, la fibra se ha de incluir junto con la fracción de arena de los áridos antes de proceder con el calentamiento de todo el conjunto (áridos + VIATOP®), acondicionando el material a peso constante previamente a la fabricación de la mezcla.

Las dosificaciones elegidas para ensayo fluctúan entre lo que se aconseja por parte de la empresa proveedora y las experiencias recogidas en el Estado del Arte. Habitualmente, las dosificaciones de estas fibras son del 0,4-0,5% en peso sobre mezcla, aunque varían en función del contenido de ligante. Como se comentó anteriormente, se van a utilizar dotaciones de betún de 5 y 5,5%; y de 0,25; 0,5; 0,75% de fibra sobre mezcla. El contenido de betún, a pesar de situarse por encima del óptimo de las mezclas drenantes (4,5% en peso sobre árido), no es excesivo como para variar el nivel de fibra que proviene de experiencias anteriores, que llegaban hasta niveles de 6,5% de betún sobre mezcla.

Brik

Los envases de brik son de amplia utilización en la actualidad y, a pesar de un buen proceso de recolección y reciclaje, no se trata de una reutilización completa del material. Lo establecido actualmente es la separación de sus componentes (polietileno, aluminio y cartón) para destinarlos a diferentes usos: el papel se trata hasta convertirse en papel reciclado; y en

el caso del polietileno y el aluminio, su separación se hace compleja, por lo que se incinera con el objetivo de crear energía.

Estos procesos requieren de la utilización de gran cantidad de maquinaria, coste energético y emisiones de CO₂; situación distinta a la de crear otra opción basada en el uso completo del material, sin variaciones de composición. Surge, de esta manera, que con la simple trituración del material, se pueden llegar a conseguir unas fibras que cumplan el propósito de estabilizar una mezcla bituminosa y posibilitar la mejora de sus resistencias.

El proceso de trituración del material se basa únicamente en el uso de un molino industrial (Ilustración 19), cuya función habitual es la rotura de poliamida, perteneciente a los apoyos de anclajes en traviesas para ferrocarriles de alta velocidad. Es por ello, que el intento de triturar un material más ligero y más dúctil produjo diversas dificultades hasta llegar a la obturación del tamiz de salida del material. A pesar de esa situación, el nivel de cizalla fue el adecuado para llegar a tamaños por debajo de 2 mm, en su mayoría.



Ilustración 19. Trituradora Mateu&Solé 19/25 M (LADICIM, Universidad de Cantabria).

Una vez triturado el material, se tamiza en cuatro tamaños distintos para comparar de mejor manera estas fibras procedentes de envases con las de VIATOP®. Se evita con ello que exista variabilidad por la heterogeneidad de los tamaños, más de la que ya cabe debida a la composición del envase. Como se muestra en la Ilustración 20, se consiguen fracciones homogéneas, llegando hasta tamaños de filler, el cuál podría ser objeto de estudio más adelante como parte del mástico de las mezclas bituminosas.



Ilustración 20. Muestra del triturado de brik tamizado por tamaños: 2-1 mm; 1-0,5 mm; 0,5-0,25 mm; <0,25mm.

Con la muestra diferenciada, se establece una metodología para la elección del tamaño óptimo de trabajo y el formato que debía tener para ser integrada en la mezcla: ya fuera directamente en seco sobre la mezcladora o envolviéndola previamente en betún. Se probó el incorporar el ligante a las fibras de tamaños superiores (2-1 mm y 1-0,5 mm), en una proporción de 2:1 en peso (fibras:betún). El resultado se puede ver en la Ilustración 21, donde las partículas de brik forman grumos, pegándose unas a otras sin crear una pasta uniforme.



Ilustración 21. Fibras de brik aglomeradas con betún antes y después de calentar en estufa.

Con la pretensión de simular el mismo efecto de la capa de betún en el granulado referencia, estos grumos se metieron en estufa durante media hora a 150 °C para comprobar si el ligante conseguía crear una pasta cercana a lo visto en ellos. Al no ser así, se aumentó la dotación de betún hasta llegar al 50% sobre mezcla entre fibras de brik y ligante. En este caso, y debido a la gran cantidad de betún adicionado, sí que se crea una pasta que si no parecida a los gránulos de VIATOP®, sí que tienen visos de proveer una buena envuelta a la fibra, mejorando su adhesión al árido.

El ensayo elegido para comprobar el rendimiento de las fibras de brik, y a la vez, el formato ideal (mezclado con betún o sin mezclar) y el tamaño de partículas, es el Cántabro seco (UNE EN 12697-17). Es un ensayo que evalúa la resistencia de las mezclas porosas (resistencia a la abrasión) por su pérdida de masa después de someterse a 300 volteos en la máquina de Los Ángeles. Estas vueltas se dan a una velocidad de 30-33 rpm.

Al contrario que en el caso del VIATOP®, se valoraron dosificaciones de fibra más extremas para conocer si sus valores debían ser similares a los de la fibra comercial o no, debido a su muy distinta composición. Los niveles de dosificación elegidos fueron 0,5; 1 y 2% de masa de fibra sobre mezcla. Además de analizar los resultados mediante el ensayo Cántabro, también se incluyó el ensayo de permeabilidad (UNE EN 12697-19) como nivel a valorar en la dosificación de fibras.

Como se verá en los resultados, las probetas con contenidos de fibra de brik de 1 y 2% no parecían ser idóneas y los ensayos posteriores se desarrollaron con los niveles de dosificación vistos anteriormente en las fibras comerciales: 0,25; 0,5; y 0,75%. Como el

formato en el que se integraban estas fibras era otra de las derivadas que traía consigo el ensayo, se optó por disponer las fibras directamente sobre el árido, sin necesidad de ser mezcladas con betún. Los resultados indican muy similar comportamiento y el mezclado con betún suponía una preparación más compleja que de la forma elegida.

4.3. ENSAYOS REALIZADOS

Los ensayos que han formado parte de este trabajo se centran en la caracterización de la mezcla; no así de los áridos, el betún o las fibras, que ya cuentan con una certificación propia de su servicio como se ha mencionado en apartados anteriores. El elemento que no cuenta con una extensa caracterización es el residuo de brik, pero al no tratarse de un producto peligroso o dañino, su acción sobre la mezcla es el factor más importante para el objeto de estudio.

Los valores de referencia que se tienen en cuenta para indicar el potencial servicio de las mezclas probadas, es tomado de la norma española (PG-3) y de la literatura descrita en el Estado del Arte.

La compactación de probetas del presente trabajo ha seguido el proceso marcado por la norma UNE EN 12697-30, con 50 golpes por cada cara en un molde Marshall.

4.3.1. CONTENIDO DE HUECOS (UNE EN 12697-8)

El contenido de huecos de una mezcla drenante es uno de los parámetros exigidos dentro de la norma española, recogido en los métodos de ensayo obligatorios marcados en la UNE EN 13108- 20 Anexo B. El valor mínimo fijado para las mezclas porosas es de 20% de huecos sobre mezcla.

4.3.2. ESCURRIMIENTO DE LIGANTE (UNE EN 12697-18)

Para las mezclas drenantes, se debe de comprobar que no se produce escurrimiento de betún debido a su falta de finos. Este podría tomarse por el ensayo que acota por encima el contenido de ligante en este tipo de mezclas. En el caso de la utilización de fibras, este ensayo denotará su compromiso con la estabilización del conjunto mineral.

La norma permite dos tipos de metodologías para evaluar el exceso de ligante que posee una mezcla abierta: la primera basada en el uso de una cesta perforada con huecos de 3 mm, y la segunda, más compleja llamada “método Schellenberg”. En el desarrollo de este proyecto se ha utilizado el primer método (Ilustración 22), en el que simplemente había que alojar la mezcla drenante, una vez fabricada, dentro de la cesta y dejarla en estufa a las siguientes temperaturas:

- 175 °C para betunes convencionales (25 °C más que la temperatura de mezclado).
- 180 °C para betunes modificados (15 °C más que la temperatura de mezclado).

No se recoge en el PG-3 un valor de escurrimiento que invalide la utilización de una cierta mezcla, con lo que se tomará de la literatura y de las guías de buenas prácticas, un contenido migrado a partir del cual la mezcla no es adecuada para resistir el transporte y la compactación sin segregarse del resto del aglomerado. Se tomará el 0,3% de betún sobre mezcla como límite máximo de escurrimiento, derivado de la siguiente fórmula (6):

$$\text{-----} \quad (6)$$

donde

D es el material migrado, en porcentaje (%).

W_1 es la masa inicial de la bandeja y el papel de aluminio, en gramos (g).

W_2 es la masa de la bandeja y el papel de aluminio, en gramos (g), conteniendo el material migrado.

B es la masa inicial de ligante contenido en la mezcla, en gramos (g).

Como se vio en el Estado del Arte, algunos investigadores medían la cantidad de betún escurrido a lo largo del tiempo, midiendo a cada hora el contenido perdido. En el caso de la norma seguida, únicamente debe hacerse una medida de esa pérdida, tres horas después de haber dejado la cesta en la estufa.

Por otro lado, es necesario explicar que la norma UNE comenta que para mezclas con fibras es mejor validar el escurrimiento con el método Schellenberg, ya que podrían obstruir los huecos de la cesta, resultando en valores engañosos. Por falta de disponibilidad de material de laboratorio, tanto los ensayos de referencia como los que incluían fibras, han sido evaluados con la cesta, no habiendo la obstrucción comentada y siendo limpiada la cesta para cada amasada.



Ilustración 22. Cesta de escurrimiento y material de ensayo.

4.3.3. POROSIDAD

La porosidad de una mezcla drenante no es estudiada actualmente por las normas española y europea, pero se trata de un valor de notable importancia en una mezcla que persigue la maximización de huecos y la mejora de las características drenantes. En la literatura revisada sí que cuentan con métodos que intentan reflejar el porcentaje de huecos interconectados, aquellos por los cuales el agua podría discurrir realmente en la carretera.

Por sus propias características, las mezclas porosas no pueden ser saturadas; sin

embargo sí que contienen huecos por los que el agua sólo puede penetrar ante situaciones de vacío u horas de saturación; y otros que ni siquiera pueden ser inundados. Debido a estos condicionantes, la metodología seguida en este trabajo pretende obtener los valores de huecos que servirían como vías de drenaje en el firme de carretera, sin prestar excesiva importancia a los huecos que no proveen de ese camino.

El proceso seguido es el siguiente:

- Se saturan las probetas durante hora y media.
- Se voltean, liberando los huecos que quedaban sin inundar por su primera posición.
- Se mantienen en baño otra hora y media.
- Son pesadas en otro baño con la misma temperatura del agua que en el que estaban.

Con la masa resultante del proceso, se consigue el valor de los huecos interconectados gracias a la fórmula descrita en el Estado del Arte (5).

4.3.4. PERMEABILIDAD

La permeabilidad puede tomarse como un valor función de los huecos interconectados antes comentados y, por supuesto, del volumen de huecos total. La permeabilidad se encuentra recogida en la norma UNE EN 12697-19, aunque dentro de la instrucción española no aparece como ensayo obligatorio para mezclas drenantes.

Esta norma recoge una metodología basada en un permeámetro que pueda alcanzar más de 300 mm de columna de agua sobre la probeta, además de retener el líquido en su parte inferior. Eso conlleva la medición del caudal vertido y el que ha podido discurrir por la probeta en el tiempo medido.

Sin cambiar el concepto del ensayo, el método seguido en este trabajo se adecúa a las posibilidades y material del Laboratorio de Caminos. En este caso, se utiliza un tubo de metacrilato adosado al cuello de un molde Próctor; molde cuyas dimensiones son iguales en diámetro a las de las probetas Marshall (Ilustración 23). La medición será en tiempos de

descarga y no en caudal, fijando dos puntos fijos a distintas alturas del mencionado tubo.

El primer paso de preparación de probetas es su envuelta en plástico para obligar al agua a tomar como salida la cara inferior de la probeta y que no salga por el perímetro. Esto se debe a que la medida que se quiere analizar es la capacidad de permeabilidad vertical y no la horizontal. Una vez alojada la probeta en el interior del molde, se dispone el molde y el tubo de metacrilato encima de un pedestal que permita comprobar que el ensayo se hace sin pérdidas de agua.

Después de la colocación de probeta y permeámetro, se rellena este último hasta el nivel máximo de capacidad para hacer dos descargas que saturen la probeta, como situación similar a la de escala real. La tercera y cuarta descarga serán las de medición de tiempos para evaluar como resultados.

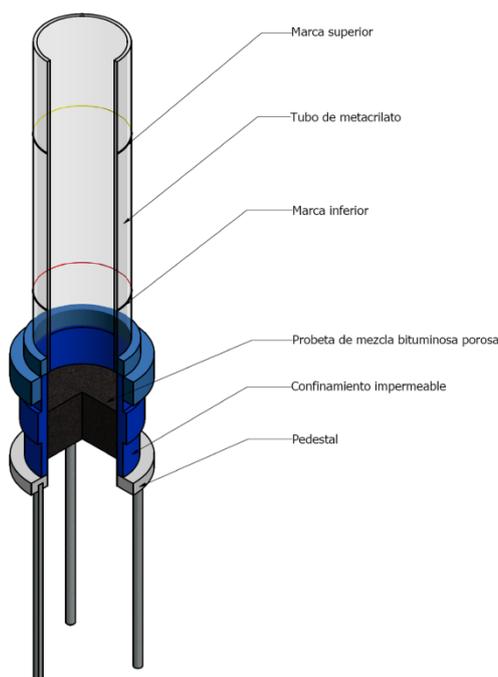


Ilustración 23. Permeámetro de carga variable (GITECO, GCS).

El tiempo medio de caída de agua entre las marcas fijadas, será el utilizado dentro de la siguiente fórmula para cuantificar la capacidad de drenaje de la mezcla (7):

Como se explicaba anteriormente, se procedió una vez escogidas las fibras de mayor tamaño, ya que no se reflejaron apenas diferencias de rendimiento respecto a los dos tamaños de fibras brik, y la cantidad de material disponible era mayor.

Establecidas las cantidades de fibras (0,25; 0,50; 0,75% s/m), su formato de adición y el contenido de ligante, se pasó a ensayar la mezcla bituminosa no sólo con el Cántabro seco, sino también con el húmedo, del cual se podrían sacar conclusiones sobre la calidad de la envuelta del betún sobre las fibras o la debilidad de éstas respecto al agua. El Cántabro húmedo actualmente no se encuentra recogido en normativa UNE; sin embargo, sí formaba parte de la normativa NLT (362-92) y del PG-3 de 2004. Es un ensayo completo que además de poder demostrar la susceptibilidad de la mezcla al agua, también establece cierto envejecimiento sobre ella al disponer las probetas 24 horas en un baño a 60 °C, y otras 24 horas más, en cámara a 25 °C. Ésta última siendo también la temperatura de ensayo.

Los valores mínimos a cumplir en cada uno de los ensayos son los siguientes (Tabla 10):

Tabla 10. PG-3: Anejo 543.5.1.5 y PG-3 (2004): Anejo 542.5.1.

Característica		Categoría de tráfico pesado	
		T00 a T2	T3, T4 y arcenes
Pérdida de partículas (seco)	PA	<20%	<25%
Pérdida de partículas (húmedo)	PA	<35%	<40%

Las probetas que son ensayadas según el Cántabro húmedo serán aquellas que también validaron los valores de la porosidad y la permeabilidad, explicadas en los siguientes epígrafes. Se pretendía eliminar un efecto adverso en las probetas que tenían como objetivo examinar el desgaste en seco, ya que con la humedad adquirida necesitarían un proceso de secado, el cual conllevaría alguna rigidización del material, además del cambio de masa antes de ensayo.

4.3.6. COMPRESIÓN TRIAXIAL CÍCLICA (UNE EN 12697-25)

El ensayo de compresión triaxial cíclica puede convertirse en la nueva metodología que indique el grado de servicio de las mezclas bituminosas frente a deformaciones plásticas. Aun sin estar presente como ensayo referencia para mezclas calientes en la norma española, en este trabajo se intenta sacar conclusiones respecto a la deformación permanente acumulada en las diferentes probetas.

El método de ensayo desarrollado se puede incluir dentro de los parámetros indicados en la norma europea, aunque siendo lo más exigente posible para poder corroborar el colapso por deformaciones a cortante. Las condiciones son las siguientes (Ilustración 24):

- Tensión desviadora axial: 600 kPa
- Presión de confinamiento: 150 kPa
- Onda de carga tipo bloque, con un tiempo de carga de 1 segundo, seguido de 1 segundo de tiempo de descarga
- Número de aplicaciones de carga: 10000 ciclos
- Esfuerzo de acondicionamiento: 9 kPa durante 120 segundos
- Temperatura: 60 °C

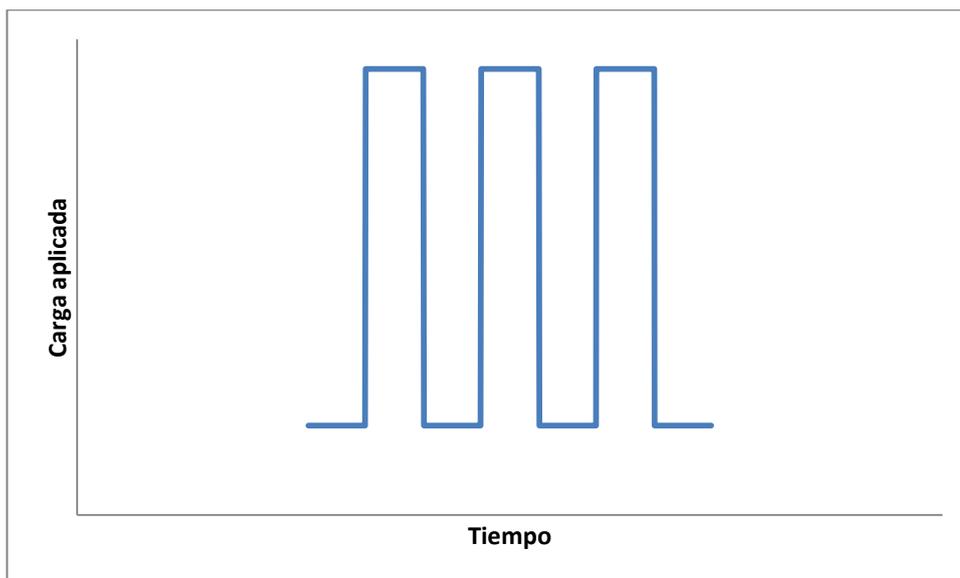


Ilustración 24. Representación de las presiones ejercidas sobre la probeta por carga cíclica en bloque.

La carga desviadora de 600 kPa es la única diferencia respecto a la metodología desarrollada por el CEDEX según la comunicación personal realizada [32]; carga que ellos situaban en 300 kPa y sin resultados de colapso en ninguna mezcla ensayada.

Los ensayos se hacen mediante la utilización de una máquina universal hidráulica Zwick Z10, además del utillaje de confinamiento para ensayo triaxial. Este dispositivo consta de un molde metálico y una membrana plástica interior, donde se produce la inyección de aire. Ante la necesidad de un ensayo a 60 °C, se dispone de una estufa de ventilación forzada con regulador de temperatura PDI (Ilustración 25).



Ilustración 25. Dispositivo para ensayo de compresión triaxial cíclica (GITECO).

Por último, cabe decir que las probetas ensayadas no tienen todo el espectro recogido en el ensayo de pérdida de partículas; se limita a dosificaciones de 5% de betún sobre mezcla y con contenidos de fibra de brik y VIATOP de 0,5%, igualmente sobre mezcla.

4.3.7. MEDIDA DE LA COMPACTABILIDAD DE MEZCLA CON LA COMPACTADORA GIRATORIA

La compactación giratoria supone en sí mismo un ensayo sobre la capacidad que tiene la mezcla a ser trabajada y las posibles deformaciones plásticas que podría acusar una vez puesta en la vía. En el presente trabajo se han utilizado los índices mostrados en el Estado del Arte sacados de las investigaciones de Del Río et al. (2011), ya que además de ser más fidedignos para una mezcla porosa, provienen de una investigación del mismo grupo de investigación GITECO y desarrollados por la misma máquina (ICT 250, Ilustración 26).



Ilustración 26. Compactadora giratoria (GCS/GITECO).

El método de fabricación de probetas para este ensayo ha seguido los mismos pasos llevados a cabo en el caso del resto de probetas compactadas por impactos. El número de ciclos a los que se han llevado las muestras es de 512, punto máximo que permite la máquina y que alcanza un nivel de huecos suficiente para el estudio de los índices energéticos y la resistencia a cortante de la probeta.

La comparación de los datos se hará respecto a lo reflejado en el estudio referenciado, además de comprobar, relativamente, los valores entre las mezclas referencia y las que incorporan fibras en su interior. El análisis desarrollado no tiene una significancia elevada, ya que el número de probetas ha sido pequeño debido a la presentación del trabajo, pero puede establecer una referencia para continuar con la línea de investigación.

Al igual que en el caso de compresión triaxial, se ensayan sólo mezclas con dosificaciones de betún de 5% sobre mezcla. En cuanto al contenido de fibra se sitúa en el 0,5% sobre mezcla.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados que se presentan a continuación son los correspondientes a los ensayos referidos en el capítulo 4, Metodología de la Investigación. También se incluye en este epígrafe la granulometría utilizada, elegida respecto al método Bailey de caracterización de propiedades volumétricas; además de los ensayos previos destinados a la elección del tamaño de fibra y su dosificación.

5.1. CARACTERIZACIÓN GRANULOMÉTRICA

De inicio, el planteamiento del trabajo era asimilar las funcionalidades de las que nos proveen las mezclas SMA (alto contenido de betún, robusto esqueleto mineral), a las mezclas porosas, que usualmente tienen deterioros prematuros. Derivado de ello, como se comentaba en anteriores capítulos, han surgido teorías para la mejora de las propiedades volumétricas de las mezclas bituminosas y su maximización de huecos manteniendo un nivel de servicio óptimo.

Con los ratios y directrices vistas en la Metodología, se crea una granulometría que, teóricamente, produzca una mezcla porosa de gran enclavamiento entre los áridos gruesos y sin problemas derivados por el bajo contenido de finos. En la Ilustración 27, se muestra la granulometría elegida en comparación con la del centro del huso para PA 16. Se denota un mayor contenido de gruesos hasta 4 mm (tamiz de control primario, PCS), para después producirse una caída hasta el límite inferior del huso permitido por norma española. El contenido de fíller permanecerá inalterado al del centro del huso, ya que se intenta no alejarse de la buena experiencia marcada por el cociente de valor 1 entre cantidades de filler y betún.

Para explicar de manera gráfica las diferencias en huecos existentes entre una mezcla centrada en el huso y la elegida para el presente trabajo, se hace necesario el utilizar la línea que marca el tamaño de tamiz elevado a 0,45 (línea que marca la granulometría continua con empaquetamiento máximo, 0% de huecos). La Ilustración 28 muestra tal diferencia, en la que cuanto más alejada se mantenga la granulometría de la línea de gradación continua, más huecos tendrá la futura mezcla.

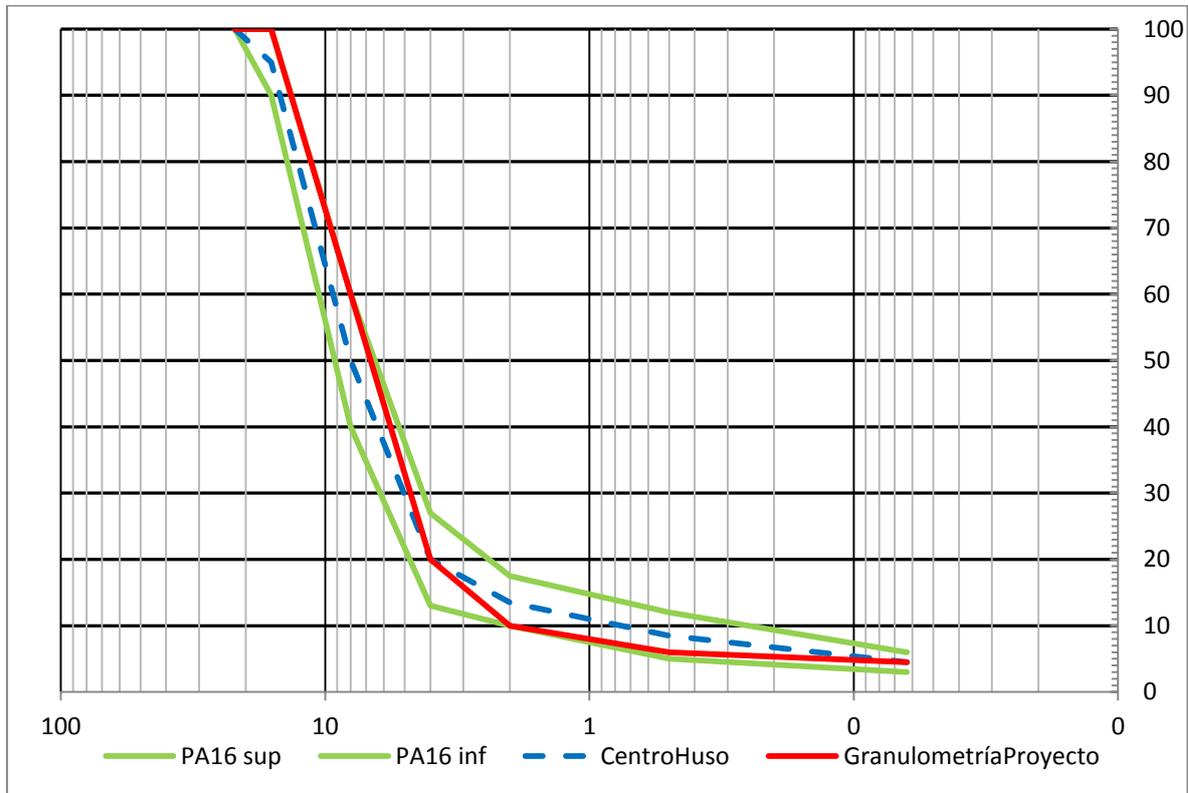


Ilustración 27. Curvas granulométricas de centro de huso y de proyecto (PA 16).

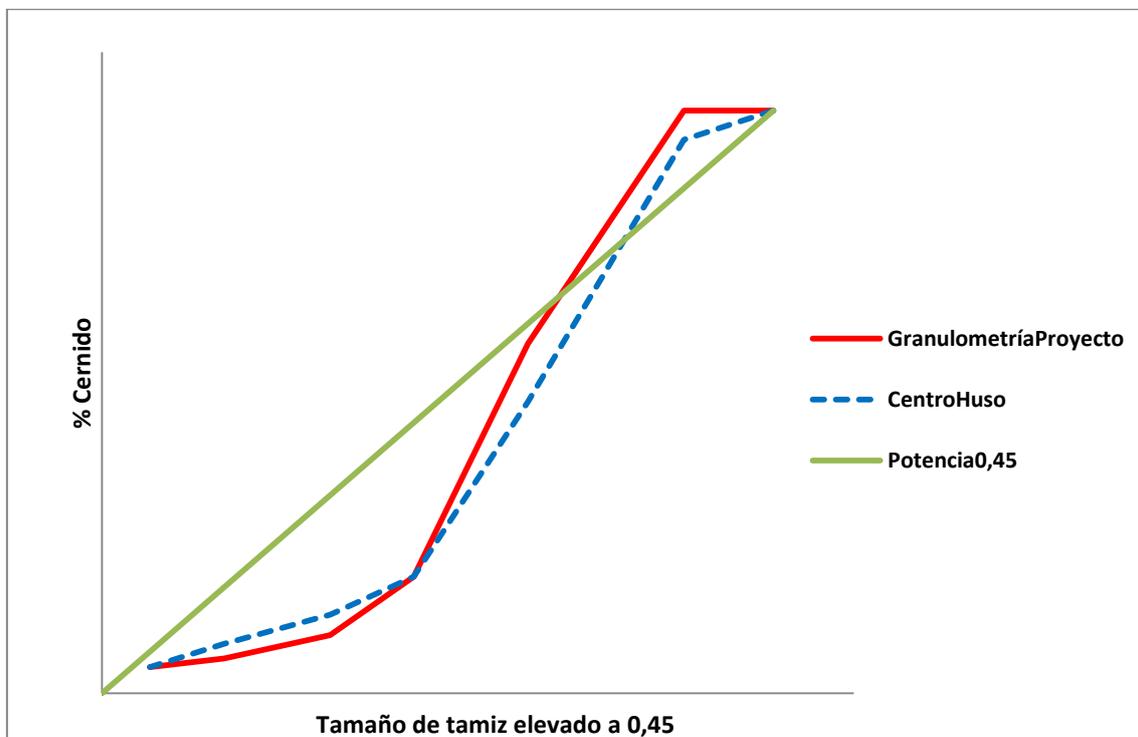


Ilustración 28. Comparación entre granulometrías y la línea de máxima compacidad.

Cuantitativamente, el área abarcada por la granulometría de proyecto es un 7,2% mayor a la limitada por el centro del huso. En comparación con ensayos precedentes efectuados en el Laboratorio de Caminos donde, siguiendo la norma UNE EN 1097-3, se llegaron a densidades aparentes para centro del huso del 26,2%; la granulometría modificada se sitúa entorno al 28%.

Misma diferencia puede extraerse de los métodos utilizados para aumentar el volumen de huecos en mezcla (Tabla 11):

Tabla 11. Valores de los parámetros del método Bailey.

	Método Bailey						
	NMPS	PCS	HS	SCS	TCS	CA	FA _c
PA16-Max	16	4	8	0,5	0,25	0,8	0,44
PA16-min	16	4	8	0,5	0,25	0,5	0,38
Centro del huso	16	4	8	0,5	0,25	0,6	0,43
Granulometría de proyecto	16	4	8	0,5	0,25	1,0	0,30

Según lo comentado en la Metodología, cada incremento de 0,2 en el valor de CA, podría significar hasta un 1% más de huecos. También se decía que un descenso en el factor FA_c provocaba de nuevo su aumento, aunque sin especificarlo cuantitativamente. En este caso, el aumento de huecos se situaría sobre el 2,2%; muy cercano a lo especificado anteriormente con la gráfica.

La maximización de huecos se verá reflejada en los siguientes apartados donde se dará cuenta de los valores de porosidad y permeabilidad, íntimamente ligados con el volumen de huecos provisto por la granulometría.

5.2. ENSAYOS PARA DOSIFICACIÓN DE FIBRAS

5.2.1. ENSAYO DE PÉRDIDA DE PARTÍCULAS

Previamente a los ensayos de diseño de la mezcla, se procedió con la elección del tamaño de fibra brik, el formato y su dosificación idónea a aplicar en lo sucesivo.

En la Tabla 12, se muestran los resultados obtenidos del ensayo Cántabro seco, los cuáles conllevan una variabilidad baja en cuanto a la acción de las fibras sobre la mezcla porosa. Hay que tener en cuenta que el contenido de betún dosificado, en ese caso, es de 4,5% sobre mezcla total, muy cercano al óptimo utilizado para estas mezclas; por lo que incluso se esperaba un peor resultado en aquellas con el aditivo integrado. A pesar del liviano efecto de las fibras, este ensayo sirvió para tomar las fibras de mayor tamaño, que a su vez, eran las más parecidas a los tamaños utilizados en VIATOP.

Los siguientes resultados, Tabla 13, indican que el formato de adición apenas afecta al rendimiento de la mezcla y que una sobredosificación limita las posibilidades de las fibras. A diferencia del ensayo anterior, esta mezcla fue fabricada con un contenido de ligante del 5% sobre mezcla, dotación más adecuada al objetivo fijado en el trabajo.

Tabla 12. Ensayo de pérdida de partículas en seco para elección de tamaño de fibra.

% fibras	Tamaño fibra (mm)	Densidad (gr/m3)	%huecos	%pérdidas
0	-	2,140	20,7	7,7
0,2	1-0,5	2,168	19,7	7,1
0,4		2,182	19,1	7,1
0,6		2,163	19,8	7,4
0,2	2-1	2,176	19,4	5,4
0,4		2,166	19,7	4,5
0,6		2,190	18,8	5,7

Tabla 13. Ensayo de pérdida de partículas en seco para elección de formato y dosificación de fibra.

% fibras	Forma de adición	Tamaño fibra (mm)	Densidad (gr/m3)	%huecos	%pérdidas
0	-		2,128	20,5	8,1
0,5	Como árido		2,128	20,5	4,4
0,5	Con betún	2-1	2,138	20,1	4,8
1	Como árido		2,126	20,5	5,5
2	Como árido		2,100	21,5	16,0

5.3. ENSAYOS DE DISEÑO DE MEZCLA

Este apartado contiene los ensayos con los que se podría validar la puesta en obra de las mezclas porosas (PA 16) con alto contenido de betún y aditivos de tipo celuloso. Respecto a norma española (PG-3) sólo quedaría validar el ensayo a tracción indirecta, que será desarrollado posteriormente a la entrega del presente trabajo.

Una vez decidido el tamaño y formato de adición de las fibras de brik, formarán parte de estos ensayos las fibras VIATOP. Como se reflejaba en la Metodología, se comparará el rendimiento entre ambos tipos de fibras y su capacidad de resistencia frente a mezclas referencia sin aditivos. También se tendrá en cuenta para esa comparación los valores de probetas fabricadas con el óptimo contenido de betún para mezclas porosas, 4,5% sobre mezcla.

5.3.1. CONTENIDO DE HUECOS Y POROSIDAD

En primer lugar, se muestran en la Ilustración 29 los valores de huecos según el contenido de fibra añadido, en los que se comprueba un descenso progresivo según es incorporado más contenido de fibra, aunque manteniéndose en niveles por encima del 20%.

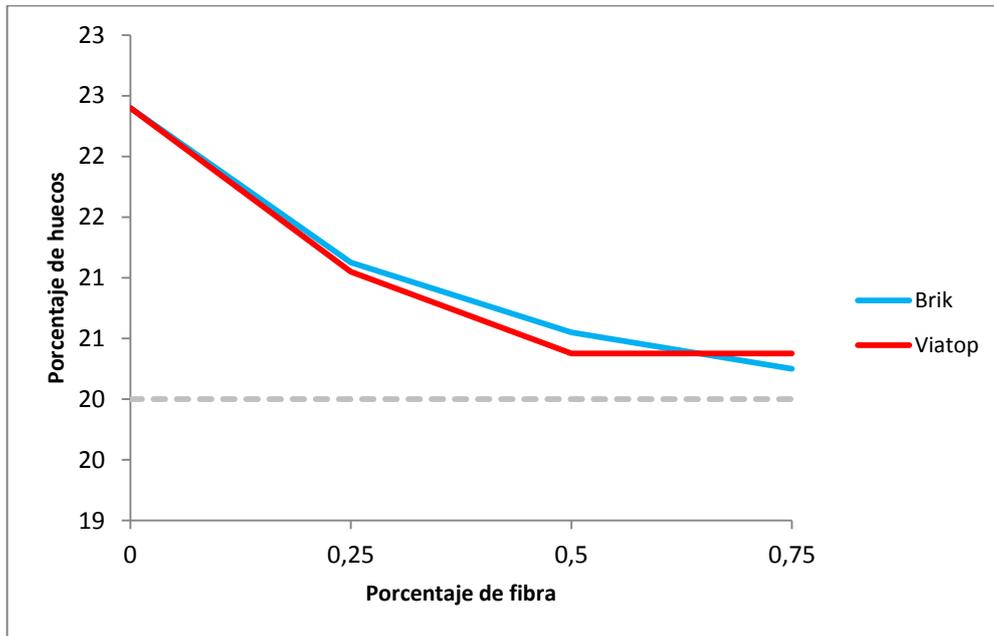


Ilustración 29. Representación del porcentaje de huecos respecto a porcentajes de aditivo.

No es negativo que la mezcla rebaje su volumen de huecos; primero porque el descenso no es excesivamente significativo, y segundo, porque alcanzar valores por encima de 20% de huecos es complejo tratándose de una mezcla con mayor contenido de betún al habitual (5% sobre mezcla) y con la adición de las fibras.

La Ilustración 30 refleja la relación existente entre el volumen de huecos medidos geoméricamente y la porosidad con la que cuentan las probetas. Queda demostrado que la medida geométrica es fidedigna y denota la densidad aparente del material; sin embargo, también da cuenta del volumen de huecos que no es capaz de absorber agua, ya sean por estar envueltos o por tener unas dimensiones insuficientes para el discurrir del líquido.

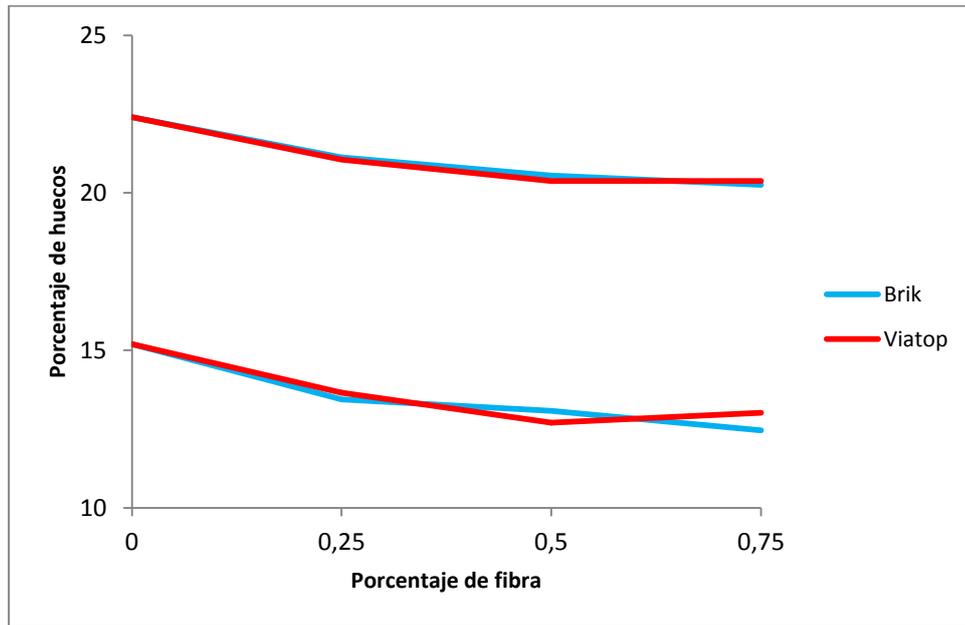


Ilustración 30. Porcentaje de huecos medido geoméricamente (arriba) y porcentaje de huecos interconectados (abajo) para un 5% de betún sobre mezcla.

En el caso de la mezcla con un contenido de ligante del 5,5%, el efecto de la fibra varía y llega a contener el descenso del porcentaje de huecos en comparación con la mezcla referencia. Esta vez el nivel marcado en norma para la cantidad de huecos se muestra muy exigente (Ilustración 31).

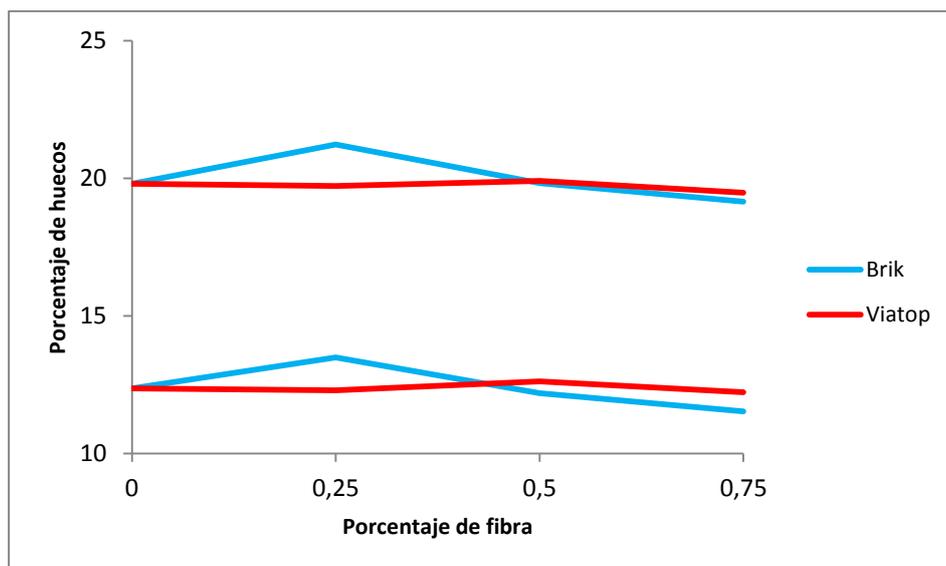


Ilustración 31. Porcentaje de huecos medido geoméricamente (arriba) y porcentaje de huecos interconectados (abajo) para un 5,5% de betún sobre mezcla

5.3.2. ESCURRIMIENTO

El aumento del contenido de betún en mezclas porosas hace que el ensayo de escurrimiento tome especial relevancia, ya que si no se retuviera dentro de la estructura mineral, el esperado aumento de durabilidad no existiría. Es el ensayo que dará, en gran medida, el compromiso del aditivo de fibras respecto a la mezcla. Los resultados son los siguientes:

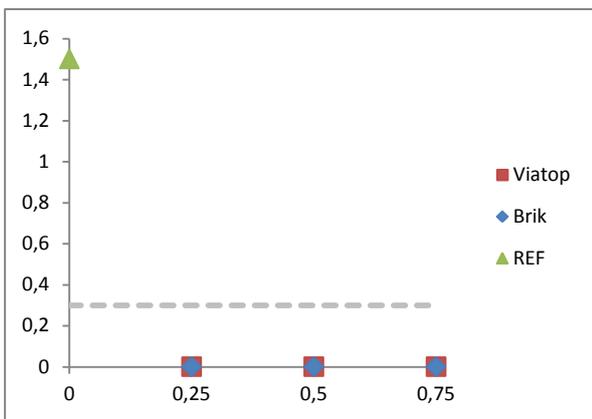


Ilustración 32. Porcentaje de escurrimiento según adición de fibra para 5% de betún sobre mezcla.

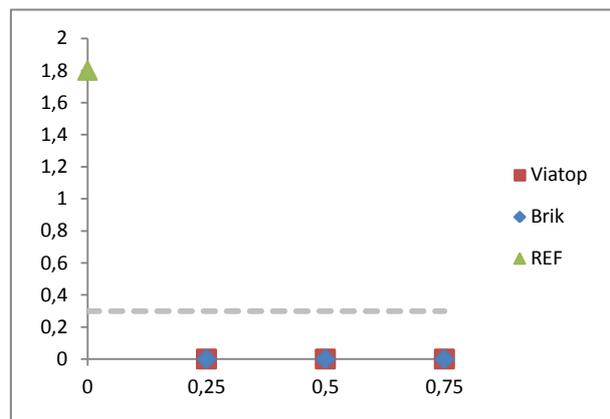


Ilustración 33. Porcentaje de escurrimiento según adición de fibra para 5,5% de betún sobre mezcla.

Como se muestra en la Ilustración 32 e Ilustración 33, con una dosificación mínima de fibra, el derrame de ligante se queda nulo. El poder de estabilización de la celulosa es claro, al igual que la correspondencia de escurrimientos entre mezclas con contenidos de betún distintos: en el primer caso, se escurrió una cantidad de ligante del 1,5%, mientras que en el segundo, un 1,8%; siendo la diferencia de contenido previo de 0,5%. En las mismas figuras se muestra el nivel aceptado por norma: no superar el 0,3% de escurrimiento.

Ante estos valores se procedió a la comparación con lo que ocurriría en el caso de un betún modificado (BM-3c), ligante de obligado uso en carreteras españolas de gran tráfico. Se probó para mezclas con 5% de betún sobre mezcla; en probetas con aditivo (brik) y sin él (Ilustración 34).

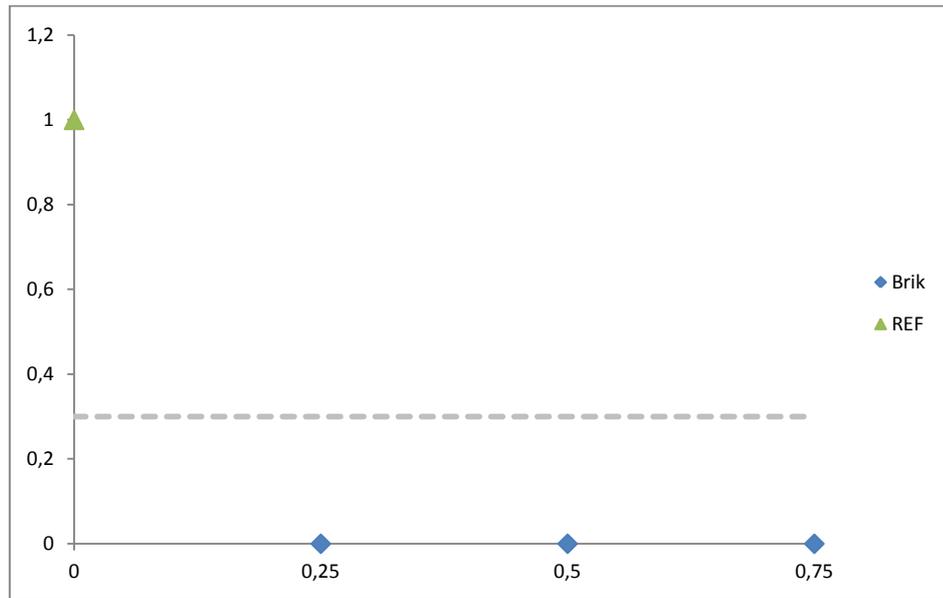


Ilustración 34. Porcentaje de escurrimiento de ligante modificado en probetas con un 5% de betún sobre mezcla.



Ilustración 35. Escurrimientos de probetas con un contenido de 5% de betún sobre mezcla: sin fibra (izda.) y con un 0,25% de fibra de brik (dcha.).

5.3.3. PERMEABILIDAD

La medida de la permeabilidad no viene recogida en norma y sus valores serán comparados con los vistos en el Estado del Arte, en el que se instaba a estar por encima de 0,15 cm/s como índice a partir del cual existe un drenaje efectivo en la carretera.

La Tabla 14 recoge los resultados de los ensayos, mostrando tres situaciones distintas según el contenido de ligante utilizado. Más allá de la comparación de los valores dados entre las mezclas con aditivos y sin ellos, conviene tomar como referencia una mezcla con contenidos de betún cercanos a los utilizados en la actualidad. Por ello, se aglomeran probetas con 4,5% de betún sobre mezcla para establecer qué descenso de permeabilidad le confiere el aumento de ligante y el aditivo de fibra.

Tabla 14. Valores de permeabilidad para distintos tipos de fibra, y diferentes contenidos de betún y fibra.

Tipo de fibras	% betún	% fibras (s/m)	Densidad (gr/m ³)	Permeabilidad media Kv (cm/s)
-	4,5	-	2,091	0,30
-	5,0	-	2,076	0,28
Brik		0,25	2,111	0,20
		0,50	2,126	0,18
		0,75	2,133	0,15
Viatop		0,25	2,112	0,23
		0,50	2,131	0,18
	0,75	2,131	0,15	
-	5,5	-	2,128	0,14
Brik		0,25	2,090	0,25
		0,50	2,126	0,19
		0,75	2,146	0,13
Viatop		0,25	2,130	0,16
		0,50	2,126	0,20
	0,75	2,137	0,15	

En el caso de la dosificación con un 5% de betún, la mezcla sin fibra (referencia) establece el mayor poder drenante; siguiendo después la tendencia a disminuir conforme se añade más cantidad de fibra, al igual que ocurría con las medidas de huecos y porosidad.

En las probetas de 5,5% de ligante, no sucede de la misma manera, con valores bajos en la mezcla referencia y mejorando con la adición de fibras. El brik sigue la tendencia de rebajar su nivel de permeabilidad según se integra mayor contenido de sus fibras; en cambio, el VIATOP muestra unos niveles más variables.

Si se compara con la mezcla patrón (4,5%) se denota un descenso en la permeabilidad, pero no excesivo en algunos casos (Viatop al 5% o Brik al 5,5%). Esa diferencia podría ser aceptable si el nivel de mejora estructural debido a la incorporación de fibras, diera lugar a una mezcla más duradera.

La Ilustración 36 dispone la relación existente entre los huecos totales e interconectados, con la permeabilidad. El que el valor de R^2 no sea mayor indica que la forma de enclavamiento en el esqueleto mineral, y cómo se sitúe el mástico dentro de él, confiere una mejor o peor capacidad drenante a la mezcla; no siendo validada únicamente por el nivel de huecos medidos en ella.

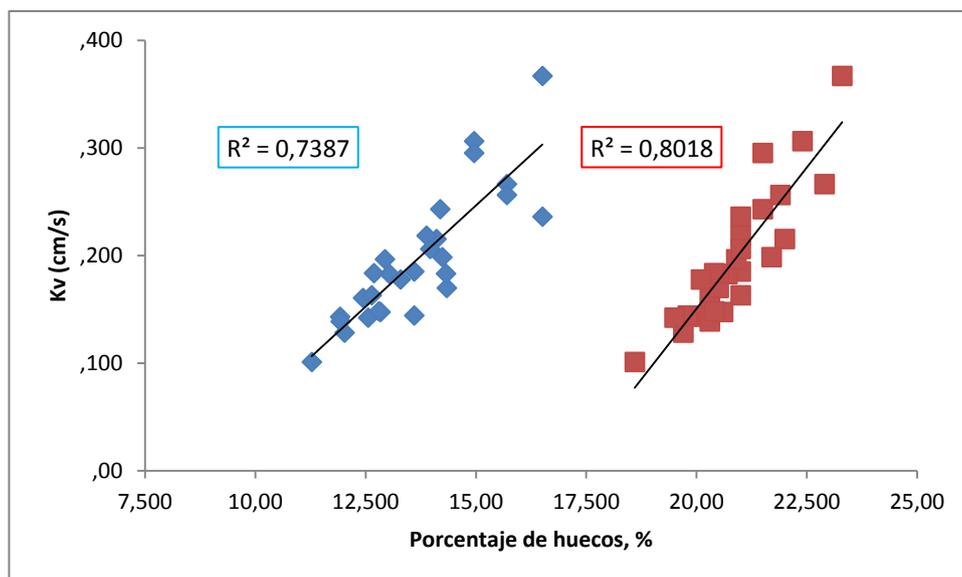


Ilustración 36. Correlaciones entre la capacidad permeable y el volumen de huecos (rojo), y la porosidad (azul).

5.3.4. PÉRDIDA DE PARTÍCULAS

Ante los resultados vistos para la elección de tamaño y formato de fibras brik, sólo se procedió a hacer un ensayo en seco para corroborar ese buen dato (Tabla 15). Para el resto de

probetas, con distintos tipos de fibras y contenidos de ligantes, se desarrollaron mediante el método húmedo: más agresivo y que podría debilitar el efecto del aditivo.

Tabla 15. Ensayo de abrasión seco para mezclas referencia y con aditivo brik.

% betún	% fibras	Densidad (gr/cm3)	% pérdidas
5	-	2,148	7,4%
	0,25	2,143	6,0%
	0,50	2,140	9,1%
	0,75	2,153	5,7%

La Ilustración 37 y la Ilustración 38 revelan el efecto de las fibras sobre la mezcla desde la mínima dosificación. Tanto para contenidos de 5% como para los 5,5% de betún sobre mezcla, existe una reducción importante del nivel de pérdidas, quedando incluso por debajo del nivel de 20% marcado por la norma para las probetas ensayadas a seco. En cuanto a la diferenciación entre fibras, es apenas significativa y sólo demuestra que el residuo de brik no se aleja del rendimiento que aporta VIATOP®.

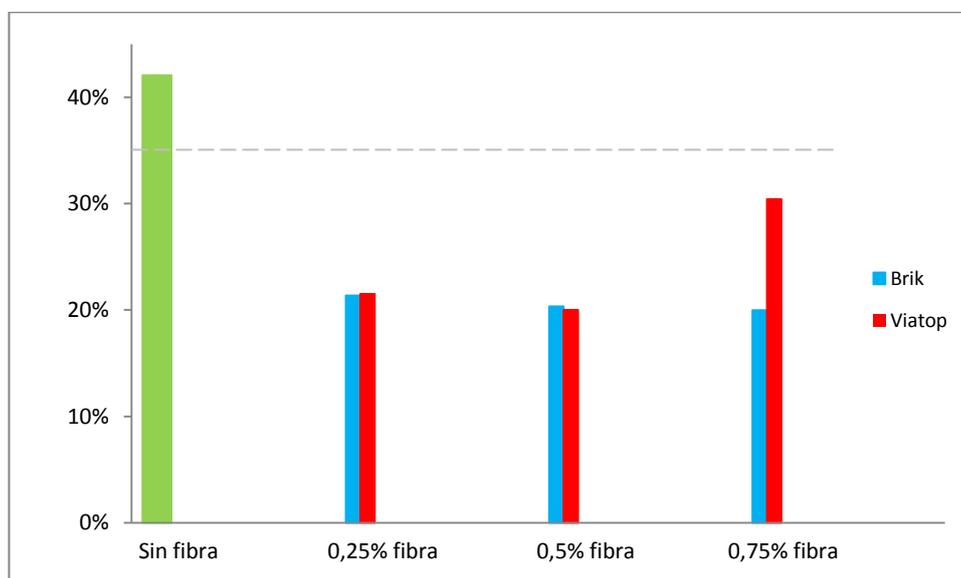


Ilustración 37. Porcentaje de pérdidas en ensayo Cantabro húmedo para mezclas con 5% de betún s/m.

Al igual que ocurría en el ensayo de permeabilidad, no sólo se toman como referencia las probetas sin adición de fibra, sino que también aquellas con un contenido de ligante de

4,5%. Los valores que esta mezcla alcanza son los siguientes: 24% de pérdidas en el ensayo en seco; y en el caso del método húmedo, un 48%. La mejora de prestaciones que presentan las mezclas con mayor dosificación de betún es notable; mucho mayor en el caso de las mezclas con aditivos de fibra.

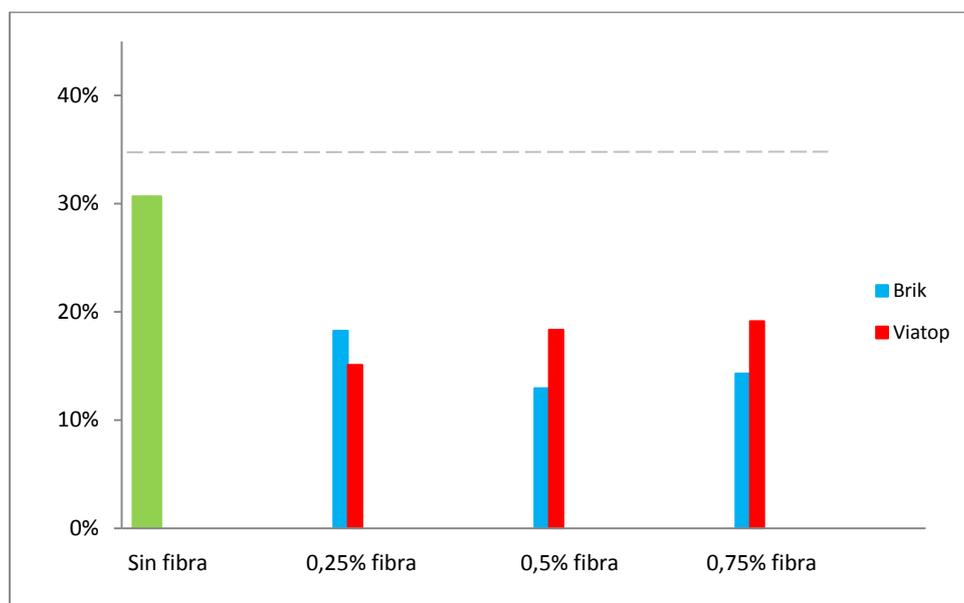


Ilustración 38. Porcentaje de pérdidas en ensayo Cántabro húmedo para mezclas con 5,5% de betún s/m.

5.3.5. COMPRESIÓN CÍCLICA TRIAXIAL

El ensayo triaxial no ha conseguido reflejar la esperada curva de fluencia de la mezcla bituminosa y no se alcanza el punto de colapso; a pesar de aumentar el número de ciclos, además de la carga y la temperatura. Además el estudio relativo entre mezclas no es demasiado concluyente, indicando similares porcentajes de deformación entre diferentes mezclas. Los resultados presentados a continuación (Tabla 16) pueden servir para optimizar el proceso de recogida de datos, investigando en otras maneras de revelar el efecto que le ocurre a la mezcla en carretera. Es un ensayo prometedor, pero poco evolucionado hasta la fecha, por lo que apenas se pueden sacar conclusiones aun, salvo la de progresar en la forma de aplicar las cargas, las temperaturas idóneas de ensayo y la recogida de los valores. El objetivo final debería ser el de correlacionar este ensayo con el de pista, limitando el uso de este último, que requiere más cantidad de material y no siempre es concluyente.

Con los datos presentados no se puede diferenciar entre mezclas, aunque lo que sí queda claro es que la temperatura es una de las variables que condicionan en mayor medida su servicio. Quizás el siguiente paso sea el de reducir el esfuerzo de confinamiento, y así ver si la no consecución del colapso es debido al límite desviador que nos produce el comentado confinamiento.

Tabla 16. Resultados de deformación vertical según mezcla, temperatura y tipo de carga.

Mezcla	Tipo de carga	Carga desviadora (kPa)	Temperatura (°C)	Porcentaje de deformación vertical
Referencia	Senoverso	600	50	0,53
Referencia	Senoverso	600	60	0,64
Referencia	Bloque			0,69
Brik	Bloque	600	60	0,72
Viatop	Bloque			0,63

En la Ilustración 39, podemos ver la forma de deformación que tienen las mezclas ensayadas, en las que se puede ver el estadio primario, con gran deformación en pocos ciclos; y también el secundario, de tipo estacionario que refleja la forma de fatiga de la probeta.

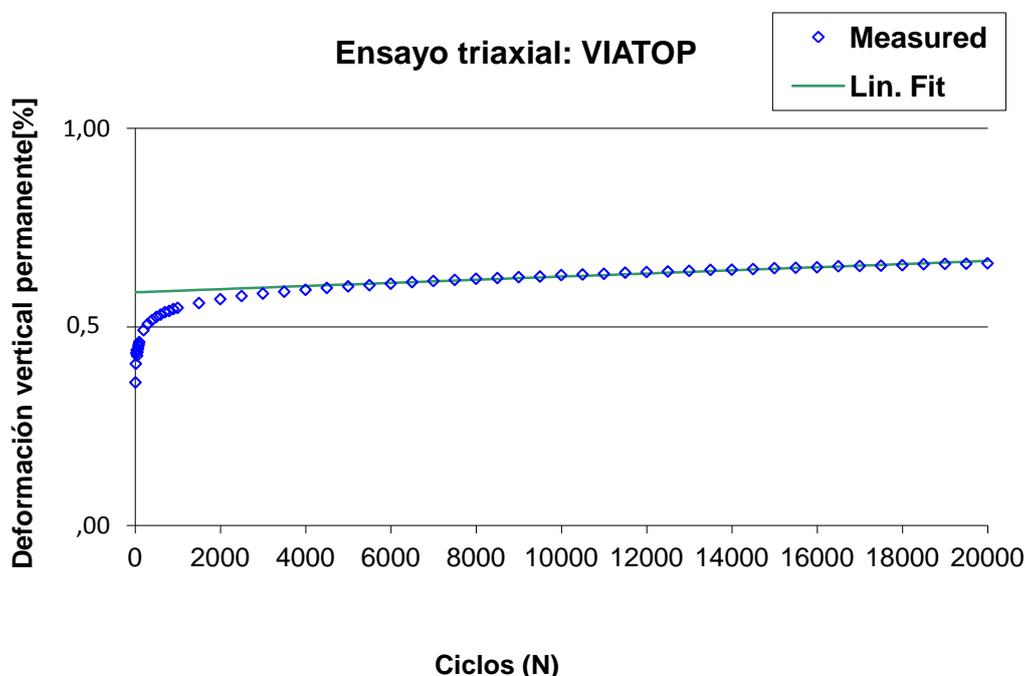


Ilustración 39. Deformación permanente en mezcla porosa con VIATOP (0,5% sobre mezcla).

5.3.6. ENSAYO DE COMPACTACIÓN GIRATORIA

Los resultados obtenidos por la compactación giratoria serán analizados mediante los índices energéticos presentados en el Estado del Arte y la Metodología. Tomaremos como referencia el estudio de Del Río et al. (2011), para así poder sacar conclusiones respecto a las deformaciones plásticas que habrían ocurrido en el caso de hacer el ensayo de pista habitual.

Tabla 17. Índices volumétricos calculados con los límites $N_{98\%Marshall}$ y N_{Post}

Tipo de fibra	Marshall			Índices volumétricos			
	%huecos $_{598\%Marshall}$	Ajuste logarítmico	R^2	$N_{98\%Marshall}$	N_{Post}	MSI	MRI
-		$v=-2,692*\ln(x)+33,661$	0,9571	89	405	362	808
Brik	21,6	$v=-2,541*\ln(x)+33,376$	0,9703	103	517	428	1068
Viatop		$v=-2,588*\ln(x)+33,625$	0,9806	97	509	410	1041

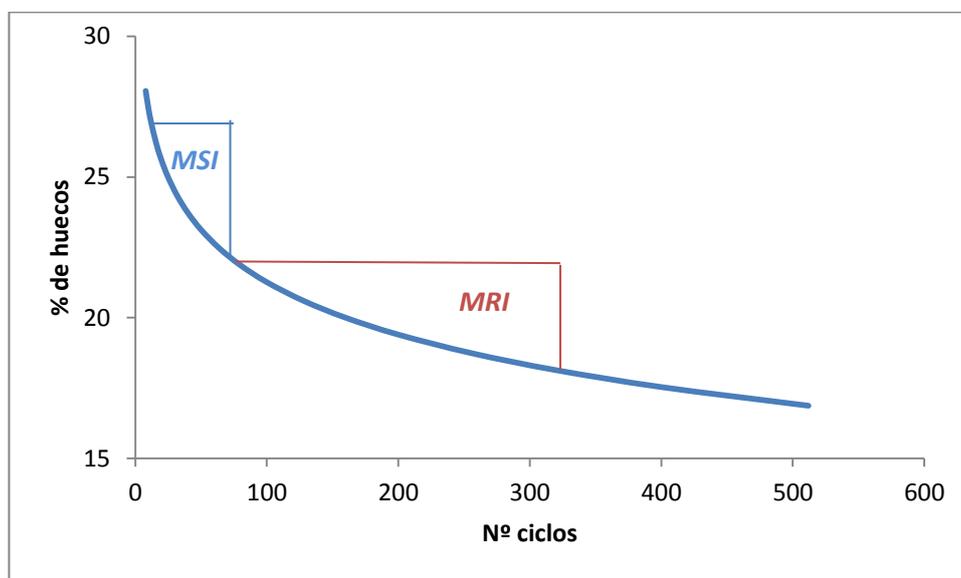


Ilustración 40. Gráfico de los índices volumétricos para mezcla PA 16 con 5% betún sobre mezcla sin adición de fibra.

En la Tabla 17 y la Ilustración 40 se muestran los valores volumétricos y las diferencias existentes entre aquellas mezclas que llevan el aditivo de fibra y las que no lo llevan. Era de esperar que se necesitara más energía para poder compactar las mezclas aditivadas, pero ese incremento energético no es óbice cuando la mejora respecto a deformaciones permanentes es significativa. En cuanto a comparar con mezclas con dosificaciones menores de betún (4,5% s/m), a continuación se presenta las mezclas mencionadas anteriormente (Tabla 18):

Tabla 18. Índices volumétricos para las mezclas referencia con 4,5% betún sobre mezcla [41].

Tipo de fibra	Compactador giratorio					Índices volumétricos	
	%huecos _{98%Marshall}	Ajuste logarítmico	R ²	N _{98%Marshall}	N _{Post}	MSI	MRI
Referencia	21,6	$v=-2,69*\ln(x)+34,22$	0,966	109	501	528	999

Comparando los resultados de las mezclas desarrolladas en el presente trabajo con las que conllevan la dosificación habitual de betún para mezclas porosas, se establece que la energía necesaria para compactarlas es menor, y en el caso de las que contienen fibra, su resistencia a la post-compactación es mayor.

Los valores de energía se tomarán acorde al ajuste desarrollado en la referencia para mezclas porosas PA 16. También se tomarán en consideración las correlaciones con el ensayo de pista y los valores mínimos a cumplir.

Tabla 19. Valores de energía para mezcla PA 16 con betún convencional 60/70.

Tipo de fibra	Compactador giratorio					Energía (kJ/kg)	
	%huecos _{98%Marshall}	Ajuste para N=250	R ²	N _{98%Marshall}	N _{Post}	E _{MSI}	E _{MRI}
Referencia (4,5% betún s/m)		$E=0,0140x-0,007$	0,996	109	501	1,414	5,488
Referencia (5% betún s/m)	21,6	$E=0,0135x-0,0466$	0,999	89	405	1,155	4,266
Brik		$E=0,0147x-0,068$	0,995	103	517	1,446	6,086
Viatop		$E=0,0137x-0,0555$	0,997	97	509	1,273	5,644

El nivel exigido para mezclas porosas no fue caso de estudio en la Tesis referenciada, pero para establecer una comparación con los niveles mínimos exigidos en correlación con el ensayo de pista se tomarán los resultados mostrados en la Tabla 5. En ella, se indica que valores del índice volumétrico MRI por encima de 1000 establecen una gran resistencia ante deformaciones plásticas, al igual que valores por encima de 5 (kJ/kg) en cuanto a la cuantificación de energía. Tanto uno como otro valor es superado por las mezclas porosas que contienen aditivo, no así en el caso de la mezcla con 5% de betún sobre mezcla sin fibras en su interior.

6. CONCLUSIONES

6.1. CONCLUSIONES

Los objetivos marcados en la Introducción del presente trabajo han tratado de ser respondidos durante toda la investigación, y es a partir de ellos, a los que se remiten las siguientes conclusiones.

En cuanto al sentido medioambiental de esta propuesta, se puede resumir en los siguientes datos:

- Si se validara el uso de fibra de brik en la mezcla bituminosa, supondría la reutilización de 1300 toneladas de este residuo. Supone un 1,2% del total reciclado en España actualmente (dosificaciones de 0,3% sobre mezcla de fibra). Económicamente, establecería un negocio de 7 millones de euros, sólo teniendo en cuenta el incentivo que se impondría a los consumidores para reciclar.
- La utilización de capas de rodadura tipo SMA y porosa no son mayoritarias en España, aunque sí en Europa, donde el nivel de reciclaje de envases se podría situar en 22000 toneladas, solamente en Alemania.

Cuando se consideran los dos fallos críticos habituales en mezclas porosas, escurrimiento y pérdida de partículas, se hace evidente la necesidad de un aumento del contenido de betún, y por consiguiente, la utilización de aditivos de celulosa en la mezcla. Actualmente, la dosificación óptima de betún en mezclas porosas se sitúa en torno al 4,5% sobre mezcla; siendo la mezcla referencia con la que comparar las mezclas desarrolladas en el presente trabajo, con contenidos de 5 y 5,5%, con los cuáles se ha observado la mejora esperada.

En el caso del ensayo de escurrimiento de ligante, incluso las dosificaciones más bajas se muestran efectivas contra el mismo, incrementando el poder estabilizador que nos proveen los ligantes modificados. Evitar el derrame de ligante confiere a la mezcla porosa de una mejor envuelta del árido grueso y, por ello, un mejor trabajo conjunto, limitando la principal causa de desgaste.

El aumento de contenido de ligante que trae consigo el uso de fibras, no establece un aumento de coste por kilómetro de carretera, sino que posibilita un ahorro debido al mayor precio que tiene el betún modificado. Además, a la vista de los resultados obtenidos en los ensayos de pérdidas de partículas, se podría pensar en un aumento de la vida útil del

pavimento, reflejando un coste de inversión más diferido en el tiempo.

La rebaja de la permeabilidad y la porosidad, debido al incremento en la dotación de betún y la adición de fibras, es relativamente menos pronunciada en comparación con la mejora estructural adquirida.

A la vista de los resultados obtenidos con la fibra de brik, se demuestra que, en gran medida, su utilización es igual de efectiva que los producidos por la celulosa sintética comercial, con lo que su composición basada en cartón, polietileno y aluminio, no afecta a su servicio. Se podría decir que con dosificaciones de betún del 5% sobre mezcla, acompañadas de un 0,35-0,5% de fibras; el rendimiento de la mezcla demuestra una mejoría y comprenderían unos valores con los que seguir investigando con otros betunes y tipos de fibras.

Dentro de la Metodología se explica que la forma en que se añade la fibra de residuo puede ser como si se tratara de un árido más, sólo cuidando de que se encuentre sin humedad. El formato de pellet en el que se envuelven las fibras comerciales se debe, únicamente, a una mayor facilidad de transporte y disposición en planta. Si se buscaran esas características en el caso de las fibras de residuo, éstas han demostrado ser capaces de adaptarse a ello.

Esto conlleva la posibilidad de un uso extensivo del residuo de brik en mezclas con necesidad de aditivos para la mejora de su resistencia. Su comparación con el producto comercial resulta positiva y establece dos valores significativos que recomendarían su utilización: menor coste de producto, ya que se trata de un residuo y no forma parte de una patente; y en segundo lugar, el propio reciclaje de un residuo que únicamente necesita de una trituración.

Por último, cabe reseñar los valores de mejora que se indican en los ensayos: el uso de fibras evitaría cualquier tipo de escurrimiento de ligante, podría aumentar la vida útil de las mezclas porosas (pérdidas rebajadas hasta en un 50%), y desciende el nivel de permeabilidad, pero en unos valores por debajo del 10%, en comparación con las mezclas actuales.

6.2. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Las posibilidades que pueden proseguir la línea tomada en este trabajo son las siguientes:

- Estudio de la **reología del betún** por la acción de las fibras y su posible modificación.
Sería adecuado conocer que, además de la capacidad de absorción que tiene la celulosa, es capaz de concretar una red entre las partículas del esqueleto mineral y el betún.
- Capacidad de **integración de fibras recicladas** de envases en mezclas SMA.
Las mezclas SMA, con su gran cantidad de ligante, pueden ser más que óptimo para la integración de las fibras de brik. Además podría suponer una rebaja del contenido de ligante dosificado en este tipo de mezclas.
- Estudio del comportamiento de las mezclas desarrolladas ante una **carga cíclica sin confinamiento**.
Con los resultados del ensayo triaxial, la única variable que podría estar obstaculizando el colapso de las probetas podría ser la carga de confinamiento.
- Análisis de la **organización de las fibras dentro de la mezcla** y el aumento de superficie específica sobre el árido.
Con herramientas como el SEM cabría la posibilidad de demostrar la función real de nuestras fibras, viendo su adhesión entre betún y árido.
- Estudio de **granulometrías con mayor cantidad de huecos** para aumentar las dosificaciones de betún.
Al comprobar que el aumento de betún, ayuda a aumentar la vida útil de las mezclas bituminosas; se podría proseguir con un estudio con mayor cantidad de áridos gruesos, acercándonos a la filosofía Macadam.

7. REFERENCIAS

Referencias

- [1] EAPA, Sustainable roads. Long-Life asphalt pavements. (2007).
- [2] E.R. Brown, J.E. Haddock, C. and Crawford, Investigation of stone matrix asphalt mortars. Transportation Research Record. (1996) 95-102.
- [3] B.J. Putman, S.N. Amirkhanian, Utilization of waste fibers in stone matrix asphalt mixtures, Resour. Conserv. Recycl. 42 (2004) 265-274.
- [4] J.-. Chen, K.-I. Lin, Mechanism and behavior of bitumen strength reinforcement using fibers, J. Mater. Sci. 40 (2005) 87-95.
- [5] K.R. Hansen, R.B. McGennis, B.D. Prowell, A. and Stonex, Current and future uses of non-bituminous components of bituminous paving mixtures. Transportation in the New Millennium TRB A2D02. (2000).
- [6] R.B. Freeman, J.L. Burati, S.N. Amirkhanian, Polyester fibers in asphalt paving mixtures. Assoc Asphalt Paving Technol (1989) 387–409.
- [7] S. Wu, Q. Ye, N. Li, H. Yue, Effects of fibers on the dynamic properties of asphalt mixtures, J Wuhan Univ Technol Mater Sci Ed. 22 (2007) 733-736.
- [8] A. Mokhtari, F. Moghadas Nejad, Mechanistic approach for fiber and polymer modified SMA mixtures, Constr. Build. Mater. 36 (2012) 381-390.
- [9] Transportation Research Board, Bailey Method for Gradation Selection in Hot-Mix Asphalt Mixture Design, E-C044 (2002).
- [10] W.R. Vavrik, W.J. Pine, S.H. Carpenter, Aggregate blending for asphalt mix design Bailey method, Transp Res Rec. (2002) 146-153.
- [11] G. Mavko, T. Mukerji, J. and Dvorkin, The Rock Physics Handbook—Tools for Seismic Analysis in Porous Media, Cambridge University Press, Mass.
- [12] A.E. Alvarez, A. Epps-Martin, C. Estakhri, R. Izzo, Evaluation of durability tests for permeable friction course mixtures, Int. J. Pavement Eng. 11 (2010) 49-60.
- [13] A.E. Alvarez, A.E. Martin, C.K. Estakhri, J.W. Button, C.J. Glover, S.H. Jung, Synthesis of current practice on the design, construction, and maintenance of porous friction courses. FHWA/TX-06/0-5262-1 (2006).
- [14] Q. Lu, J.T. Harvey, Laboratory performance comparison of promising asphalt surface mixes, CICTP: Multimodal Transp. Syst. - Convenient, Safe, Cost-Eff. , Effic. - Proc. COTA Int. Conf. Transp. Prof. (2012) 3451-3462.

- [15] E.T. Hagos, A.A.A. Molenaar, M.F.C. Van De Ven, J.L.M. Voskuilen, Durability related investigation into porous asphalt, *Adv. Charact. Pavement Soil Eng. Mater.* - *Proc. Int. Conf. Adv. Charact. Pavement Soil Eng. Mater.* 1 (2007) 713-727.
- [16] A. Moriyoshi, T. Jin, T. Nakai, H. Ishikawa, Evaluation methods for porous asphalt pavement in service for fourteen years, *Constr. Build. Mater.* 42 (2013) 190-195.
- [17] F. Frigio, E. Pasquini, G. Ferrotti, F. Canestrari, Improved durability of recycled porous asphalt, *Constr. Build. Mater.* 48 (2013) 755-763.
- [18] D.-. Shen, C.-. Wu, J.-. Du, Laboratory investigation of basic oxygen furnace slag for substitution of aggregate in porous asphalt mixture, *Constr. Build. Mater.* 23 (2009) 453-461.
- [19] A.E. Alvarez, E. Mahmoud, A.E. Martin, E. Masad, C. Estakhri, Stone-on-stone contact of permeable friction course mixtures, *J. Mater. Civ. Eng.* 22 (2010) 1129-1138.
- [20] P.S. Kandhal, Design, construction, and maintenance of open-graded asphalt friction courses. Information series 115. Lanham, MD: National Asphalt Pavement Association. (2002).
- [21] D.E. Watson, K.A. Moore, K. Williams, L.A. Cooley Jr., Refinement of New-Generation Open-Graded Friction Course Mix Design, *Transp Res Rec.* (2003) 78-85.
- [22] M.R. Mohd Hasan, J.Y. Eng, M.O. Hamzah, J.L.M. Voskuilen, The effects of break point location and nominal maximum aggregate size on porous asphalt properties, *Constr. Build. Mater.* 44 (2013) 360-367.
- [23] P.S. Kandhal, R.B. and Mallick, Open-graded friction courses: State of practice. Rep. No. 98-7. National Center for Asphalt Technology., Auburn Univ., Auburn, AL. (1998).
- [24] R.B. Mallick, J. Cooley L.A., Design, construction, and performance of new-generation open-graded friction courses, *Proc. Assoc. Asph. Paving Technol.* 69 (2000) 391-423.
- [25] K.R. Lyons, B.J. Putman, Laboratory evaluation of stabilizing methods for porous asphalt mixtures, *Constr. Build. Mater.* 49 (2013) 772-780.
- [26] E.T. Hagos, The Effect of Aging on Binder Properties of Porous Asphalt Concrete. (2008).
- [27] J.-. Chen, Y.-. Sun, M.-. Liao, C.-. Huang, Effect of binder types on engineering properties and performance of porous asphalt concrete, *Transp Res Rec.* (2012) 55-62.
- [28] F.E. Pérez, M.A. Calzada, Analysis and evaluation of the performance of porous asphalt: the Spanish experience. First international symposium on surface characteristics (surface characteristics of roadways: international research and technologies). (1990) 512-527.
- [29] A.E. Alvarez, A.E. Martin, C. Estakhri, A review of mix design and evaluation research for permeable friction course mixtures, *Constr. Build. Mater.* 25 (2011) 1159-1166.

- [30] D.E. Watson, L.A. Cooley Jr., K.A. Moore, K. Williams, Laboratory performance testing of open-graded friction course mixtures, *Transp Res Rec.* (2004) 40-47.
- [31] NCHRP, Specification Criteria for Simple Performance Tests for Rutting Volume I: Dynamic Modulus (E^*) Volume II: Flow Number and Flow Time, 580 (2007).
- [32] Rafael Jiménez Sáez (CEDEX), Comunicación personal, (2014).
- [33] H. Bahía, T. Friemel, P. Peterson, J. Russell, B. Poehnel, Optimization of Constructibility and Resistance to Traffic: A New Design Approach for HMA Using the SUPERPAVE Compactor. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists.* 67 (1998) 189-189-232.
- [34] M. Delrio-Prat, A. Vega-Zamanillo, D. Castro-Fresno, M.A. Calzada-Pérez, Energy consumption during compaction with a Gyrotory Intensive Compactor Tester. Estimation models, *Constr. Build. Mater.* 25 (2011) 979-986.
- [35] H. Chen, Q. Xu, S. Chen, Z. Zhang, Evaluation and design of fiber-reinforced asphalt mixtures, *Mater Des.* 30 (2009) 2595-2603.
- [36] H.F. Hassan, S. Al-Oraimi, R. Taha, Evaluation of open-graded friction course mixtures containing cellulose fibers and styrene butadiene rubber polymer, *J. Mater. Civ. Eng.* 17 (2005) 416-422.
- [37] J.-. Chen, Y.-. Sun, M.-. Liao, C.-. Huang, K.-. Tsou, Evaluation of permeable friction course mixes with various binders and additives, *J. Mater. Civ. Eng.* 25 (2013) 573-579.
- [38] G.-. Zhao, Test on evaluation index of deformation performance for polyester fiber reinforced asphalt concrete, *Proc. - Int. Conf. Intelligent Syst. Des. Eng. Appl.*, ISDEA. 2 (2011) 561-564.
- [39] S.-. Wu, G. Liu, L.-. Mo, Z. Chen, Q.-. Ye, Effect of fiber types on relevant properties of porous asphalt, *Trans Nonferrous Met Soc China.* 16 (2006) 791-795.
- [40] S.-. Fu, C.-. Yue, X. Hu, Y.-. Mai, On the elastic stress transfer and longitudinal modulus of unidirectional multi-short-fiber composites, *Compos. Sci. Technol.* 60 (2000) 3001-3012.
- [41] S.-. Wu, G. Liu, L.-. Mo, Z. Chen, Q.-. Ye, Effect of fiber types on relevant properties of porous asphalt, *Trans Nonferrous Met Soc China.* 16 (2006) 791-795.
- [42] H. Behbahani, S. Nowbakht, H. Fazaeli, J. Rahmani, Effects of fiber type and content on the rutting performance of Stone matrix asphalt, *J. Appl. Sci.* 9 (2009) 1980-1984.
- [43] J.-. Chen, K.-.I. Lin, Mechanism and behavior of bitumen strength reinforcement using fibers, *J. Mater. Sci.* 40 (2005) 87-95.
- [44] Q. Ye, S. Wu, N. Li, Investigation of the dynamic and fatigue properties of fiber-modified asphalt mixtures, *Int. J. Fatigue.* 31 (2009) 1598-1602.

[45] B. Huang, G. Li, L.N. Mohammad, Analytical modeling and experimental study of tensile strength of asphalt concrete composite at low temperatures, Compos Part B: Eng. 34 (2003) 705-714.

[46] K. Laukkanen, T. Unhola, Low friction areas of driving training tracks. Laboratory and field tests 2000, VTT Tied Valt Tek Tutkimuskeskus. (2001) X-58.